

**n°100**





**Directeur des publications**  
André Bailly  
Ingénieur Géomètre ETP

**Directeur adjoint des publications**  
Emmanuel Natchitz  
Enseignant Chercheur ESTP

**Rédaction et administration XYZ**  
2 avenue Pasteur  
94165 Saint Mandé cedex  
Tél. : 01 43 98 84 80 - Fax: 01 43 74 72 80  
secrétariat: tous les jours de 9 h à 17 h

**Rédacteur en chef**  
Emmanuel Natchitz

**Comité de Rédaction**  
Pierre Grussenmeyer  
Professeur des universités INSA Strasbourg  
Tania Neusch  
Maître de Conférences - INSA Strasbourg  
Stéphane Durand  
Enseignant chercheur - ESGT Le mans

**Responsable du site internet**  
Tania Neusch

**Comité de lecture**  
Hans-Peter Bähr  
Professeur des universités - Karlsruhe  
Nicolas Balard  
enseignant chercheur ESTP  
Jean Bourgoïn  
Ingénieur Général Hydrographe ER  
Robert Chevalier  
Géomètre-Expert DPLG  
Suzanne Débarbat  
Astronome Observatoire de Paris  
Raymond d'Hollander  
Ingénieur Général Géographe - IGN  
Mathieu Koehl  
Maître de conférences à l'INSA de Strasbourg  
Joëlle Nicolas  
Maître de conférences -ESGT Le Mans  
Jacques Riffault  
Directeur Commercial  
Robert Vincent  
Ingénieur ECP  
Dr Pascal Willis  
Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées.

**Publicité**  
Chantal Holdinet (Tél : 01 39 53 98 93)

**Conception et maquette**  
Dorothée Picard

**Abonnements** : Evelyne Mesnis

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


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

**Dépot légal**  
3<sup>e</sup> trimestre 2004 ISSN 0290-9057  
N° CPPAP: 0106 G 80866

**Tirage de ce numéro** : 1500 ex

**Abonnement annuel**  
France CEE: 73 €  
Étranger (avion, frais compris) : 76 €  
Les règlements payés par chèques payables sur une banque située hors de France doivent être majorés de 10 € le numéro: 20 €  
Le bulletin d'adhésion est en p. 107  
Membre du SPCS Syndicat de la Presse Culturelle et Scientifique  
L'AFT n'est pas responsable des opinions émises dans les conférences qu'elle organise ou les articles qu'elle publie. Tous droits de reproduction ou d'adaptation strictement réservés.

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

Membre de la FIG (Fédération Internationale des Géomètres)   
2 avenue Pasteur - 94165 Saint Mandé cedex - Tél. : 01 43 98 84 80 - Fax: 01 43 74 72 80

E-mail: [info@aftopo.org](mailto:info@aftopo.org) • Site internet: <http://www.aftopo.org>

### ■ Editorial

- > Editorial du N°1 d'XYZ de Louis Catinot ..... 4
- > Editorial de Michel Kasser ..... 5
- > L'Invité du n°100 : Alain GAUDET ..... 7

### ■ Info-Topo

- > Les informations de la profession ..... 9

### ■ Manifestations

- > La conférence internationale "3rd dimension" 2004, le rendez-vous des professionnels des solutions scanners 3D ..... 23
- > LUMIVILLE 2005 ..... 25
- > Les Journées de la Topographie à l'INSA de Strasbourg ..... 26

### ■ Photogrammétrie

- > XX<sup>e</sup> Congrès de la Société Internationale de Photogrammétrie et de Télédétection : bilan et projets  
Pierre Grussenmeyer ..... 27

### ■ Techniques nouvelles

- > La DMC de Z/I Imaging : une conception innovante au service de la précision  
Isabelle POUX et Dave DIONNE ..... 35

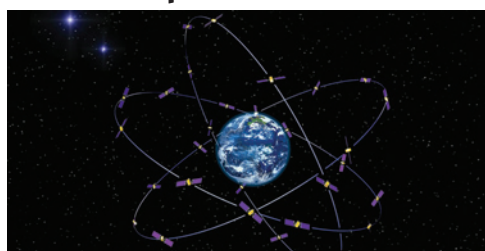
### ■ Topographie



- > Intégration de relevés topographiques et de mesures GPS en mode cinématique pour l'analyse des performances de cyclistes sur piste  
Mathieu LAMBERT et Rock SANTERRE ..... 39

- > Navigation pédestre dans un environnement construit  
Pierre-Yves GILLIÉRON et Dr. Quentin LADETTO ..... 43

### ■ Techniques nouvelles



- > Le système GALILEO, une technique d'avenir pour la géodésie spatiale de très haute exactitude  
Florent DELEFLIE, François BARLIER, Pierre EXERTIER ..... 49

### ■ Histoire

- > Les repères topographiques de 1896 ou à la recherche du plan dans la ville  
Marc LE FLOUR et Olivier NAMIAS ..... 59
- > Méchain géodésien  
Suzanne DÉBARBAT ..... 63

### ■ Géodésie

- > La géodésie française et mondiale : une évolution considérable en 25 ans  
Michel KASSER ..... 71

### ■ SIG



- > Un SIG pour les sapeurs-pompiers de Paris  
Jean-Luc RUBOD - Adjudant Bernard BAULERY Emmanuel NATCHITZ ..... 77

### ■ Métrologie

- > Suivi automatisé des piles du pont de Fleury-Mérogis lors des opérations de poussage  
Frédéric DADOUN et Didier DUPUIS - François LEBLANC et Sylvain SABINI ..... 81

### ■ Géomatique

- > Géomatique, la chenille ou l'imago ? Question de définition...  
Tania NEUSCH et Hans-Peter BÄHR ..... 85

### ■ Cartographie

- > La génération automatique de spatiocartes  
Simon BAILLARIN et Marc BERNARD ..... 92

### ■ Espace jeune

- > MAGMA : l'expédition de l'ENSG au Mont-Blanc  
Julien VARJABETIAN et Jérôme VERDUN ..... 95

### ■ GSF

- > Les pays du sourire...  
Par Pierre RODRIGUEZ, Paul COURBON et Philippe PELLEGRINI ..... 99

### ■ Art et Géométrie



- > Jean Dewasne : De l'art à l'hectare  
Adriana MIRI et Jean-Pierre MAILLARD ..... 100

### ■ Livres ..... 104

Pour la recherche de nos annonceurs consulter la page 105.



M. Louis CATINOT

## LA PAGE DU PRÉSIDENT

### X, Y, Z

*Si ce n'était la crainte de franchir allègrement la limite de mon niveau de compétence — qui est celle d'un autodidacte —, je savourerais encore davantage l'honneur que vous m'avez fait, mes chers confrères, de me permettre de m'adresser à vous tous à l'occasion de la parution de notre première revue X, Y, Z.*

*Ces trois dernières lettres de l'alphabet sont chères aux topographes et deviennent un symbole chaque fois qu'elles représentent la localisation et le positionnement spatial tri-dimensionnel.*

*Après avoir évoqué, dans la plaquette de l'A.F.T., la mission de notre association, je voudrais aujourd'hui vous entretenir du topographe et de l'A.F.T.*

### LE CONSTAT

*"Nous ne voulons pas être ce que nous ne sommes pas, mais nous voulons être ce que nous sommes".*

*Cette pensée de Pascal illustre assez bien le souhait du topographe à la fin de ce XX<sup>e</sup> siècle.*

*Je constate effectivement que notre image de marque ne correspond pas toujours à celle que l'on imagine d'un homme de l'Art, car le topographe n'est pas systématiquement considéré comme un homme de l'Art...*

*Certains vivent isolés, presque dans l'oubli, avec leur seule science et leur technique. Ils participent pourtant tous aux grandes réalisations humaines en y prenant une large part de responsabilité.*

*Cependant le topographe, une fois le devoir accompli, n'a pratiquement pas droit au partage du festin, et aux honneurs avec ceux qui sont considérés comme les seuls "responsables" de la réussite des chefs-d'œuvre.*

*Et le topographe continue à être reçu par l'escalier de service : celui par lequel on reçoit les loyaux et fidèles serviteurs.*

*Tel est approximativement le sort de bien des topographes d'aujourd'hui.*

### LE TOPOGRAPHE FONDE SON ASSOCIATION

*Alors le topographe a décidé de sortir des oubliettes ; il veut bien continuer à accomplir ce métier qu'il considère comme une vocation, mais plus à n'importe quelles conditions. Voilà pourquoi il vient de fonder à nouveau\* une Association Française de Topographie pour promouvoir la topographie et la dignité de la fonction de topographe en France.*

### LES EXIGENCES DE LA PROFESSION

*Le vrai topographe, nanti de toutes les qualités nécessaires à l'exercice de sa fonction, a ses propres exigences.*

*La première consiste à ne jamais admettre au sein de sa corporation un incapable ou un usurpateur qui détruirait, aux yeux des utilisateurs, les qualités morales et la compétence technique qui sont attachées à sa fonction.*

*La seconde concerne la déontologie : tout utilisateur de topographie doit définir ses besoins ; mais il ne lui appartient pas de faire état des moyens nécessaires pour assurer une production conforme à l'exigence du besoin.*

*Mais le topographe doit aussi faire preuve d'exigence envers lui-même, en :*

- acceptant d'améliorer la gamme de ses connaissances,
- s'efforçant d'évoluer à tous les stades de sa carrière :
- proposant toujours et partout la meilleure topographie, c'est-à-dire celle qui est la mieux ajustée et par voie de conséquence la moins onéreuse, aux besoins du moment
- mettant en commun avec tous ses confrères, le résultat de ses recherches, les fruits de son expérience, l'analyse de ses réflexions sur les succès ou les échecs obtenus à partir des méthodes ou des instruments mis en service.

*Si tous les adhérents acceptent de se rallier à ces exigences, l'A.F.T. pourra alors envisager de prendre en charge ce qu'il reste à faire pour que le topographe devienne le conseiller du généraliste et le maître d'œuvre en topographie.*

### RÔLE DE L'A.F.T.

*Le rôle de l'A.F.T. sera alors d'entreprendre une série d'actions effectives et constructives de nature à relever le niveau actuel de la topographie, en commençant notamment par :*

*— l'étude par les huit commissions des problèmes techniques actuels ou nouveaux touchant à tout l'éventail de la topographie,*

*— la publication, dans notre revue X, Y, Z, des résultats obtenus par ces commissions mais aussi par tout autre article se rapportant à la profession. Nous publierons également, avec une bien grande joie, les succès et les exploits des topographes, chaque fois que ceux-ci mériteront une citation. Nous instaurerons des colloques régionaux, nationaux ou internationaux — car le topographe peut aussi exporter sa technique — traitant de sujets d'actualité.*

*C'est donc avec l'aide de son association que le topographe va pouvoir bientôt exercer sa profession avec dignité et sérénité !*

*Ainsi, il deviendra, dans ce domaine où il a tant donné et si peu reçu, cet homme de l'Art incontesté et incontestable.*

*A tous ceux qui posent encore la question : une A.F.T. pourquoi faire ? Je pense que cette page peut servir de réponse.*

*Et... le topographe, comme par le passé, continuera à fournir cette géométrie indispensable à toute activité humaine.*

\* Après la Société de Topographie de France fondée en 1876.



*Cet été aura été celui des Jeux Olympiques, et pour nous il aura bien été aussi l'occasion de se remémorer la célèbre inscription qui, dit-on, ornait le temple de Zeus à Olympie, site des premiers jeux : que nul n'entre ici s'il n'est géomètre ! Ce métier, indissociable du développement des civilisations, et pour d'aucuns l'un des plus anciens métiers du monde, a évolué au travers des âges à la façon d'un témoin avancé de leurs développements.*

*Comme c'est le cas de beaucoup de techniques, celles de ce métier n'ont pendant des millénaires connu d'évolutions que de façon bien rare, avec des inventeurs qui le plus souvent sont restés inconnus, à côté de quelques théoriciens qui, eux, sont passés à la postérité : Thalès, Pythagore, ... Si la topométrie a laissé quelques traces, c'est précisément parce qu'elle était à l'avant garde des mathématiques, l'une des plus grandes conquêtes de l'esprit humain, tout en étant au service de la cité et de la société.*

*Mais depuis quelques décennies, et comme dans beaucoup de domaines, tout s'est accéléré de façon extraordinaire, et il est bon de temps en temps de faire un petit retour en arrière. C'est ce que nous avons tenté de faire avec ce numéro 100, en rappelant ce qui a représenté les 25 plus folles années jamais vécues jusqu'ici par les topographes sur cette Terre, qui ont été en même temps les 25 années de l'Association Française de Topographie. Bon anniversaire à l'AFT, et bon anniversaire à XYZ !*

*Et bonne lecture à tous...*

**Michel Kasser,**  
Président de l'AFT.

#### **Le mot du rédacteur en chef :**

XYZ N°100. C'est un numéro particulier que nous vous proposons pour célébrer cet événement. Nous avons, pour marquer l'occasion, décidé de republier l'éditorial rédigé pour XYZ n°1 par M. Catinot, président de l'AFT à cette époque. Vous pourrez y retrouver les objectifs que l'AFT s'était fixés dès sa création. Au cours de ces 25 années d'existence, les moyens ont changé mais la revue a gardé le même azimut.

A travers ce numéro, nous vous proposons un éventail des thèmes traditionnellement abordés dans notre revue. Ce numéro est fait pour rappeler la diversité de ce vaste et magnifique monde de la topographie.

Bonne lecture à tous,

Emmanuel Natchitz.



## **L'évolution d'une profession : celle de géomètre expert**

© A. Jourde



*La plus ancienne activité du géomètre expert est née avec la propriété foncière : il s'agit bien évidemment de la délimitation de la propriété.*

*Les exemples sont nombreux qui relatent l'intervention de l'expert en science topographique notamment dans les différentes constructions d'ouvrages (routes, ponts, canaux, aqueducs...)*

*Pour nous convaincre, le corps de géomètres arpenteurs créé par les Romains avait essentiellement pour objectif de mesurer le sol de l'Empire afin d'en obtenir un plan*

*Si cette activité est encore aujourd'hui parfaitement d'actualité et reste inscrit de par la loi comme une mission déléguée de service public, il est naturel comme toute profession qui veut se montrer dynamique et rester au cœur de l'actualité, de la voir évoluer, tant au niveau de sa formation (initiale et continue), que de ses compétences*

*C'est ainsi, tout naturellement, que nous revendiquons notre formation indispensable d'ingénieur, de spécialiste, et de juriste pour certains d'entre nous, et que nous sommes aujourd'hui des acteurs très présents, reconnus, dans les missions de conception, de gestion, de conseil et d'expertise, et dans les domaines vastes de la gestion du cadre de vie et de l'aménagement du territoire.*

*Egalement avec la généralisation des nouvelles technologies, et notre savoir faire dans le domaine de l'information géographique la profession est présente dans la conception de sites dédiés, ayant pour vocation d'informer en temps réel, tous décideurs mais également tous particuliers (notamment dans le domaine de l'immobilier) ;*

*Notre présence de plus en plus forte auprès des Elus locaux, nous permet aujourd'hui d'être considéré, en plus du technicien, comme le conseiller incontournable, surtout avec la décentralisation engagée qui accroît la responsabilité des décideurs.*

*Toutes ces compétences nouvelles, s'appuient bien évidemment sur notre très bonne connaissance du foncier, mais aussi sur notre immense sagesse de savoir respecter un équilibre fragile entre les différentes composantes que nous sommes amenés à intégrer dans nos réflexions à savoir : l'économie, le juridique, l'environnement, le technique.*

*Demain, le géomètre expert, toujours présent dans le domaine du foncier, devra mettre plus en avant ses connaissances juridiques, qui seront encore plus affirmées, et devenir en quelque sorte le "juge de proximité" ou le médiateur.*

*Demain, nous devons dans tous les cas garder cette identité qui est la nôtre, qui est toute notre richesse et qui fait de nous ce professionnel pragmatique, indépendant et humaniste.*

**Alain GAUDET**

*Président du Conseil*

*Supérieur de l'Ordre des Géomètres-Experts*

## XX<sup>e</sup> Congrès de la Société Internationale de Photogrammétrie et de Télédétection : bilan et projets

■ Pierre GRUSSENMEYER

*Les changements en photogrammétrie et en télédétection sont permanents, étroitement liés aux évolutions en informatique et en imagerie numérique. A travers les résumés des points forts du XX<sup>e</sup> congrès de la Société Internationale de Photogrammétrie et de Télédétection (ISPRS en anglais), cet article présente les thèmes de recherche et les développements considérés comme prioritaires, ainsi que le fonctionnement de cette organisation.*

### Introduction

Les congrès de la Société Internationale de Photogrammétrie et de Télédétection sont organisés tous les quatre ans. Le congrès d'Amsterdam en 2000 avait désigné la Turquie pour l'organisation du XX<sup>e</sup> congrès en 2004. Le Prof. Orhan Altan, directeur du congrès, a réussi à réunir plus de 2500 personnes de 120 pays du 12 au 23 juillet à Istanbul. La délégation française était constituée d'environ 50 personnes, représentée par la Présidente de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection, Mme Marie-José Lefèvre-Fonollosa. Plus de 1700 résumés avaient été soumis au comité d'organisation et aux groupes de travail à la fin de l'année 2003. Malgré ce volume d'information scientifique à diffuser, les organisateurs ont réussi à trouver l'équilibre entre les sessions orales, les posters et l'exposition qui a réuni plus de 80 entreprises ou institutions.

Parmi les points forts soulignés par le Président Prof. John Trinder (Président de 2000-2004), les thèmes de recherche scientifique et les développements industriels suivants ont particulièrement marqué le congrès :

- Les caméras numériques aériennes désormais en phase de production : de nombreux résultats de tests réalisés avec des images numériques ont été présentés, issues de l'utilisation pratique de ces caméras ; mais les chambres à film en photogrammétrie aérienne restent d'actualité et les émulsions continuent de faire l'objet de recherches ;
- Les résultats des tests d'imagerie satellitaire à haute résolution, incluant le projet commun ISPRS/CNES sur la détermination des MNT à partir de SPOT 5 ;



- Les applications des techniques de balayage laser aéroporté pour la détermination des MNT et l'extraction de bâtiments ;
- Le développement de petits et de microsatellites ;
- Les études sur les évolutions en agriculture, en foresterie, en hydrographie et océanographie ;
- La conception et la gestion d'infrastructures géospatiales ;
- Les applications Internet en 3D pour la cartographie, les SIG et la visualisation ;
- L'étalonnage radiométrique et géométrique des capteurs ;
- Les évolutions en matière de géopositionnement instantané des images aériennes ;
- Les niveaux d'automatisation en cartographie à partir des capteurs actuels et futurs.

### Congrès d'Istanbul : 12-23 juillet 2004

#### ■ Sessions de formation continue

Six sessions de formation continue étaient proposées par les organisateurs les 12 et 13 juillet. Environ 170 participants du monde entier ont eu la chance d'assister à des présentations de haut niveau réalisées par les meilleurs experts dans les domaines suivants :

- Laser aéroporté et altimétrie : production de MNT et extraction automatique d'objets
- Cartographie et capacités des systèmes à haute résolution spatiale
- Géométrie projective et procédures d'orientation en photogrammétrie
- Performance des systèmes multispectraux et hyperspectraux d'observation terrestre à haute résolution
- Modélisation automatique en 3D à partir d'appareils photos portatifs
- Conception des bases de données pour les SIG en utilisant UML, les normes de la géomatique et les outils de modélisation visuels



## ■ ■ ■ ■ Résumés des exposés des sessions plénières

Il est impossible dans ce type d'article de revenir sur l'ensemble des sessions de ce congrès (le programme complet est accessible sur [www.isprs2004-istanbul.com](http://www.isprs2004-istanbul.com) ou [www.isprs.org](http://www.isprs.org) et les actes du congrès existent en version papier et numérique sur un DVD contenant 1.2 Go de données).

Je reviendrai dans ce paragraphe sur les trois sessions plénières des 15, 20 et 22 juillet.

Dans la première session, Armin Gruen (ETH Zurich) a présenté un exposé intitulé "De la cartographie en 2.5 D à la modélisation 3D; la photogrammétrie, une technologie en plein essor". Les nombreux projets traités par son Institut à Zurich ont fasciné l'auditoire. Ensuite, Martin Sweeting (Université de Surrey, Royaume Uni) a parlé des constellations de microsattellites permettant de revisiter rapidement la surface terrestre, et les domaines d'applications correspondant dont la surveillance des inondations, la détection et la surveillance des incendies, et la surveillance des cultures en agriculture. Jack Dangermond (ESRI) a terminé la session par une intéressante présentation des concepts, des applications et des technologies en SIG avec un exposé intitulé "Signification de la connaissance géographique pour les professionnels de l'information géographique".

La deuxième session plénière a débuté par un aperçu intéressant de Gerd Hirzinger (DLR, Allemagne) sur l'approche multisensorielle de la modélisation 3D de notre environnement avec des applications de robotique en médecine, de tourisme virtuel (avec une visite de la planète Mars), des modélisations photoréalistes en 3D en temps quasi-réel utilisant un robot avec un système de balayage laser associé à des images panoramiques d'Auckland. Ensuite, Peter Woodsford (EuroSDR) a évoqué l'augmentation des volumes de données atteignant les petaoctets et l'évolution vers l'interopérabilité des services Internet, en précisant que le partage des données numériques va se répandre de plus en plus au sein de chaque pays. Il s'en suivra un besoin d'ordinateurs puissants capables de traiter des services Internet basés sur les aspects sémantiques pour améliorer les infrastructures des données spatiales avec des fonctions de "recherche par concept" au lieu de "recherche par mot-clé".

Une importante condition pour un tel mécanisme de recherche sémantique est bien entendu l'existence de métadonnées avec des standards de syntaxes et de vocabulaire. Enfin, Ghassem Ansar (NASA, USA) a présenté des travaux de la NASA, dont la priorité est maintenant d'évoluer du processus vers la prédiction. Une solution de système intégré d'observation de la Terre et de modèles scientifiques de la Terre est actuellement utilisée pour la prédiction de phénomènes naturels et écologiques comme par exemples la détection d'incendies et leur surveillance, la prédiction de désastres naturels et écologiques, la température de surface, les conditions météorologiques et la gestion des ressources en eau.

La troisième et dernière session plénière a permis à Martien Molenaar, Recteur de l'ITC aux Pays-Bas (International Institute for Geoinformation Science and Earth Observation) de présenter les perspectives de renforcement des capacités de l'ITC dans le domaine de l'information géographique. Il a identifié deux types de problèmes nécessitant un renforcement des capacités:

- la génération d'une information pertinente, économique, opportune et fiable (en relation avec la technologie, les flux d'information et l'organisation des institutions);
- le rôle essentiel dans le développement des activités joué par les sciences de l'information géographique et d'observation de la Terre (transformation des processus, études de simulation, etc.).

Il a aussi abordé le nouveau rôle des cartes comme moteur de recherche dans l'infrastructure des données spatiales en tant qu'interface vers d'autres types d'informations. L'évolution du rôle des agences nationales de cartographie de producteur principal de données vers celui de coordonnateur d'activités a une influence sur les contenus d'enseignement (à l'ITC). Par conséquent, Prof. Molenaar a identifié des besoins de renforcement des capacités avec trois objectifs:

- le développement des besoins humains (formation d'experts techniques et professionnels);
- le renforcement de l'organisation (gestion du développement des capacités);
- le renforcement des institutions (capacité de développer et de négocier des contrats appropriés ainsi que le *modus operandi*).

Ces objectifs devraient viser trois principaux groupes de professionnels: les experts en matière de gestion de l'information géographique, les professionnels utilisateurs et les professionnels ayant un rôle politique chargés de faire prendre conscience de l'importance de l'information géographique à la société civile.

Dans le cas de l'ITC, les contenus d'enseignement ont été développés dans quatre directions: les domaines d'application, les aspects technologiques, la gestion de l'information, les aspects institutionnels et politiques. De 1950 à 2002, l'ITC a formé 15 500 personnes issues de 164 pays différents.

L'exploration de la planète Mars a fait l'objet des deux autres présentations de cette troisième session plénière. Dr. Steve Squyres (NASA, USA) a présenté de superbes images de la mission d'exploration de Mars avec un mobile itinérant (rover) montrant différents types de roches et de minéraux. Le capteur NAVCAM (Navigation Camera) était utilisé pour la trajectographie en temps réel du système d'exploration robotisé. Dr. Gerhard Neukum a également exposé les résultats préliminaires de l'expérience utilisant la caméra stéréo à haute résolution de l'ESA pendant la mission Mars Express. Dans cette mission, trois équipements sont embarqués:

- la caméra stéréo à haute résolution;
- un système de cartographie pour la minéralogie fonctionnant dans le visible et l'infrarouge;
- un altimètre radar.

42 scientifiques de 32 institutions provenant de 10 pays sont impliqués dans cette expérience. A l'issue de 598 orbites, plus de 18 millions de km<sup>2</sup> ont été cartographiés avec des tailles de pixels comprises entre 10 et 40m. Pour la première fois, toutes les images ont été enregistrées en haute résolution en stéréo et en couleur, la plus grande bande ayant 5000 par 300 000 pixels. Dr. Neukum a montré quelques cartographies de volcans (avec des cratères datant de 2 à 4 millions d'années), de glaciers, de MNT et des interactions de l'atmosphère sur Mars.

### ■ CATCON 3

Le troisième concours CATCON (Computer Aided Teaching CONtest) a été organisé le 21 Juillet par les responsables du groupe de travail VI.2 Mark Shortis (Australie) et Pierre Grussenmeyer (France). L'objectif est de récompenser les auteurs de logiciels d'enseignement assisté par ordinateur en prenant en compte les critères suivants :

- la facilité et la clarté d'utilisation
- la sophistication de l'outil
- la pertinence pour l'enseignement et la formation
- la gratuité de l'outil
- l'absence de restrictions informatiques



**Figure 1 :** Présentation des logiciels et discussions avec les candidats du CATCON.

Le jury a souligné l'excellent niveau des différentes présentations et a décidé de décerner :

- le premier prix (1000 \$) à Jonathan Haig (Univ. Hanovre, Allemagne) pour le module intitulé "Integrated Sensor Orientation", [www.ipi.uni-hannover.de/elan](http://www.ipi.uni-hannover.de/elan)
- le deuxième prix (700 \$) à Matthias Fluehler (ETH Zurich, Suisse) pour un logiciel intitulé "DIMOTEP : Educational Software System for the Digital Monoplotting", [fluehlma@student.ethz.ch](mailto:fluehlma@student.ethz.ch)
- le troisième prix (500 \$) à Shashikant Sharma (Bhaskaracharya Institute for Space Applications and Geo-informatics, Inde) pour un logiciel intitulé "PARAMITI - An image processing software", [www.bisag.gujarat.gov.in](http://www.bisag.gujarat.gov.in)

Un prix spécial a été attribué à la Société Intermap Technologies Corporation (Canada) pour un cours en ligne sur Internet intitulé "Digital Elevation Models from Interferometric Synthetic Aperture Radar", présenté par Lorraine Tighe, <http://www.intermaptechnologies.com/learning>

L'ensemble des outils présentés au CATCON en 1996, 2000, 2004 est présenté sur le site Internet de la Commission VI de l'ISPRS.

### ■ Enseignement à distance

En tant qu'enseignant-chercheur impliqué dans la formation initiale et continue d'ingénieurs, l'exposé de Dieter Fritsch "Apprendre en ligne dans l'enseignement supérieur" a retenu mon attention. Je précise que D. Fritsch est actuellement recteur de l'université de Stuttgart et bien connu par les photogramètres car son institut organise tous les deux ans la semaine de la photogrammétrie. Les objectifs de la solution d'enseignement en ligne basée sur les technologies les plus récentes sont :

- l'amélioration de l'enseignement et de l'apprentissage par des outils multimédias sur l'Internet ;
- la création de supports évolutifs au niveau de l'université (avec la possibilité de les mettre à disposition d'autres institutions en ayant pris en compte les questions de droits d'auteurs et de propriété intellectuelle) ;
- de satisfaire le savoir-faire technologique de nombreux professionnels en peu de temps.

Précisons que devant la diminution sensible du nombre d'étudiants dans les universités allemandes, il s'agit aussi de convaincre les étudiants d'entreprendre des études d'ingénieur en leur présentant des méthodes pédagogiques attractives.

Le programme de l'Université de Stuttgart (20000 étudiants dont 28 % d'étrangers !) comprend trois parties :

1. La phase 1, qui consiste à développer 1 000 cours en ligne accessibles au sein de l'université ;
2. La phase 2, qui comprend les modules d'auto-éducation avec comme objectif d'ici 2007 de rendre accessible 20 % des cours en dehors de l'université ;
3. La phase 3, qui consistera à développer un système complet de serveur de cours en lignes.

Actuellement l'université de Stuttgart a investi 3.5 millions d'euros dans ce projet. Une structure d'ingénieurs et de techniciens

■ ■ ■



■ ■ ■ à la disposition permanente des enseignants a permis de convaincre une majorité d'enseignants d'utiliser les nouvelles technologies pour la rédaction de leurs cours en leur mettant à disposition tous les moyens nécessaires. Cet élément est sans aucun doute décisif dans la mise en oeuvre d'un tel projet.

## ■ Exposition

L'exposition a réuni plus de 80 sociétés au cours de la 2<sup>e</sup> semaine du congrès. Les caméras numériques aériennes, à l'état de prototype au dernier congrès d'Amsterdam en 2000, sont désormais opérationnelles et plusieurs constructeurs ont annoncé des ventes de quelques dizaines d'unités. De nombreux résultats de tests réalisés avec des images numériques ont été présentés, issues de l'utilisation pratique de ces caméras. Parmi les sociétés présentes exposant des caméras, citons Intergraph (Z/I Imaging), Leica Geosystems (Suisse), Rollei Fototechnik GmbH (Allemagne), Dimac Systems (Luxembourg), Wehrli & Assoc. (USA). Le constructeur Vexcel (Autriche) distribuait un badge intitulé "Film is dead" pour marquer les esprits mais il semble que le film reste d'actualité en photogrammétrie aérienne et les émulsions continuent de faire l'objet de recherches. Ainsi Agfa Gevaert a présenté une nouvelle gamme de film couleur Aviphot Color X-400 spécialement adapté au scannage des photos aériennes réalisées dans des conditions lumineuses réduites, et le logiciel AperTune pour la retouche des images destinées à la génération d'orthophotos. Eastman Kodak présentait sa gamme de films et de systèmes de traitement.

Les distributeurs d'imagerie numérique étaient nombreux, citons ISTAR (France), SPOT Image, qui va également diffuser les données du satellite TerraSAR-X (premier satellite radar commercial à résolution métrique) de la Société Infoterra GmbH (filiale d'EADS Astrium) à partir de 2006, INTA SpaceTurk (Turquie), Orbimage (USA), Space Imaging Middle East (Dubai) et European Space Imaging (Allemagne), Euroimage (Italie), Digital Globe (USA), Radarsat International (Canada), Hitachi Satellite Imagery Division (Japon), Imint and Radar Division Elta Systems

(Israël), Itres Research (Canada), Nik Sistem (Turquie), ainsi que Vito et Alcatel Bell Space (Belgique) qui ont présenté le Projet Pegasus qui a retenu l'attention de nombreux visiteurs. Le drone de ce système (figure 3) peut voler à des altitudes comprises entre 14 et 20 km et enregistrer des images avec des résolutions spatiales de l'ordre de 15cm. Les images enregistrées sont envoyées à une station au sol qui rediffuse l'information vers l'utilisateur. L'autonomie peut atteindre 9 mois sans interruption du vol. Un véritable système à faible coût qui semble présenter de nombreuses applications pour la surveillance et la détection des changements !

Bien entendu de nombreux systèmes et logiciels pour la photogrammétrie numérique, le traitement d'images et les SIG étaient exposés. Citons BAE Systems qui fournit désormais les logiciels SOCET SET et VITec, Leica Geosystems (Suisse), Inpho GmbH (Allemagne), DVP-GS (Canada), DAT/EM International (USA), ESRI (USA), KLT Associates (USA), Immersion (USA), Pixoneers Geomatics (USA), Geoiconics (USA), PCI Geomatics (Canada), Phocad GmbH (Allemagne), Definiens Imaging (Allemagne), Racurs (Russie), Geosystem (Ukraine), Stora Enso (Finlande), TopoL Software (République Tchèque), et des sociétés chinoises Beijing Geo-Vision et Chinese Academy of Surveying and Mapping.

Les consultants et les sociétés de services: Intermap Technologies (Canada), Compagnia Generale Ripreseaeree spa (Italie), Esat View Cartographic (USA), Erdem Emi Mapping (Turquie), Geokosmos (Russie), Global Scan Technologies (Emirats Arabes Unis), Netcad (Turquie), et de nombreux entreprises allemandes MAPS Geosystems, GAF, DLR, Terra Digital GmbH, GGS, Hansa Luftbild German Air et IGI Surveys. Hewlett Packard (USA) a présenté ses systèmes dédiés à l'impression et au graphisme. Des systèmes terrestres à balayage laser étaient exposés chez Leica Geosystems (le nouveau scanner laser terrestre HDS4500 et les logiciels Cyclone 5.1 et Cloudworks 3.0) et Riegl Laser Measurement Systems présentait son système LMS- Z420i (figure 4).



Figure 2 : Exposition du XX<sup>e</sup> congrès de l'ISPRS



Figure 3 : Le système Pegasus

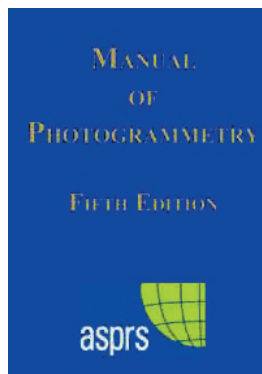


**Fig. 4. Le scanner Riegl LMS- Z420i sur un support original**

Parmi les sociétés qui exposaient des systèmes à balayage laser aéroporté, de positionnement et d'orientation, on peut mentionner Optech Inc. (Canada), Toposys (Allemagne), Datagrid (USA) et Applanix (Canada) une filiale de Trimble.

### ■ Nouveau manuel de photogrammétrie (5<sup>e</sup> édition) de l'ASPRS

A l'occasion de ce congrès, l'ASPRS (Société Américaine de Photogrammétrie et de Télédétection) a présenté la 5<sup>e</sup> édition de



**Figure 5 : Couverture de la 5<sup>e</sup> édition du Manuel de Photogrammétrie de l'ASPRS**

son manuel de photogrammétrie. L'éditeur est J. Chris McGlone, les éditeurs associés sont Edward M. Mikhail et James Bethel, et l'éditeur technique est Roy Mullen, tous connus pour avoir publié des ouvrages de photogrammétrie dans le passé. Cet imposant ouvrage de 1168 pages est vendu 125 \$ (ISBN 1-57083-071-1). Cette 5<sup>e</sup> édition constitue un guide pour la pratique de la photogrammétrie pour le début du 21<sup>e</sup> siècle avec l'intégration de nouveaux capteurs, techniques d'exploitation et produits. Le plan du livre se veut proche des nouvelles

tendances dans le domaine en insistant sur les méthodes et produits numériques. Quinze chapitres sont traités par différents auteurs :

- bref historique de la photogrammétrie ;
- concepts mathématiques en photogrammétrie ;
- les mathématiques de la photogrammétrie ;
- éléments d'optique pour la photogrammétrie ;
- traitement d'images numériques ;
- techniques de base de vision par ordinateur ;
- détecteurs et capteurs ;
- caméras et systèmes de détection ;
- plateformes de photogrammétrie ;
- équipement classique de photogrammétrie ;
- opérations de photogrammétrie analytique ;
- automatisation et stations de travail photogrammétriques ;
- produits de la photogrammétrie ;
- applications de la photogrammétrie ;
- planification de projets et de missions.

### Organisation de l'ISPRS

Dans la revue XYZ, nous n'avons pas l'habitude de présenter la Société Internationale de Photogrammétrie et de Télédétection, dont de nombreux domaines d'investigation sont pourtant proches des préoccupations de nos lecteurs. Le fonctionnement de l'ISPRS est basé sur des cycles de 4 années, marqué par un congrès réunissant l'ensemble des huit commissions. Pour la période 2004-2008, ces commissions techniques (CT) seront présidées comme suit :

- CT I (Alain Baudoin, France) : acquisition des images - Capteurs et plateformes
- CT II (Wolfgang Kainz, Autriche) : théories et concepts de traitement de l'information et des données spatio-temporelles
- CT III (Wolfgang Förstner, Allemagne) : vision par ordinateur en photogrammétrie et traitement d'images
- CT IV (Shailesh Nayak, Inde) : bases de données localisées et cartographie numérique
- CTV (Hans-Gerd Maas, Allemagne) : vision à courte distance - analyses et applications
- CTVI (Kohei Cho, Japon) : enseignement et assistance
- CTVII (John van Genderen, Pays-Bas) : traitements thématiques, modélisation, analyse des données en télédétection
- CTVIII (Ammatzia Peled, Israël) : applications et politiques de télédétection

On constatera que la CT I (présidée par la France) étudie plus particulièrement les questions d'acquisition des données, les CT III et CTV traitent de photogrammétrie, les CT II et CT IV sont impliquées dans la gestion des données spatiales, la CT VI s'intéressent à l'enseignement, la formation, la coopération et l'assistance, la CTVII et la nouvelle CTVIII sont plus proches de la télédétection.

En 2006, les pays hébergeant une commission organiseront un congrès spécifique aux problématiques étudiées. Les groupes de travail au sein des différentes commissions organisent en général des séminaires (workshop) ou des sessions à l'occasion de congrès régionaux d'autres organisations (comme la FIG par ex.)



■ ■ ■ Ces informations sont consultables sur le site Internet [www.isprs.org](http://www.isprs.org), dans le journal "Highlights" publié par l'ISPRS, ou encore dans le journal scientifique ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing.

En France, nos amis de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection (SFPT) publient la revue française de photogrammétrie et de télédétection.

## **Conseil de l'ISPRS pour la période 2004-2008 :**

**Président :** Prof. Ian J. Dowman (Grande-Bretagne)

Ian J. Dowman travaille depuis 1969 à l'University College de Londres où il occupe les fonctions de professeur depuis 1991 au département de Géomatique. Il est membre actif de l'ISPRS depuis 1984. Il a été l'éditeur du bulletin de l'ISPRS, puis président de groupes de travail. Au cours de la période 1996-2000 il a présidé la commission II, et occupé les fonctions de secrétaire général de 2000 à 2004.

**Secrétaire Général :** Prof. Orhan Altan (Turquie)

**Premier vice-président :** Prof. John C. Trinder (Australie)

**Second vice-président :** Prof. Emmanuel Baltsavias (Suisse)

**Trésorier :** Prof. Stanley A. Morain (USA)

**Président de la Commission des finances :** Prof. Petros Patias (Grèce)

## **Domaines de responsabilité des 8 commissions techniques :**

Les tâches des différentes commissions ont été rédigées en 2003, puis discutées par les membres de chaque commission technique et finalement validées par les participants des congrès. Ces termes de références permettront au lecteur intéressé par un sujet particulier de trouver auprès des commissions des interlocuteurs privilégiés.

### **Commission I : acquisition d'images, capteurs et plateformes**

- conception et exécution de missions aériennes et spatiales d'observation de la Terre ;
- conception, définition, construction, installation de capteurs imageurs et non-imageurs (incluant les systèmes optiques, IR, SAR, IFSAR, LIDAR, etc.) ;
- normalisation de définitions et des mesures de paramètres des capteurs ;
- intégration de systèmes imageurs et non-imageurs avec d'autres systèmes appropriés ;
- propriétés géométriques et radiométriques, normes de qualité, et facteurs influant la qualité des données ;
- tests, étalonnage et évaluation des capteurs (incluant les tests en laboratoire, en vol, sur zone témoin, et l'inter-étalonnage) ;
- guidage, navigation, positionnement et orientation intégrés des plateformes ;
- réception des données et pré-traitement ;
- pré-traitement embarqué des données et systèmes autonomes ;
- systèmes techniques pour l'enregistrement des données des capteurs, des données auxiliaires (heure, position, atti-

tude, etc.) et des scanneurs de films ;

- normalisation des transferts de données (image et non-image).

### **Commission II : théories et concepts de traitement de l'information et des données spatio-temporelles**

- principes de base de la conception des bases de données spatiales, des structures de données spatiales, de l'analyse spatiale et géostatistique, des requêtes spatiales, du raisonnement spatial, de la modélisation spatiale et temporelle ;
- agrégation, généralisation, abstraction et rendu des données image et vecteur ;
- systèmes spatiaux d'aide à la décision
- traitement, analyse et modélisation de données géospatiales multi-dimensionnelles ;
- intégration de systèmes et modélisation du traitement des données de l'information géographique ;
- interopérabilité de systèmes hétérogènes d'information spatiale ;
- intégration sémantique et géométrique de l'information spatiale hétérogène ;
- communication et visualisation des données spatiales ;
- exploration de données, filtrage, extraction et diffusion de données ;
- qualité des données spatiales et qualité des modèles

### **Commission III : vision par ordinateur en photogrammétrie et traitement d'images**

- algorithmes pour l'analyse géométrique des données-image indépendamment de l'échelle ;
- analyse géométrique des données IR, SAR, IFSAR et LIDAR ;
- techniques et méthodologies d'extraction automatique de caractéristiques et des attributs à partir d'images multi-capteurs, multi-résolutions, multi-spectrales et multi-temporelles ;
- recherche fondamentale portant sur la compréhension d'images pour la détection, la reconnaissance, l'identification et la reconstruction d'objets ;
- génération de modèle numérique d'altitude et intégration de concepts de modélisation tridimensionnels dans les processus de traitement d'images ;
- intégration de systèmes d'information spatiale et de modèles-objets pour la reconnaissance d'objets ;
- détermination de la position du capteur (incluant les données auxiliaires) ;
- géométrie projective et multi-vue ;
- analyse de séquences d'images ;
- algorithmes incluant les caractéristiques de l'objet dans le processus d'orientation ;
- propriétés spatiales, spectrales et temporelles d'objets naturels ou faits par l'homme.

### **Commission IV : bases de données localisées et cartographie numérique**

- développement, accès et gestion de bases de données spatio-temporelles ;
- infrastructures de données spatiales ;

- bases de données localisées basées sur l'image;
- bibliothèques de données, bureaux centralisant et hébergeant les données spatiales, répartition des archives et accès aux données à distance incluant les métadonnées et les normes sur les données numériques;
- accès par Internet, extraction et diffusion des données spatiales, incluant les services par Internet;
- intégration de systèmes d'information à référence spatiale et de traitement d'images pour la détection des changements, l'acquisition des données et la mise à jour déterminées à partir de bases de données;
- systèmes dynamiques d'information spatiale, correction et versionnage des données spatiales;
- interfaçage de modèles 3D avec des systèmes de gestion des installations;
- génération de base de données pour la cartographie numérique topographique et thématique (incluant les orthoimages et les MNT);
- modélisation et visualisation de paysages numériques, et modèles urbains à grande échelle;
- bases de données et cartographie globale environnementale;
- cartographie extra-terrestre et systèmes d'information à référence spatiale;
- analyse de systèmes et de leurs composants pour la cartographie automatique et semi-automatique et les systèmes d'information géographique;
- analyse des besoins de l'industrie, conception des systèmes de production, et mise à jour de l'information géographique.

#### **Commission V : vision à courte distance - analyses et applications**

- systèmes et algorithmes permettant l'imagerie en temps réel, la cartographie mobile et le traitement des données vidéo;
- technologie de la métrologie de la vision en photogrammétrie, en s'intéressant particulièrement aux CAD/CAM et aux systèmes d'information spatiale;
- intégration et fusion de données multi-capteurs permettant de progresser dans le domaine de l'extraction d'objets et la modélisation;
- balayage laser pour la représentation en 3D d'objets et de lieux;
- procédures d'analyse de séquences d'images en vision à courte distance
- techniques basées sur la vision pour les applications de visualisation, simulation, robotique et animation;
- systèmes de vision pour la métrologie et applications industrielles;
- techniques photogrammétriques en ingénierie biomédicale et étude des mouvements humains;
- techniques pour l'architecture, l'archéologie appliquées au patrimoine culturel.

#### **Commission VI : éducation et assistance**

- promotion de l'enseignement et de la formation, au niveau de base, supérieur ou professionnel;

- promotion des transferts de technologie, en tenant compte des besoins et des ressources au plan régional;
- développement de l'enseignement et de la formation assistés par ordinateur, et de l'enseignement à distance;
- nouvelles techniques pour la diffusion des informations sur Internet;
- promotion du forum des jeunes chercheurs et de nouvelles activités d'assistance;
- aide au conseil pour la promotion des activités de l'ISPRS dans les régions du monde;
- amélioration des contenus et des formats des publications et des sites Internet de l'ISPRS

#### **Commission VII : traitements thématiques, modélisation et analyse des données en télédétection**

- relations entre les propriétés spectrales, radiométriques et temporelles des objets, leurs propriétés physiques et chimiques et leur variation;
- classification des images et analyses méthodologiques;
- analyse des caractéristiques des données des images multi-spectrales, hyperspectrales, multi-capteurs, micro-ondes et multi-temporelles pour l'extraction d'information et d'attributs
- méthodologies d'interprétation assistée par ordinateur et analyse des données en télédétection;
- validation des données et de l'information en utilisant des méthodologies en laboratoire et in-situ;
- amélioration des modèles atmosphériques pour les corrections radiométriques;
- fusion de données multi-sources et techniques d'intégration;
- modélisation de paramètres provenant de données satellitaires;
- bases de données globales et détermination d'indicateurs de changement pour le suivi des modèles à l'échelle mondiale et le développement durable;
- intégration des techniques de télédétection et de SIG;
- détection et identification d'aérosols et de particules.

#### **Commission VIII: applications et politiques de télédétection**

- études et applications en foresterie, végétation, agriculture et bioénergie;
- applications en hydrologie, océanographie, ainsi que les applications côtières et celles concernant la neige et la glace;
- études et applications atmosphériques et météorologiques;
- études et applications géologiques, pédologiques et géomorphologiques;
- surveillance et gestion des ressources terrestres et en eau;
- analyses de l'utilisation du sol, des ressources ayant pâti de l'activité humaine et de l'écosystème;
- évaluation et réduction des dommages, gestion des catastrophes;
- évaluation des déchets dangereux et de la pollution de l'environnement;
- études et applications d'infrastructures et de transports;



- politiques en télédétection satellitaire et aérienne;
- stratégie et coopération avec des programmes internationaux sur l'environnement;
- activités d'observation de la Terre pour soutenir le développement durable.

**Note:** les expressions de ce paragraphe ont été traduites de l'anglais à partir des documents officiels de l'ISPRS. J'ai souhaité rester proche des textes originaux, au détriment de la fluidité de certaines expressions.

## Prochain congrès en 2008 à Beijing (Chine)

Pour le congrès de 2008, l'assemblée générale des délégués nationaux avait le choix entre deux candidatures, celles de Melbourne (Australie) présentée par le Prof. John Fryer et celle de Beijing (Chine) présentée par le Prof. Chen Jun. A l'issue d'un vote sans suspense, c'est la Chine qui a été retenue pour organiser le 21<sup>e</sup> congrès en juillet 2008 intitulé "Silk road for information from imagery", quelques semaines avant les jeux olympiques.

Le Prof. Chen Jun, futur directeur du congrès n'est pas inconnu en France puisqu'il a étudié la télédétection à l'IGN en 1981-1982. Il a été nommé professeur en 1992 à l'Université Technique de Wuhan, et a rejoint le Centre National de Géomatique en Chine, qu'il préside actuellement. A l'ISPRS, il a dirigé le groupe de travail WG IV.3 de 1996 à 2000 (sur les aspects temporels et la maintenance des bases de données topographiques), et a présidé la commission 2 (systèmes de traitement, d'analyse et de représentation) de 2000 à 2004. La délégation chinoise était représentée par environ 200 congressistes à Istanbul. Le site [www.isprs2008-beijing.com](http://www.isprs2008-beijing.com) permettra au lecteur de trouver toutes les informations sur la candidature chinoise.



**Figure 6 :** Prof. Chen Jun sera le directeur du congrès à Beijing en 2008

## Conclusion

On aura constaté à travers cet article que la Société Internationale de Photogrammétrie et de Télédétection cherche en permanence à adapter sa structure et ses thématiques de recherche aux besoins des utilisateurs. La photogrammétrie et la télédétection interviennent dans de nombreux domaines. L'exceptionnelle animation vidéo intitulée "Innovations in Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences" présentée à l'occasion de l'ouverture du congrès le 14 juillet par le Prof. Orhan Altan a confirmé que ces disciplines sont en plein essor. Voilà de quoi convaincre plus d'un étudiant à entreprendre des études scientifiques de photogrammétrie et de télédétection ! ●

## Bibliographie

**Altan, O. (Ed.), 2004.** International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, part B, volume XXXV, ISSN 1682-1777 (DVD).

**ISPRS Daily (n° 1 à 8),** publié quotidiennement au 20<sup>e</sup> congrès de l'ISPRS à Istanbul par GITC bv, The Netherlands.

**ISPRS silver book 2000-2004,** published by ISPRS headquarters, 116 p.

**McGlone, J. Chris, (Ed.), 2004.** Manual of photogrammetry (5th edition). Published by the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, ISBN 1-57083-071-1, 1151p.

## Contact

**Prof. Pierre GRUSSENMEYER**

Vice-président de l'AFT

INSA de Strasbourg, Département Génie Civil et Topographie  
Equipe PAGE (Photogrammétrie Architecturale et GÉomatique)  
UMR MAP 694 CNRS - Ministère de la Culture et de la Communication

24, Boulevard de la Victoire

F- 67084 STRASBOURG Cedex

Courriel: [Pierre.Grussenmeyer@insa-strasbourg.fr](mailto:Pierre.Grussenmeyer@insa-strasbourg.fr)

## ABSTRACT

*The changes in photogrammetry and remote sensing are continuous, closely related to the evolutions in computer science and digital imagery. Through the summaries of the strong points of the XXth congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, this paper presents the research topics and the developments considered as priority, as well as the working of this organization.*

# La DMC de Z/I Imaging : une conception innovante au service de la précision

■ Isabelle POUX et Dave DIONNE

*Fort d'une expérience de plus de 50 années dans le développement de caméras aériennes, Z/I Imaging a développé la caméra numérique DMC, Digital Mapping Camera, pour des missions de prise de vue aérienne exigeant une haute résolution et une grande précision et destinées à des applications diverses dans les domaines des SIG et de la télédétection. Elle est la première caméra aérienne grand format mettant en œuvre la technologie des capteurs CCD matriciels. Elle constitue une solution complète et modulaire pour l'acquisition des images aériennes à petite ou grande échelle.*

## Le système DMC

Le système proposé avec la caméra DMC comprend plusieurs éléments :

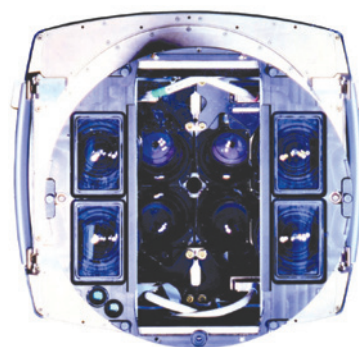
- La caméra DMC en elle-même, composée de :
  - 4 blocs caméras CCD matricielles, haute résolution, panchromatiques, 7000 x 4000,
  - 4 blocs caméras CCD matricielles, multi-spectrales, 3000 x 2000,
  - une unité électronique,
  - 3 enregistreurs des données des vols, avec une capacité de 280 Go d'espace disque chacun, soit un total de 840 Go pour le stockage des données des vols.
- Le système embarqué de gestion des capteurs (ASMS, Airbone Sensor Management System) qui inclut le logiciel de gestion du capteur, le module de contrôle de la DMC, une caméra vidéo, le système de navigation GPS et optionnellement le système inertielle (INS),
- Le système de stabilisation gyroscopique de la caméra,
- Le système de post-traitement au sol permettant de convertir les données acquises par la caméra DMC dans des formats exploitables par les solutions logicielles du marché,

- Le logiciel de planification des missions et de trajectographie (ISMP, ImageStation Mission Planning).

L'intégration de 8 caméras CCD matricielles dans un seul système apporte une solution au problème de la limitation de la taille des matrices CCD. En collaboration avec la société Carl Zeiss, Z/I Imaging a conçu pour la caméra DMC un objectif spécifique, caractérisé par sa faible distorsion, sa large ouverture, sa haute résolution et son homogénéité. Chacune des 8 caméras fonctionne en tant qu'unité autonome. Comme des objectifs distincts sont utilisés par chacun des 8 blocs caméras, l'image résultante offre des performances optiques supérieures à celles qui pourraient être atteintes par un objectif unique, d'un diamètre plus grand. Les 4 caméras centrales sont des caméras panchromatiques haute résolution, utilisant des matrices CCD 4000 x 7000. Lors du post-traitement des données, les 4 images panchromatiques sont mosaïquées en une seule image de 7 680 pixels sur 13 824 pixels. Pour l'acquisition d'images en vraies couleurs (rouge, vert, bleu) et en fausses couleurs (infrarouge), 4 bandes multi-spectrales sont incorporées à l'unité électronique de la caméra.

Les caméras sont montées dans un cadre rigide, conçu spécialement pour garantir un alignement parfait des axes de prise de vue de chaque caméra.

La technologie des capteurs CCD matriciels offre plusieurs avantages par rapport aux capteurs matriciels de petit format ou aux capteurs linéaires. En effet, l'un des paramètres les plus critiques pour l'utilisation d'images aériennes dans les applications de photogrammétrie numérique est la précision géométrique. De ce point de vue, un capteur CCD matriciel a un avantage sensible par rapport à un capteur CCD linéaire du fait de sa géométrie connue de manière précise dans les directions X et Y. D'autre part, un intérêt des capteurs CCD matriciels réside dans leur capacité à mettre en œuvre la technique de compensation



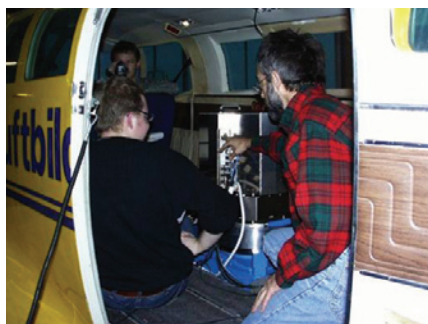


- ■ ■ électronique du type FMC (Forward Motion Compensation), destinée à éliminer le flou dans les images à grande échelle et utilisée par les systèmes de prise de vues aériennes à films.

Pour faciliter le remplacement dans l'avion d'une caméra par une autre, la caméra DMC et son système de stabilisation intégré s'ajustent dans le même espace que les chambres de prise de vues argentiques de Z/I Imaging, comme celles de la gamme RMK, ce qui évite en particulier de modifier les dimensions du trou pressurisé destiné à accueillir la caméra. De plus, toujours pour garantir une certaine flexibilité dans le passage au numérique, le système de gestion des capteurs aériens (ASMS, Airborne Sensor Management System) est également à même de gérer une caméra argentique.

Le système de stabilisation gyroscopique de la caméra permet de compenser le roulis, le tangage et le lacet de l'avion. Une technologie gyroscopique de pointe, des composants de contrôle actifs et l'amortissement des vibrations sont mis en œuvre pour stabiliser la caméra. Combinée à un alignement vertical optimisé, la stabilisation de la caméra contribue à l'amélioration de la qualité de l'image.

En mode couleurs 4 bandes, avec une profondeur de niveaux de gris de 12 bits



Système DMC en cours d'installation

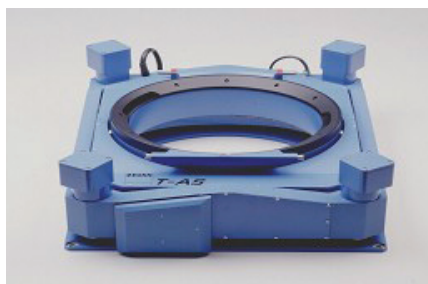


Plate-forme gyroscopique

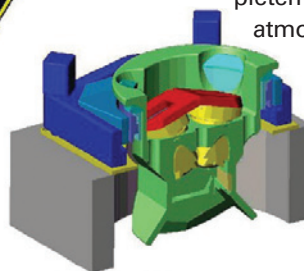
par pixel, le système génère environ 260 Mo de données images brutes par exposition. C'est pourquoi, un dispositif électronique spécifique, capable de gérer de tels flux de données a été mis au point. Il comprend entre autres 3 enregistreurs des données des vols amovibles, avec un espace disque de 280 Go chacun soit 840 Go au total, sur 3 canaux en parallèle. A pleine résolution (12 bits) et en mode couleurs 4 bandes, plus de 2000 clichés peuvent être stockés sur le système par mission. Des disques supplémentaires, dont le remplacement durant le vol est aisé, permettent d'étendre, autant que nécessaire, la capacité de stockage des données du vol.

La solution proposée avec la caméra DMC inclut également un système de post-traitement qui permet de convertir les données brutes en images. Il est composé d'un serveur avec racks permettant d'accueillir les disques des enregistreurs des données des vols amovibles, de deux disques RAID pour le stockage des données et d'un serveur multi-processeur offrant les meilleures performances en matière de post-traitement. Les données sont d'abord copiées de l'enregistreur des données des vols vers le disque RAID. Un traitement radiométrique et un traitement géométrique constituent le post-traitement. Les images ainsi traitées ainsi que les méta-données du vol sont stockées dans des formats standards et ouverts.

Elles sont alors disponibles, soit pour un transfert dans une solution de gestion et de distribution des images, soit pour une utilisation immédiate dans une chaîne de traitement photogram-



Système de stabilisation gyroscopique



métrique, de l'aérottriangulation à l'orthorectification en passant par la stéréorestitution et la génération des MNT.

## Les apports opérationnels de la caméra DMC

Dès le début du développement de la caméra DMC, un programme intensif de vols de test a été mis en œuvre pour éprouver la technologie et vérifier le concept. Les évaluations et les vols effectués par les utilisateurs de la DMC ont mis en évidence un certain nombre de bénéfices, parmi lesquels :

- **L'allongement de la durée quotidienne opérationnelle de vol :** la sensibilité radiométrique élevée et la profondeur 12 bits de la caméra DMC permettent de faire l'acquisition d'images de qualité dans des conditions d'éclairement bien moins favorables que celles nécessaires pour les vols utilisant des chambres de prises de vues à films. Selon la période dans l'année, les conditions d'éclairement et les conditions météorologiques, la durée de la journée de vol peut être prolongée d'au moins une heure en début en fin de vol.
- **L'allongement de la saison opérationnelle de vol :** la résolution radiométrique élevée de la DMC permet également d'effectuer des vols plus tôt et plus tard dans l'année, en comparaison des vols utilisant des chambres de prises de vues à films.
- **L'élargissement des conditions météorologiques acceptables :** la sensibilité de la caméra DMC à des niveaux d'éclairement très faibles permet de faire l'acquisition d'images dans des conditions météorologiques considérées mauvaises avec des systèmes traditionnels.
- **La réduction des effets atmosphériques :** à l'aide de l'étalonnage des couleurs, la DMC permet d'éliminer complètement les effets de brume atmosphérique légère. Pendant le post-traitement d'une mission de prise de vue caractérisée par de la brume légère connue, la première image est traitée et optimisée pour éliminer les effets dus à la brume

atmosphérique par un filtrage hautement performant. Ainsi, des images de haute qualité peuvent être acquises avec la DMC, même dans des conditions météorologiques très difficiles et/ou à de hautes échelles de vol.

- **La diminution du nombre de photos nécessaires:** la géométrie, la résolution et la dimension des images de la DMC permettent de voler à une altitude supérieure pour une résolution terrain équivalente, voire meilleure, de l'image, en comparaison des systèmes mettant en œuvre le scannage de films. Cela signifie que moins d'expositions sont nécessaires, ce qui diminue la durée des vols et en réduit les coûts.

- **L'élimination des traitements et des changements de films lors des vols:** un système DMC standard permet de stocker, sans changer de media durant le vol, autant de clichés que sur 4 ou 5 rouleaux de films.

- **Un meilleur balancement radiométrique global:** durant la génération des fichiers en sortie, les post-traitements comprennent une calibration radiométrique et une calibration géométrique avancées. Il en résulte que les images produites par la DMC sont extrêmement bien équilibrées au niveau des tonalités. Pour cette raison, elles sont bien adaptées au mosaïquage et à la production d'ortho-photos.

- **Une récupération et un post-traitement simples et rapides:** la calibration radiométrique prend environ une minute par cliché et la calibration géométrique de 2 à 3 minutes par cliché selon les options choisies.

- **L'import direct dans des applications de photogrammétrie:** les images en sortie du post-traitement sont immédiatement exploitables dans des applications de photogrammétrie, par exemple pour l'aérotiangulation.

- **De meilleurs résultats pour l'aérotiangulation automatique** (par corrélation), dus à la qualité radiométrique et géométrique des images.

- **Une meilleure perception de la profondeur de l'image** qui diminue les possibilités d'erreurs lors de la stéréo-restitution et facilite la photo-interprétation.

#### Caractéristiques de la caméra DMC

Configuration	14k x 8k, haute résolution, en panchromatique et multi-spectral
Champ angulaire (FOV)	42° le long de la trace x 69.3° en travers de la trace
Résolution panchromatique	7680 x 13824 pixels (image en sortie du post-traitement)
Résolution panchromatique de chaque caméra	7k x 4k pixels
Objectif	4: x f = 120mm/1:4.0
Mode multi-spectral	4 : RVB et proche infrarouge
Nombre de bandes	(autres disponibles sur demande)
Résolution multi-spectrale de chaque caméra	3k x 2k pixels
Résolution multi-spectrale	7680 x 13824 pixels (image en sortie du post-traitement)
Objectif	4: x f = 25mm/1:4.0
Capacité de stockage à bord	840 Go (plus de 2000 images)
Vitesse maximum par image	2s / image
Résolution radiométrique	12 bits (pour toutes les caméras)
Poids de la caméra	< 80 kg
Poids des enregistreurs de données	115 kg

- **Une chaîne de production 100 % numérique, de l'acquisition des données à la production des produits finaux:** le processus de production DMC permet d'augmenter la qualité des produits finaux, de réduire les sources d'erreurs, de simplifier la gestion des données et d'augmenter l'efficacité des processus de production d'un bout à l'autre de la chaîne.

A ce jour et depuis le début de sa commercialisation en août 2003, 14 caméras DMC ont été vendues de par le monde, en Europe, en Asie et aux Etats-Unis, dont la plupart sont déjà en service. Parmi les sociétés et organismes

qui ont choisi la caméra DMC, se trouvent le Swedish Governmental Organization Lantmäteriet en Suède, ILV en Allemagne, Asia Air Survey Co., Ltd. et Kokusai Kogyo Co., Ltd. au Japon, Beijing XingTian Di Information Technology Co., Ltd., en Chine, Photo Science Inc., Aero-Metric Inc. et 3001 Inc. aux USA (<http://imgs.intergraph.com/newsroom/pressrelease.asp>). ●

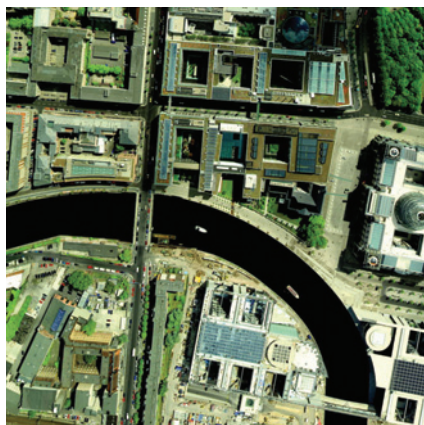


Image fournie gracieusement par la société Intergraph Corporation. Prise de vue réalisée par la société BSF Luftbild GmbH, en Allemagne.

#### ABSTRACT

*Z/I Imaging, with more than 50 years of experience with aerial camera systems, used this experience to develop a reliable and productive digital camera system, the Digital Mapping Camera (DMC) system. It is a turnkey digital aerial camera system designed to support aerial photogrammetric missions that demand high resolution and accuracy. The Digital Mapping Camera is the world first large format aerial mapping camera using frame sensor CCD technology. Designed from the ground up as a digital replacement for film-based photogrammetric mapping cameras, the DMC features breakthrough technologies that produce successful projects - from small-scale mapping operations to precision, high-resolution corridor engineering projects.*



changement de date  
des candidatures :  
1<sup>er</sup> octobre 2004

## Concours

# L'AFT organise un concours intitulé : **Prix de l'AFT 2004** pour les Jeunes Ingénieurs Diplômés en Topographie

*Le conseil de l'AFT de septembre 2001 a approuvé le projet de création d'un prix de l'AFT destiné aux jeunes ingénieurs diplômés en Topographie. Les étudiants des Ecoles d'Ingénieurs sont invités à soumettre au comité de rédaction de la revue XYZ un article portant sur leur travail de fin d'études d'ingénieur géomètre-topographe. Les meilleurs articles seront récompensés et publiés dans la revue XYZ. Un montant global de 1 500 € est prévu en 2004.*

### Conditions de participation :

- être âgé(e) de moins de 26 ans ;
- joindre l'attestation du diplôme d'ingénieur ;
- être membre de l'AFT (être à jour de cotisation) ;
- proposer au comité de rédaction de la revue XYZ un article de 6 pages au moins en français (avec un résumé en anglais), en vue d'une publication dans la revue avec une présentation de l'ingénieur (résumé du curriculum vitae) ; les consignes aux auteurs sont téléchargeables sur le site internet de l'AFT : <http://www.aftopo.org>
- certifier que l'article n'a pas été soumis ou publié dans une autre revue ;
- date limite pour la proposition des articles : le 1<sup>er</sup> octobre 2004 (pour les projets présentés dans les Ecoles en 2004 et avant).

### Comité d'attribution :

Le comité de rédaction de la revue XYZ, assisté du comité d'orientation scientifique, est chargé de désigner un comité d'attribution du Prix de l'AFT pour les Jeunes Ingénieurs Diplômés en Topographie. Ce comité pourra associer un représentant des Ecoles Françaises. La qualité du contenu scientifique et de la rédaction de l'article seront les critères essentiels retenus.

### Publication des résultats :

- les candidat(e)s seront informé(e)s individuellement des résultats au plus tard le 1<sup>er</sup> septembre 2005 ;
- les résultats du concours seront publiés dans la revue XYZ dans l'année suivant la publication des résultats ;
- le Président de l'AFT remettra les prix à l'occasion d'une manifestation organisée par l'AFT en 2005.



#### ASSOCIATION FRANCAISE DETOPOGRAPHIE

(association régie par la loi du 1<sup>er</sup> juillet 1901 - N° SIRET 31876201000029 - CCP 16300 03Y PARIS)  
Bureau : 2, avenue Pasteur - 94165 SAINT-MANDE Cedex - Tél. : 01 43 98 84 80 - Fax : 01 43 74 72 80  
E-mail : [info@aftopo.org](mailto:info@aftopo.org) - Internet : <http://www.aftopo.org>  
Secrétariat du lundi au vendredi de 9 heures à 17 heures

# Intégration de relevés topographiques et de mesures GPS en mode cinématique pour l'analyse des performances de cyclistes sur piste

■ Mathieu LAMBERT et Rock SANTERRE

*Habituellement, lors des entraînements sportifs traditionnels, on ne mesure que des temps de passage à certains endroits le long du parcours ne permettant que de calculer des vitesses moyennes. Les analyses subséquentes ne tiennent ni compte de la trajectoire réelle de l'athlète ni de la topographie du parcours. Il est donc impossible de localiser l'endroit exact où l'athlète a perdu de la vitesse et d'en expliquer rationnellement la cause. Avec l'avancement technologique dans le domaine du positionnement par satellites GPS, il existe des récepteurs permettant de déterminer des positions à une précision centimétrique à une cadence élevée (10 Hz ou mieux), et ce en temps réel. Dans cet article, les mesures de performances de cyclistes obtenues par méthodes GPS sont intégrées à des données physiologiques et à des images vidéo. De plus, le relevé topographique du vélodrome a permis de construire un modèle numérique de terrain (MNT) de celui-ci.*

Lors de courses sportives, le facteur déterminant d'une performance demeure, tout compte fait, la trajectoire empruntée par l'athlète sur son parcours et la vitesse à laquelle il s'est déplacé tout au long de cette trajectoire. Il existe peu d'outil permettant de mesurer la trajectoire et la vitesse d'un athlète avec une précision temporelle et spatiale suffisante afin de quantifier ses performances et de suivre son évolution avec l'entraînement.

L'avancement technologique dans le domaine du positionnement par satellites GPS (Global Positioning System) permet de suivre un mobile en mesurant sa position à intervalles de temps réguliers. La plupart des récepteurs géodésiques modernes permettent d'enregistrer les signaux des satellites à des intervalles de temps relativement courts (par ex. : 0,1 s, soit 10 Hz). À partir de ces informations, il est donc possible de représenter le déplacement d'un mobile de façon continue sur son parcours et de tracer, par exemple, des graphiques de position et de vitesse



**Figure 1 :** Relevé GPS-RTK du Vélodrome Louis-Garneau pour la construction d'un modèle numérique de terrain.

pour la durée de l'enregistrement. De plus, le relevé topographique du parcours ou de la piste permet de construire son modèle numérique de terrain (MNT). Cette information permet de déterminer ses particularités (ex: pente) et d'ainsi mieux analyser les changements de vitesse de l'athlète qui performe sur ce parcours.

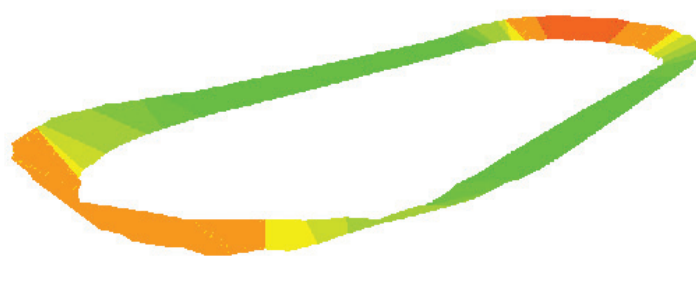
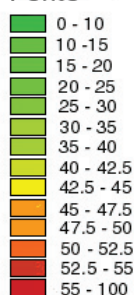
Le but du projet était de développer une méthodologie basée principalement sur des mesures GPS afin de permettre à l'entraîneur et à son athlète d'optimiser l'entraînement et d'en arriver à déterminer la meilleure stratégie de course.

## Méthodologie utilisée

### ■ Relevé topographique du vélodrome

Les tests GPS de cyclisme sur piste ont été effectués au Vélodrome Louis-Garneau situé en banlieue de Québec. La piste, de forme ovale, mesure 200 m de circonférence, avec des pentes pouvant aller jusqu'à 52° dans les courbes. Sur la piste, trois lignes de couleurs servent de guide. La position de ces lignes a été relevée ainsi que les limites de la piste: la côte d'azur (limite intérieure délimitée par une bande de couleur bleu

#### Pente



**Figure 2 : Vue en 3D du modèle numérique de terrain du Vélodrome Louis-Garneau.**

azur), la corde (ligne noire), la ligne des sprinters (ligne rouge), la ligne supérieure (ligne bleue) et la limite extérieure de la piste. Le tableau 1 présente les périmètres de ces lignes et limites tel que relevées par méthodes GPS-RTK.

**Tableau 1 : Périmètre des lignes et limites du vélodrome.**

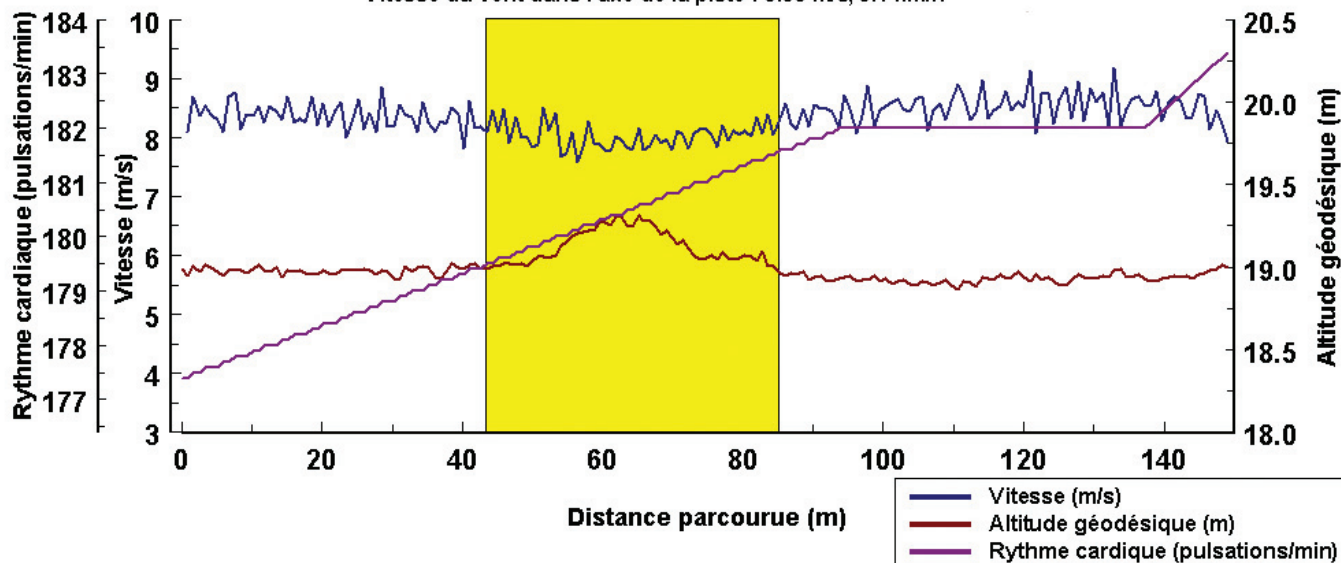
LIGNE	PÉRIMÈTRE (M)
Côte d'azur	199,11
Corde	200,16
Ligne des sprinters	203,23
Ligne supérieure	206,85
Limite extérieure	221,88

La prise de mesures pour la piste entière totalise 445 points. Comme la pente est très forte dans les courbes, une échelle a été utilisée pour atteindre les points de la ligne supérieure bleue et de la limite extérieure de la piste. La figure 1 illustre le relevé de la piste par méthode GPS-RTK.

La construction du modèle numérique de terrain a été effectuée avec le SIG ArcView. Un tel logiciel permet d'effectuer l'interpolation de surfaces 2D dans un environnement 3D, et de représenter la pente ou l'orientation de la surface en y associant un code de couleur. La figure 2 montre le résultat de l'interpolation avec un code de couleur pour la pente.

## Vitesse, altitude et du rythme cardiaque d'un cycliste en fonction de la distance

Vitesse du vent dans l'axe de la piste : 0.85 m/s, 3.1 km/h



**Figure 3 : Vitesse, altitude et rythme cardiaque d'un cycliste en fonction de la distance parcourue.**



## ■ Suivi de la position et de la vitesse de cyclistes

Les systèmes GPS-RTK conventionnels permettent de positionner en temps réel un mobile. L'information est accessible au mobile. Cette technique est largement utilisée, par exemple, pour les travaux d'implantation de routes. Lors d'un entraînement sportif, la position doit être fournie à l'endroit où se situe l'entraîneur, soit aux abords de la piste. La méthodologie utilisée dans ce projet, inverse les fonctionnalités d'un système GPS-RTK conventionnel. C'est donc l'athlète qui transporte le récepteur émetteur de corrections. Le récepteur recevant les corrections est installé sur le point géodésique de référence (où est localisé l'entraîneur) et effectue les calculs de positionnement. Le résultat du positionnement relatif étant les composantes spatiales du vecteur séparant les deux antennes, une translation du vecteur est effectuée pour retrouver les coordonnées vraies de l'athlète. Cette approche ainsi que ces limites sont décrites en détails dans [Lambert et Santerre, 2004].

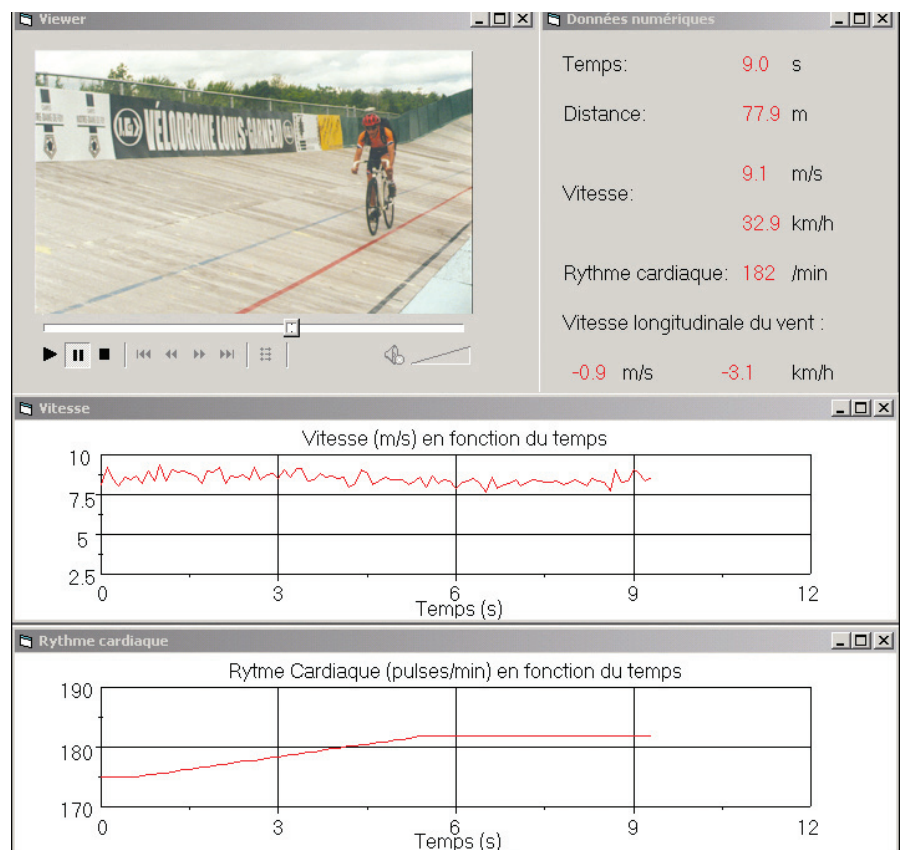
L'autre étape pour effectuer le suivi de l'athlète consistait à communiquer avec le récepteur GPS et d'afficher les données sur une interface prévue pour l'application graphique et SIG (Système d'Information Géographique). Les données sont par la suite archivées dans une structure de répertoire basée sur la date de l'entraînement. Ce logiciel dessine les courbes de vitesse et d'altitude sur des graphiques et envoie des commandes au SIG afin d'afficher la trajectoire sur le plan ou le modèle numérique de terrain du parcours [Lambert, 2002].

## Résultats

Les tests effectués dans le cadre de ce projet ont permis de visualiser les déplacements de l'athlète en temps réel et en post-traitement. Les données en temps réel sont visualisées sur l'écran d'un ordinateur portable et l'information est rafraîchie à toutes les secondes (1 Hz) durant l'exercice. Lorsque l'utilisateur arrête la collecte de données GPS, les positions sont directement



**Figure 4 :** Trajectoire d'un cycliste sur la vue en 3D du Vélodrome Louis-Garneau.



**Figure 5 :** Intégration des images vidéo et du rythme cardiaque aux données GPS.

introduites dans le SIG afin de pouvoir analyser la trajectoire sur le plan ou le MNT (Modèle Numérique de Terrain). De plus, les récepteurs GPS enregistraient les observations brutes à 10 Hz. Ces données à cadence plus élevée ont été utilisées en post-traitement.

Dans cet article, ce sont les résultats provenant du post-traitement à 10 Hz qui sont présentés. La figure 3 présente

un graphique de vitesse, d'altitude et de rythme cardiaque en fonction de la distance parcourue. La portion où l'athlète se trouvait dans la courbe Nord-Ouest est délimitée par la bande jaune.

Comme le montre le graphique, le cycliste perd de la vitesse et gagne de l'altitude dans la courbe. La vitesse du vent qui prévalait lors de la course y est aussi indiquée.

- ■ ■ Le logiciel SIG permet de superposer le tracé du cycliste, obtenu par méthode GPS, sur le modèle numérique de terrain (MNT). La figure 4 présente une vue en 3D du MNT de la piste et de la trajectoire du cycliste.

La figure 5 présente l'intégration, en post-traitement, des images vidéo et du rythme cardiaque de l'athlète aux données GPS. Cette intégration est fort utile lors des analyses subséquentes afin de bien décortiquer la dynamique de la course effectuée par l'athlète.

## Conclusion

La réalisation de ce projet a permis de démontrer la faisabilité d'un nouvel outil d'entraînement de cyclistes sur piste basé sur des relevés topographiques du vélodrome et des mesures GPS en mode cinématique. L'interface développée permet de comparer en détails les données en temps réel avec les courses archivées. L'intégration de données provenant de senseurs météorologiques et cardiaques et l'utilisation d'un SIG permet aussi de compléter, en post-traitement, l'information fournie par la technologie GPS tout en tenant compte de la topographie (pente) et des particularités du parcours. Ce nouvel outil d'entraînement permet de visualiser l'effet qu'engendre soit un changement dans la répartition de l'effort du cycliste, soit dans la trajectoire empruntée, ou dans l'équipement utilisé.

Le système GPS peut être utilisé dans tous les sports se pratiquant à l'extérieur où il n'y a pas trop d'obstructions. Les sports comme le ski alpin [Skaloud et al., 2001], la course de véhicules motorisés [Milnes et Ford, 2001], la course à pied [Miller et al., 2001], le patinage de vitesse [Maltais et Santerre, 1999], le canoë-kayak [Lambert et Santerre, 2004], le ski de fond, le cyclisme sur route et de montagne, et les courses de voilier sont d'autres disciplines qui se prêtent bien aux observations GPS.

La contribution de la technologie GPS permettra sans doute aux athlètes de haut niveau d'atteindre de nouveaux sommets. ●

## Références

**Lambert, M. (2002).** *"Utilisation du GPS pour l'analyse de performances sportives"*, Mémoire de maîtrise (M. Sc.), Département des Sciences Géomatiques, Université Laval, 144 p.

**Lambert, M. et R. Santerre (2004).** *"Speed Check: Performance Monitoring with RTK GPS"*, GPS World, 15 (2), pp. 20-26.

**Maltais, L. et R. Santerre (1999).** *"Suivi par satellites de la performance des patineurs de vitesse"*, Géomatique, Revue de l'Ordre des arpenteurs-géomètres du Québec, 26 (3), pp. 5-7.

**Miller C.C., M.M. Miller and J. Agnew (2001).** *"On Track for a Personal Best"*, GPS World 12 (3), pp. 38-42.

**Milnes, K. and T. Ford (2001).** *"Real-Time GPS FX"*, GPS World, 12 (9), pp.12-26.

**Skaloud, J., M. Gyr, Q. Ladetto, A. Marcacci, P. Lüthi, B. Merminod, M. Vetterli and Y. Schutz (2001).** *"Athletic Analysis with Racing Heart"*, GPS World, 12 (10), pp. 14-18.

## Auteurs

### Mathieu LAMBERT

détient un baccalauréat en géomatique (2000) et est titulaire d'une maîtrise en sciences géomatiques (2002) du Département des sciences géomatiques de l'Université Laval. Ses études graduées portaient sur l'utilisation du GPS pour l'analyse de performances sportives.

### Rock SANTERRE

est professeur titulaire de Géodésie et GPS au Département des sciences géomatiques et membre du Centre de Recherche en Géomatique (CRG) de l'Université Laval. Il détient un doctorat de l'Université du Nouveau-Brunswick (UNB) et cumule plus de 20 années d'expérience dans le domaine du GPS. Il est arpenteur-géomètre et ingénieur au Québec.

## ABSTRACT

*Usually, during traditional sport training one only records split times at certain points over a course which just allows to calculate average speeds. Subsequent analyses do not consider the real trajectory of the athlete and the topography of the course. It is therefore impossible to precisely locate where and/or when an athlete has lost speed. Advances in Global Positioning System (GPS) technology have led to receivers allowing for the calculation of positions, in real-time, with centimeter level accuracy at a high sampling rate (10 Hz or better). In this paper, the cyclists' performances as monitored by GPS are integrated with video images and heart beat recording. A GPS topographical survey has also allowed to construct a Digital Terrain Model (DTM) of the velodrome.*

# Navigation pédestre dans un environnement construit

■ Pierre-Yves GILLIÉRON et Dr. Quentin LADETTO

*Cet article présente le développement et l'implémentation d'algorithmes permettant l'accès à une base de données à partir d'un système de navigation pédestre.*

*La première étape décrit un modèle topologique 3D spécialement développé pour la localisation. Les éléments constitutifs d'un bâtiment, comme les corridors, les escaliers et les pièces, sont modélisés afin d'assurer une cohérence pour les besoins de la navigation. La construction du réseau s'appuie sur la théorie des graphes qui préconise l'usage de figures élémentaires : les arcs et les nœuds. Ce type de modèle a le grand avantage d'être adapté aux algorithmes de navigation qui demandent une prise de décision à chaque nœud.*

*La deuxième étape décrit les principes des algorithmes de map matching. Un système de navigation pédestre fournit la position de l'utilisateur qui doit être combinée avec le modèle arc/nœud de la base de données. Cette recherche sur la navigation à l'intérieur des bâtiments a permis l'évaluation d'algorithmes de navigation en post traitement. Plusieurs trajectoires ont été mesurées à l'intérieur des bâtiments, permettant l'analyse de performance du système.*

## Historique

Dès que l'homme a cherché à se déplacer dans la nature et à découvrir le monde, il a eu recours à des astuces pour se repérer et se localiser. Ce sont les premières formes de navigation où l'on cherche à décrire un lieu ou une route par rapport à des éléments marquants du paysage tels les rivières, les montagnes ou d'autres objets clairement identifiables. Lors de ses déplacements, l'homme a été préoccupé par l'estimation de son trajet et du temps de parcours, constamment améliorée au cours du temps selon l'évolution des instruments de mesure.

L'observation des astres s'est imposée lorsque les navigateurs ne disposaient plus de repères terrestres ou côtiers. C'est la navigation maritime qui a apporté les grandes innovations comme l'utilisation du compas magnétique pour mesurer l'azimut de la route et du sextant pour déterminer la hauteur d'un astre sur l'horizon.

C'est au début du 18<sup>e</sup> siècle que l'utilisation d'un chronomètre combiné aux autres instruments a permis une navigation plus précise. Le navigateur a eu la possibilité de "faire le point" en obtenant une position de latitude et de longitude.

L'avènement de l'aviation a été une étape marquante pour les innovations techniques des instruments de navigation. En effet les conditions de la navigation aérienne ne permettaient pas une simple transposition des instruments utilisés en mer. Ainsi il a fallu adapter le mécanisme du compas, créer un horizon artificiel pour le sextant, développer un baromètre pour la mesure de l'altitude et trouver une technique pour mesurer la vitesse de l'avion.

La prochaine grande étape est liée aux propriétés de la propagation des ondes radio qui sont utilisées comme moyen de localisation. Grâce aux stations émettrices au sol, le navigateur dans son avion peut mesurer des azimuts vers ces stations à l'aide de son récepteur radio. A partir de la 2<sup>e</sup> guerre mondiale, les progrès des instruments de navigation ont été fulgurants, on peut citer notamment le compas gyroscopique, le radar, et les systèmes de radionavigation tels le Decca et le Loran.

Dès les années cinquante, on assiste aux grands développements de l'industrie spatiale, dont la navigation va bénéficier par la mise en orbite des satellites des programmes TRANSIT puis GPS. Ces nouveaux instruments de navigation vont accroître la précision de la position absolue spatio-temporelle.

En résumé, on peut retenir de ce petit historique que les techniques de navigation s'appuient sur une grande quantité d'expériences et d'exigences, que se soit pour le domaine maritime ou aérien. Dès le début, on a cherché à combiner les méthodes et les instruments de façon à améliorer la précision et la sécurité, ce qui reste toujours une des préoccupations majeures de la navigation actuelle. Ainsi l'avènement de la navigation par satellite, malgré son attrait et sa couverture mondiale, ne va pas remplacer l'ensemble des techniques car les navigateurs auront toujours le souci d'assurer leur autonomie et leur sécurité.

C'est dans cet esprit que le Laboratoire de Topométrie de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne a entrepris depuis quelques années des recherches dans la navigation pédestre. Une collaboration avec la société Vectronix AG à Herrbrugg en



■ ■ ■ Suisse a permis le développement d'un système de navigation multi-capteurs pour les piétons. Cet article a pour but de présenter le concept et le développement d'un système de navigation autonome pour les piétons. La première partie de l'article décrit l'architecture multi-capteurs du système de navigation pédestre et la seconde partie présente l'interaction du système avec une base de données pour l'intérieur des bâtiments.

## Enjeux de la navigation pédestre

Vouloir connaître l'endroit où une personne se trouve peut relever de plusieurs critères allant de la simple curiosité à une nécessité vitale. Selon les exigences des utilisateurs, la qualité de la localisation jouera un rôle déterminant. De plus, le degré de dépendance d'une infrastructure et de moyens de communication est souvent un enjeu essentiel dans les applications exigeantes. Ainsi, la précision et la fiabilité de la position recherchée, les types de technologies et les coûts de l'information sont des variables indissociables d'un service de navigation [Gilliéron et Ladetto, 2002].

Ces aspects de qualité et de performance sont au cœur des défis de la navigation pédestre. Les enjeux liés à la miniaturisation des systèmes, à la qualité de la localisation ainsi qu'à la consommation électrique présentent en effet des problématiques différenciées selon les applications de la géomatique et de la navigation.

Prenant en considération les différents aspects cités, on comprendra que se déplacer à pied dans une ville peut paraître une opération banale lorsque l'on connaît bien les lieux et que l'on a développé ses propres repères. Lorsque le terrain est inconnu, l'opération se complique et il est nécessaire de recourir à des moyens auxiliaires et performants. Face à ces enjeux, la combinaison entre système de localisation et base de données est un élément clé dans le développement de services de qualité.

## Système de navigation pédestre autonome

### ■ Système multi-capteurs

Fruit de deux travaux de recherche [Ladetto, 2002; Gabaglio, 2002] et d'une étroite collaboration entre Vectronix AG et l'EPFL, le Pedestrian Navigation Module (PNM), dans sa version standard, conjugue un récepteur GPS, un compas magnétique, un gyroscope ainsi qu'un baromètre pour un poids actuel inférieur à 400 grammes (Fig. 2).

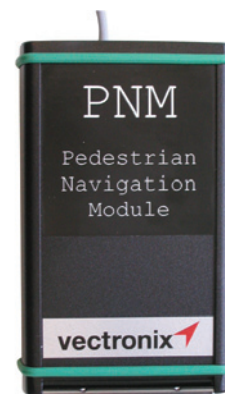


Figure 2 : Vue du système de navigation pédestre PNM 2004

*Le "Pedestrian Navigation Module" dans sa version 2004. Un condensé de capteurs dans un minimum de place pour un module permettant d'intensifs tests dans toutes sortes d'environnements. Cette version n'est que transitoire et son optimisation jointe à sa miniaturisation sont en cours.*

Légèrement plus volumineux qu'un téléphone mobile, il se place à la ceinture et fournit à l'utilisateur, pas après pas, ses coordonnées avec ou sans réception de signaux GPS. Délivrant l'information géographique dans un format standard (NMEA - National Marine Electronics Association) ou propriétaire, son interfaçage avec une grande majorité de logiciels de navigation commerciaux permet de bénéficier de toutes les fonctionnalités de ce dernier. Le principal avantage du PNM est son autonomie quasi totale par rapport aux signaux satellitaires.

### ■ Principes de fonctionnement

À l'instar des empreintes digitales, chaque personne a un profil de marche qui lui est propre. Ainsi, si le contenu fréquentiel varie autant, l'établissement de tout modèle général néces-



Figure 1 : Situations typiques de la navigation dans les bâtiments (portes, escaliers, structures métalliques)

sitera obligatoirement un processus de normalisation. Normalisation, parce que la fréquence de pas, lors de déplacement sans contraintes, est à peu près semblable pour tous les individus. Les paramètres seront ensuite automatiquement adaptés afin de décrire au mieux le style de marche de la personne. Les différences de vitesse pour une même fréquence sont donc une conséquence directe de la taille des pas. L'hypothèse que la taille des pas est proportionnelle à la taille de la personne ou, plus justement, à celle de ses jambes, est raisonnable.

En normalisant la vitesse de déplacement en fonction de ces paramètres, il est donc théoriquement possible de passer de modèles individuels à un modèle plus universel. Cependant, une personne marchant à une fréquence donnée n'effectue pas toutes ses enjambées de la même longueur. La variabilité des foulées en référence à une constante, chez une même personne et à une fréquence donnée, est de fait impossible à prédire. Le but ne sera donc pas de modéliser un événement "pas" de manière précise, mais de reproduire une distance parcourue, composée d'un ensemble de pas, le plus fidèlement possible.

Cette approche se base sur un principe pouvant s'énoncer de la manière suivante: *"Pour une fréquence de pas donnée, la taille des pas chez une même personne peut être considérée comme constante. La variation naturelle de ceux-ci suit une loi normale centrée à l'origine et dont la variance est inversement proportionnelle à la fréquence de marche"*. Cela signifie qu'à un pas plus long correspondra un pas plus court, ramenant ainsi la distance parcourue en un nombre déterminé de pas, pour une fréquence donnée, à une valeur considérée comme constante. Les écarts de longueurs entre deux pas successifs seront d'autant plus importants que la vitesse et la fréquence des pas seront lentes.

Le déplacement d'une personne peut être perçu comme similaire à une polygonale (ou cheminement) en topométrie. La distance entre deux points correspond à une enjambée, alors que l'angle permettant d'aller d'un point à l'autre est tout simplement l'azimut de déplacement.

Les perturbations magnétiques influençant grandement la qualité de l'azimut calculé avec le compas, une détection de celles-ci est nécessaire. On les identifie par l'utilisation d'un gyroscope. Ce dernier, basé sur un principe physique différent du compas, fournit un azimut fiable même en présence de perturbations magnétiques. Selon l'information et les données disponibles, divers traitements sont effectués. Les deux points de rattachement aux extrémités de la polygonale sont des positions géographiques connues ou obtenues par mesures GPS.

L'intégration de données GPS permet non seulement une localisation absolue de la personne mais également le calibrage des modèles physiologiques, ainsi que le défaut d'alignement du PNM avec l'axe de marche. Par contre, il n'est pas nécessaire de recourir aux signaux GPS pendant le parcours. En effet, une précision inférieure à 5 % de la distance parcourue (1 % - 2 % dans des cas favorables et pour une marche avant régulière) peut être obtenue en toute autonomie.

## Modèle de navigation

L'évolution des cartes digitales pour s'orienter dans une ville offre des produits qui répondent à une partie de la demande des utilisateurs. Le calcul d'un itinéraire, afin d'atteindre une adresse précise, est une prestation courante. L'avènement de l'informatique portable et communicante permet à l'utilisateur de consulter ce type de service durant son déplacement. Ces technologies ont permis aux opérateurs de téléphonie de développer des services géodépendants (Location Based Services) en combinant le profil de l'utilisateur avec l'offre se trouvant à proximité de sa position.

La multiplicité de ces services d'aide à la localisation va certainement profiter aux utilisateurs sans toutefois répondre complètement à certaines attentes comme la sécurité et la santé. La recherche d'un parcours évitant des carrefours dangereux ou certaines barrières architecturales est une préoccupation d'un nombre croissant de personnes. Néanmoins, plus la position de la personne est connue de manière précise et fiable, plus l'information transmise, continuellement mise à jour, devra s'approcher de la situation réelle.

### ■ Principes de navigation

La navigation est une technique qui s'est développée avant tout sur mer et dans les airs. En l'absence de routes visibles, il était primordial de déterminer correctement sa position, de la reporter sur une carte et de la comparer à un trajet désiré. Les navigateurs ont toujours eu un grand souci d'assurer leur autonomie grâce à leurs propres instruments et cartes. Ainsi, même si le développement de la radionavigation les rend dépendants d'une infrastructure, la nécessité de contrôler l'information avec d'autres moyens persiste pour des raisons de sécurité [Gilliéron et Merminod, 2003].

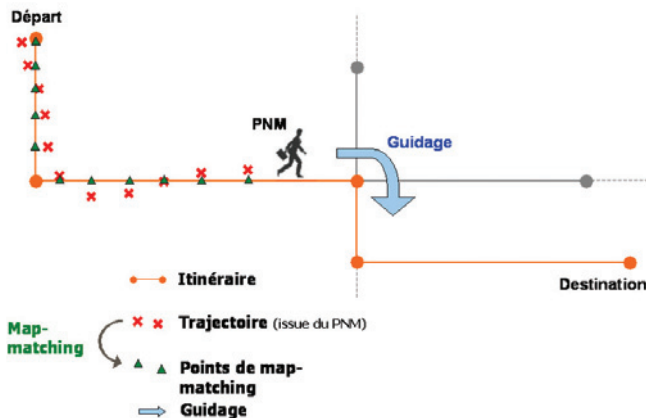
La navigation en environnement construit s'inscrit dans cette perspective de mise en application d'un concept de navigation pour les piétons où l'accent est mis sur une information de qualité et sur la sécurité de l'utilisateur. L'intégration d'un système de navigation pour piétons avec une base de données spécifiques est un objectif majeur de ce projet dont un des points forts est l'aide au déplacement de personnes handicapées.

Se déplacer dans un milieu urbain commence par la planification d'un trajet. Ce calcul d'itinéraire s'appuie sur le contenu de la base de données géographiques et sur les choix de l'utilisateur. Durant le trajet, le système de navigation fournit des positions qui sont comparées au contenu de la base de données et au parcours proposé. Le système peut alors régulièrement fournir des informations de guidage à l'utilisateur, plus particulièrement aux points de changement de direction (Fig. 3). La performance du système se mesure par sa capacité à fournir une information fiable et précise à l'utilisateur.

### ■ Modèle de donnée

La plupart des bases de données pour la maintenance des bâtiments s'appuie sur une représentation graphique en 2 dimensions provenant des plans de construction. Ces dessins sont composés des éléments géométriques comme le corps des bâtiments, les différentes pièces, les corridors, les escaliers et





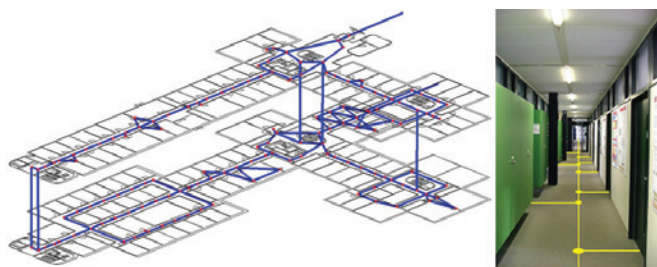
**Figure 3 : Principe de la navigation et du guidage**

- toute l'infrastructure technique. Tous ces objets sont représentés par des primitives géométriques comme la ligne, l'arc de cercle ou le spline.

Cette vision de l'environnement construit n'est pas adaptée aux besoins de la navigation. Les relations géométriques et topologiques entre les différentes parties d'un bâtiment doivent être connues. Ainsi une vue basée sur des éléments de type arcs et nœuds est indispensable pour le développement d'un réseau de navigation. La théorie des graphes définit un graphe  $G = [X, U, f]$  comme la combinaison de deux figures élémentaires, l'ensemble  $X$  des nœuds  $x$  et l'ensemble  $U$  des arcs  $u$ , ainsi qu'une fonction  $f$  définie sur  $U$ . Dans la représentation d'un graphe, on représente les nœuds comme des points et les arcs comme des arcs de courbes qui joignent les nœuds correspondants données par  $f$ . La navigation automobile a développé des modèles de données basés sur ce principe pour l'implémentation de fonction d'aide à la navigation et de guidage.

Le campus de l'EPFL offre un univers de constructions propice à la mise en œuvre d'un système de navigation pédestre associé à une base de données géographique. Cet ensemble de bâtiment a permis la réalisation d'un modèle basé sur la théorie des graphes. Chaque couloir est décrit par un ensemble d'arcs et les points principaux, comme les entrées et les portes, sont décrits par des nœuds (Fig. 4). Les connections entre les étages sont établies par des arcs verticaux modélisant les escaliers et les ascenseurs. Dans le but d'obtenir une représentation réaliste du campus, l'altitude des nœuds a été ajoutée aux coordonnées planimétriques.

La constitution de cette base de données repose sur la topologie du réseau de navigation, la localisation des nœuds dans un système de coordonnées nationales ainsi que la descrip-



**Figure 4 : Graphe arc/nœud pour le campus de l'EPFL et vue d'un couloir**

tion d'un certain nombre d'attributs spécifique au campus (droits d'accès, types de portes, types de locaux,...). Ce laboratoire géant a permis de construire une application de navigation mettant en jeu la plupart des scénarios que l'on peut rencontrer dans un environnement construit.

## Map Matching

Un système de navigation doit fournir des positions à chaque instant et quel que soit l'environnement. Le principe de la navigation à l'estime permet d'assurer une localisation continue, mais qui doit être remise à jour périodiquement à cause de l'imprécision des capteurs. Le système PNM utilisé à l'extérieur s'appuie sur quelques points GPS pour cette opération de mise à jour. Par contre en l'absence de signaux GPS, il faut envisager une alternative basée sur l'information contenue dans la base de données de navigation. L'association de la position fournie par le système de navigation au contenu de la carte de navigation est appelé map matching. Ce procédé consiste à projeter le point estimé sur un arc du graphe de navigation. C'est un atout indispensable à la réalisation d'un concept de navigation qui doit fournir à l'utilisateur une information fiable et sûre.

## Principes de base

On suppose que le système de navigation fournisse une position 2D ( $P_t$ ) avec une certaine précision. La méthode la plus simple consiste à projeter le point ( $P_t$ ) sur le nœud du réseau le plus proche. Pour cela, on considère la distance euclidienne entre deux points  $x = (x_1, \dots, x_n)$  et  $y = (y_1, \dots, y_n)$  avec la formule :

$$\sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + \dots + (x_n - y_n)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$$

Dans ce map matching point à point, on calcule la distance entre  $P_t$  et les nœuds candidats du réseau. On détermine ainsi le nœud le plus proche.

Une autre approche consiste à identifier l'arc le plus proche de  $P_t$  en cherchant la distance minimum entre le point considéré et les candidats arcs. L'équation suivante donne la distance d'un point à une ligne :

$$c = \sqrt{\frac{((y_1 - y_2)^2 x_p + (x_2 - x_1)^2 y_p + (x_1 y_2 - x_2 y_1))^2}{(y_1 - y_2)^2 + (x_2 - x_1)^2}}$$

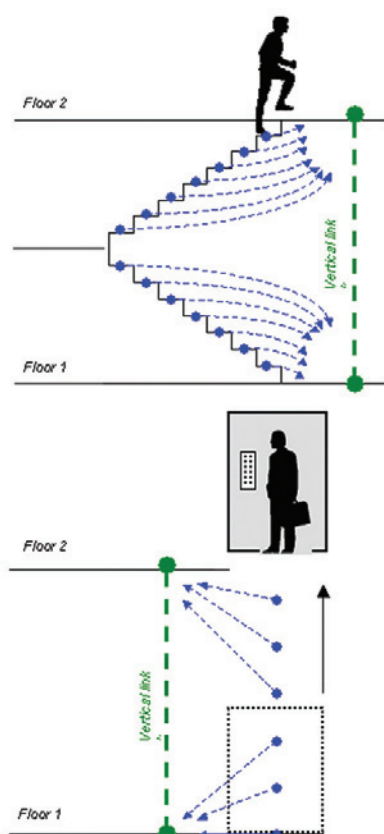
avec :  $c$  distance de  $P_t (x_p, y_p)$  à une ligne déterminée par deux nœuds (1 et 2) -  $P_t$  et les deux nœuds sont représentés avec leurs coordonnées.

Avec une séquence de positions fournies par le système de navigation, le processus de map matching peut les associer au réseau de navigation et identifier ainsi les arcs suivis par la personne. Afin d'estimer correctement la position sur le graphe, le processus de map matching tient compte d'un modèle stochastique basé sur le degré de proximité et sur la similarité de l'orientation de la trajectoire et de la portion de graphe. Ce procédé permet ainsi d'assurer la précision et la fiabilité de la position à l'intérieur des bâtiments.

## Mouvements verticaux

Le système de navigation fournit également une information altimétrique. Une partie de l'algorithme de map matching





**Figure 5 : Map matching lors de trajets verticaux.**

de trajets ont été parcourus par une personne équipée du système de navigation de Vectronix, le PNM. La personne s'est déplacée dans des couloirs, a pris des escaliers, l'ascenseur, est sortie et rentrée dans les bâtiments. La fréquence des mesures correspond à celle de la marche, soit une position fournie à chaque pas. L'ensemble du trajet parcouru à l'intérieur des bâtiments est couvert par le réseau de navigation décrit précédemment [Büchel, 2004].

Le principal objectif de ce test est l'évaluation des algorithmes de map matching basée sur des trajectoires réelles issues du système PNM en temps réel. Cette expérience était constituée des étapes suivantes :

- pratique de la navigation pédestre à l'intérieur des bâtiments
- récolte de données originales issues du système PNM
- analyse des trajectoires réelles et comparaison avec le contenu de la base de données
- détermination des paramètres de calibrage
- calcul des trajectoires avec les algorithmes de map matching
- évaluation de la performance du système de navigation dans des situations typiques

### ■ Mesures et calibrage

Durant les tests, le système PNM a enregistré les coordonnées de chaque pas fournissant une trajectoire comme une séquence de points 3D. Par contre, lorsque l'utilisateur s'arrête, la fréquence d'enregistrement est fixée à deux position par seconde. Cette information est utile lorsque la personne se trouve dans un ascenseur.

consiste à détecter les mouvements verticaux et à les associer aux arcs de connexion entre les étages d'un bâtiment. Dans ce cas, une analyse sur les position relatives fournies par le système de navigation fournit une information utile afin de détecter l'usage d'escaliers ou d'un ascenseur. La distance entre deux pas et la différence d'altitude sont des information typiques et faciles à détecter. Dans ces trajectoires verticales, le procédé de map matching consiste à projeter un ensemble de positions sur l'un des nœuds de l'arc vertical (Fig. 5).

### Tests sur le campus de l'EPFL

L'application développée sur le campus de l'EPFL a permis de réaliser des tests en grandeur nature avec des données réelles. Une série

En l'absence de signaux GPS, le début d'une trajectoire à l'intérieur d'un bâtiment correspond à un nœud de la base de données. Sur cette base le système PNM fournit une trajectoire qui doit encore préalablement être calibrée. En effet, il subsiste un défaut d'alignement des capteurs par rapport à la position du système sur la personne ainsi qu'un facteur d'échelle propre à la marche de l'utilisateur. A l'extérieur, ces paramètres sont automatiquement calibrés par les mesures GPS et à l'intérieur cette procédure s'appuiera sur la map matching.

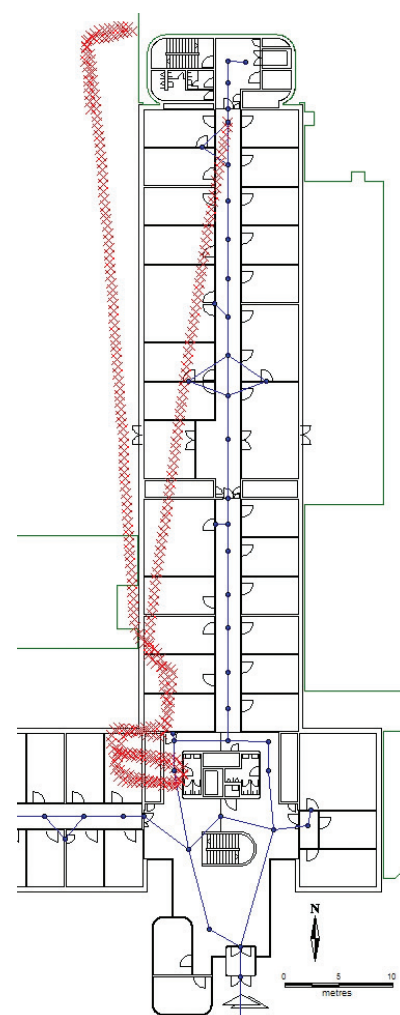
Dans ce test, le calibrage s'effectue par comparaison de la trajectoire d'origine avec le contenu de la base de données de navigation. On peut aisément identifier des points caractéristiques du réseau afin d'isoler une portion de trajectoire à calibrer (Fig. 6).

### ■ Analyse de performance

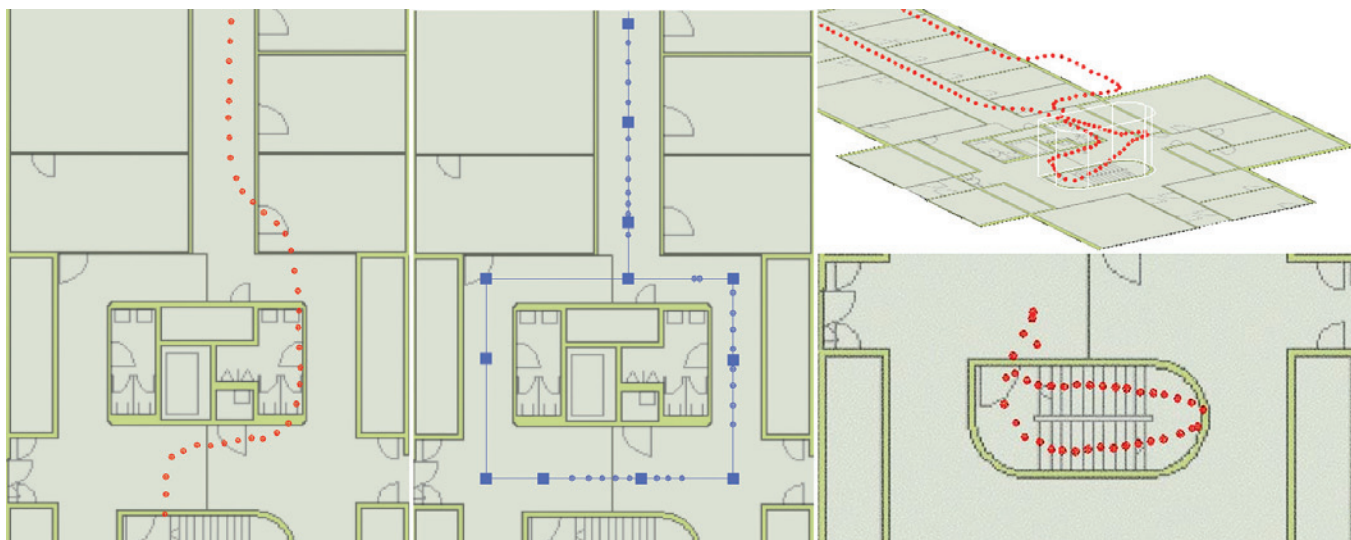
Une fois la trajectoire calibrée, les algorithmes de map matching sont exécutés en post traitement. A chaque position mesurée correspond une analyse de la distance parcourue, de la variation de l'orientation de la trajectoire et du changement d'altitude. Ces informations permettent une recherche efficace du lieu de projection sur le réseau de navigation. Lorsque la probabilité d'occurrence est suffisante, un point de map matching est associé à l'arc correspondant [Gilliéron et al., 2004].

Les figures suivantes illustrent le principe d'application du map matching dans des situations typiques de l'environnement construit. Sur la figure 7, les points rouges correspondent aux positions mesurées avec le PNM après calibrage. On constate que la précision est déjà suffisante pour une bonne localisation dans un bâtiment. Sur la figure 8 sont représentés les éléments du réseau de navigation (carré bleus) et les points de map matching issus du calcul (points bleus).

La figure 9 illustre le cas d'un changement d'étage par des escaliers. On constate que la trajectoire originale correspond bien à la position de l'escalier en plan et dans l'espace, montrant ainsi toutes l'importance d'un système de localisation 3D.



**Figure 6 : Trajectoire comportant un défaut d'alignement ainsi qu'un facteur d'échelle non compensés.**



**Figure 7 :** Extrait d'une trajectoire mesurée par le PNM

**Figure 8 :** Points de map matching sur le réseau de navigation

**Figure 9 :** Trajet original sur un escalier (vue perspective et vue en plan)

## Conclusions

Cet article a présenté les défis de la navigation pédestre en ville et dans un environnement construit en mettant l'accent sur l'interaction d'un système multi capteurs avec une base de données pour la navigation. C'est dans ce dialogue entre base de données et système que réside la fiabilité de l'information fournie à l'utilisateur exigeant.

Les tests réalisés sur le campus de l'EPFL ont démontré que le modèle de données basé sur la théorie des graphes et les algorithmes de map matching sont des composantes indispensables pour augmenter la fiabilité du système PNM à l'intérieur des bâtiments. Les résultats des essais sont très encourageants : la précision et la continuité sont assurées tout au long du trajet. La perspective de disposer d'un système de navigation performant couplé à une base de données spécifique ouvre un champ d'applications captivantes, traçant une vue futuriste du déplacement sécurisé et efficace des personnes dans une ville et à l'intérieur des bâtiments. ●

## BIBLIOGRAPHIE

- Büchel D. (2003)**, *Méthodes de guidage applicables au plan d'orientation de l'EPFL*, séminaire EPFL, Lausanne.
- Büchel D. (2004)**, *Développement d'une solution de navigation robuste pour l'environnement construit*, travail de diplôme EPFL, Lausanne.
- Gabaglio V. (2002)**, *INS/GPS Integration for Pedestrian Navigation*, travail de thèse, EPFL, Lausanne.
- Gilliéron P.-Y., Büchel D., Spassov I., Merminod B. (2004)**, *Indoor Navigation Performance Analysis*, ENC-GNSS 2004, Rotterdam
- Gilliéron P.-Y., Ladetto Q. (2002)**, *De l'évolution du GPS à la navigation pédestre*, Flash Informatique EPFL, Lausanne.
- Gilliéron P.-Y., Merminod B. (2003)**, *Personal Navigation System for Indoor Applications*, IAIN World Congress, Berlin 2003.

**Ladetto Q., Merminod B. (2002)**, *In Step with INS - Navigation for the Blind*, Tracking Emergency Crews, GPS World

**Ladetto Q. (2002)**, *Capteurs et algorithmes pour la localisation autonome en mode pédestre*, travail de thèse, EPFL, Lausanne.

## Contact

**Pierre-Yves GILLIÉRON**

Ivan Spassov  
Ecole polytechnique fédérale de Lausanne - Laboratoire de Topométrie  
1015 Lausanne, Suisse - <http://topo.epfl.ch>

**Dr. Quentin LADETTO**

Vectronix AG  
9435 Heerbrugg, Suisse - <http://www.vectronix.ch/>

## ABSTRACT

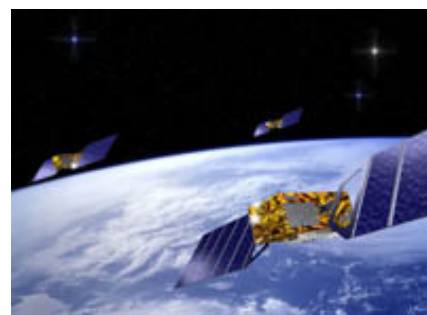
*In this paper, we present the development and the implementation of algorithms to access map databases by a user equipped with a pedestrian navigation system. The first step consists in building a 3D topological model specifically designed for the localisation process. Rooms, corridors, stairs and halls must be assembled in order to provide a model for route guidance. The link/node view of a network has a significant advantage in supporting navigation, since a path through a network is readily expressed as a series of decisions at nodes. The second step consists in the development of map matching routines. The pedestrian navigation system provides the user's position, which is combined with the link/node model. A dedicated map-matching algorithm processes the combination of the position data with the map database. The present development of an indoor navigation system allows the evaluation of navigation algorithms in a post-processing mode. Several indoor trajectories were performed to analyse the system.*

# Le système GALILEO, une technique d'avenir pour la géodésie spatiale de très haute exactitude

■ Florent DELEFLIE, François BARLIER, Pierre EXERTIER

*GALILEO est le programme européen de radio-positionnement par satellite. Il sera mis en place dès 2008 et sera complémentaire, tout en étant concurrent, aux systèmes américain GPS et russe GLONASS. L'ensemble des trois systèmes constituera le "Global Navigation Satellite System", système global et unique de navigation par satellite.*

*En doublant le nombre de satellites dédiés à la radionavigation, en améliorant l'exactitude et la précision des mesures, le système GALILEO va faire s'accroître considérablement le nombre des applications, notamment civiles, du système GPS existant. Parmi elles figurent également toutes les études de géodésie spatiale qui nécessitent le suivi continu du positionnement d'une balise placée au sol (immobile), ou dans l'espace (en mouvement). Grâce à l'association des différents systèmes de radionavigation par satellite aux autres techniques classiques ou émergentes de géodésie spatiale, il va être enfin possible de décrire le fonctionnement du système "Terre" dans son ensemble (terre solide, océans, glaces, atmosphère) de manière pérenne et continue, uniforme, globale et cohérente.*



(Doc ESA)

Figure 1 : Vue d'artiste de satellites de la constellation GALILEO.

## Les constellations GPS et GALILEO

La radionavigation par satellite repose sur une constellation de satellites artificiels en orbite autour de la Terre. Deux systèmes principaux sont actuellement opérationnels : le système américain GPS, et dans une moindre mesure le système russe GLONASS. L'arrivée programmée du système européen GALILEO va bouleverser le nombre et la diversité des applications civiles du positionnement par satellite, en se révélant à la fois concurrent mais surtout complémentaire aux systèmes déjà en place.

La constellation GPS est constituée de 27 satellites répartis sur 6 plans d'orbite différents (inclinaison moyenne de 55°), à laquelle viennent s'ajouter des satellites du système GLONASS (inclinaison moyenne de 64,8°). La constellation

Comme cela est écrit et répété dans le rapport GALILEO publié en 2003 par le Bureau des longitudes, l'Académie de marine, l'Académie nationale de l'air et de l'espace, la construction d'un repère spatio-temporel sur la Terre et dans son environnement n'est pas une entreprise occasionnelle. C'est une évolution majeure et irréversible du système technique sur lequel repose le fonctionnement de notre société, et des recherches sur la conquête spatiale et la compréhension de notre univers.

Dans une perspective historique, la construction d'un tel repère spatio-temporel est la solution ultime d'un problème auquel l'astronome et plus généralement l'homme est confronté depuis les origines de la civilisation : connaître dans l'espace et dans le temps sa position et celle des engins qu'il fabrique. La

navigation par satellite depuis l'espace est ainsi l'aboutissement d'un effort engagé depuis l'origine de la civilisation pour étudier la forme de la Terre, et pour définir des échelles de temps. Le développement des techniques qui structurent le mode contemporain, les transports et les télécommunications notamment, engendre une croissance explosive du besoin de la navigation par satellite, tant sur le plan de la recherche fondamentale que sur celui des applications.

Nous présentons ici les caractéristiques principales du programme GALILEO tout en montrant ses spécificités et surtout sa complémentarité par rapport aux systèmes existants. Plus particulièrement, nous mentionnons les applications scientifiques de ce programme, notamment en géodésie spatiale.



■ ■ ■ GALILEO sera, elle, constituée de 30 satellites répartis dans 3 plans d'orbite différents (inclinaison moyenne de  $56^\circ$ ). La définition des paramètres orbitaux d'une constellation comme celle sur laquelle repose le système GALILEO est donc le résultat de compromis nombreux et complexes liés d'une part à des exigences fonctionnelles (en particulier la couverture terrestre) et d'autre part à des contraintes liées aux coûts de lancement et de dépenses de la puissance électrique nécessaire à bord (plus le satellite est lointain, plus la puissance nécessaire pour émettre des signaux doit être grande).

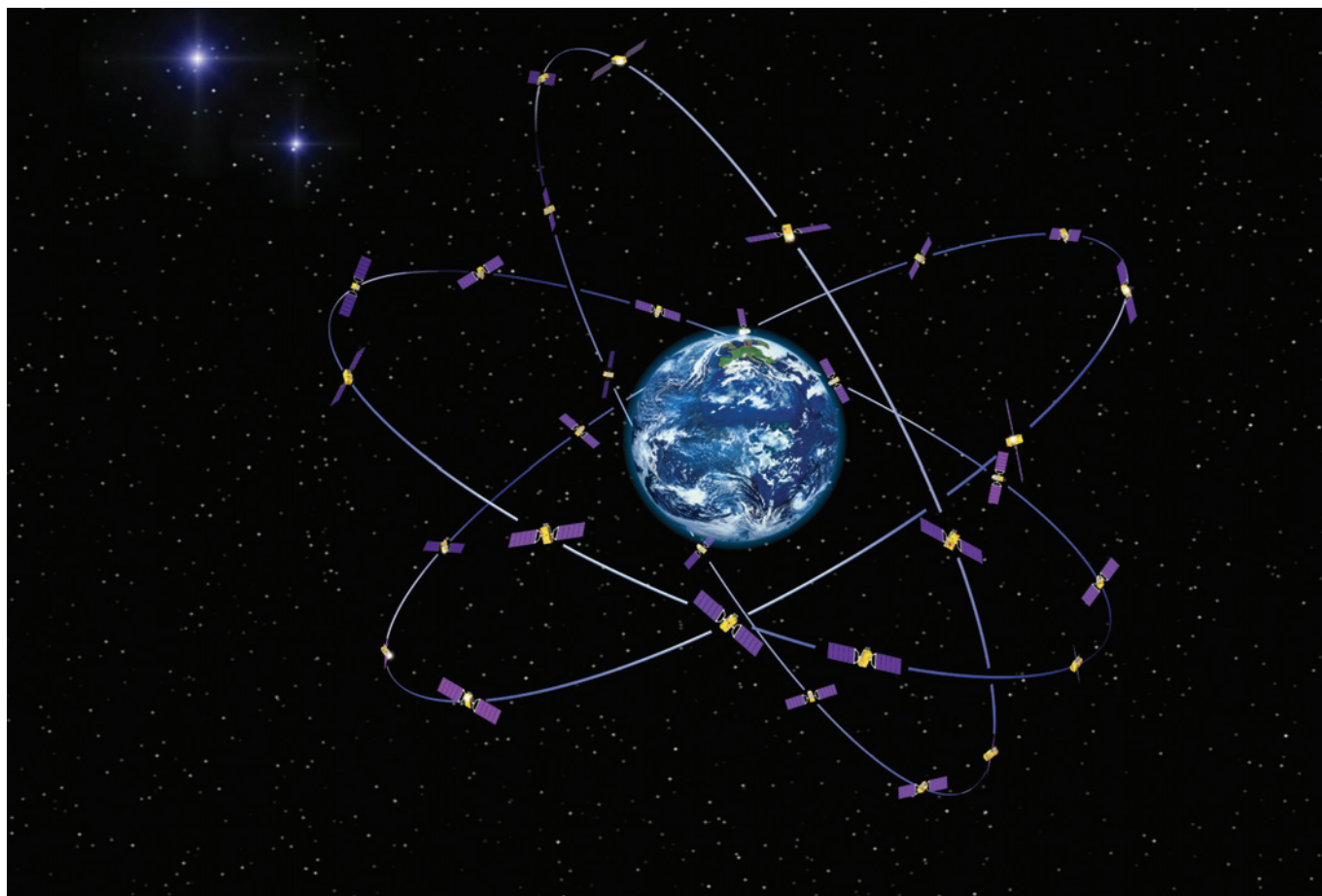
L'excentricité de l'orbite, par exemple, doit être très faible car une orbite quasi-circulaire est la mieux à même d'assurer l'obtention de résultats homogènes et également comparables en tout point de la Terre. L'inclinaison est un autre paramètre orbital de base. Il représente l'angle entre le plan de l'équateur terrestre et le plan de l'orbite; un satellite

d'inclinaison nulle a ainsi une trajectoire parallèle à l'équateur et ne peut convenir à l'observation des régions polaires. Les inclinaisons des plans d'orbite des constellations GPS et GALILEO ont ainsi été choisies de telle sorte que tous les points de la Terre puissent disposer dans leur ciel local (la portion du ciel qu'ils ont en visibilité) d'un nombre minimum de satellites de ces constellations, assurant ainsi une bonne géométrie de la configuration Terre-constellation satellites. On remarquera que les inclinaisons des constellations GPS et GALILEO, à couverture mondiale, sont relativement proches, alors que le système GLONASS a tendance à privilégier un peu plus les zones de hautes latitudes nord, en tant que système conçu à l'origine pour le positionnement dans l'ex-URSS.

Le troisième paramètre orbital fondamental est le demi-grand axe des satellites (pour des orbites circulaires: altitude des satellites augmentée du rayon

de la Terre). Plus un satellite est haut, plus il est visible d'une grande partie de la Terre. Par exemple et à titre de référence, un satellite de demi-grand axe 12 000 km (altitude de 5 600 km) est visible d'une zone de la Terre d'environ 6 000 kilomètres de rayon: il se situe à la verticale de Dakar quand il est très proche de l'horizon à Paris. Quant aux satellites des constellations GPS et GALILEO, ils sont situés bien plus hauts, respectivement à environ 20 000 et 24 000 km d'altitude. Notons qu'en conséquence, la couverture des régions polaires sera meilleure avec le système GALILEO qu'avec le système GPS.

Une altitude encore plus élevée assurerait certes une couverture dense de tous les points du globe avec relativement peu de satellites, mais nécessiterait à l'inverse des coûts de lancement plus élevés. Il faudrait en outre et surtout une dépense énergétique bien plus grande pour assurer la transmission



(Doc ESA)

**Figure 2 :** La constellation GALILEO comporte 30 satellites répartis dans 3 plans orbitaux de même inclinaison par rapport à l'équateur. Ces plans sont complètement orientés dans l'espace par la donnée d'un second angle appelé longitude du nœud ascendant.

jusqu'au sol des signaux radioélectriques émis par les satellites.

## Le positionnement par satellite

Les satellites de navigation émettent des signaux radioélectriques. Ce sont ces signaux qui sont captés par des récepteurs qui calculent ensuite la position où ils sont placés à un instant donné: les systèmes GPS et GALILEO sont dits "descendants" car c'est au sol qu'est effectivement réalisé le positionnement. Un des avantages majeurs d'un tel mode de fonctionnement est le nombre illimité de récepteurs potentiellement utilisables: de ce point de vue, les systèmes GPS et GALILEO ne peuvent jamais être saturés.

Le positionnement par satellite consiste à repérer la position d'un point situé à l'intérieur de l'espace délimité par les satellites formant la constellation. Ce point peut être situé à la surface de la terre solide (terres émergées), à la surface des océans, ou dans l'espace (jusqu'à quelques centaines ou milliers de kilomètres d'altitude).

Le récepteur reçoit essentiellement deux types d'informations en provenance d'un satellite donné: la position du satellite à la date d'émission du signal, ainsi que cette date. Connaissant la vitesse de propagation de l'onde<sup>1</sup>, le récepteur peut alors calculer la distance qui le sépare du satellite puisqu'il a

daté, grâce à son horloge interne, l'instant de réception du signal en provenance de ce satellite: le point que le récepteur cherche à positionner se situe alors à la surface de la sphère définie par tous les points situés à égale distance du satellite. De plus, si le récepteur peut capter simultanément les signaux émis par trois satellites différents, l'ambiguïté sur le positionnement peut être levée, le point à positionner étant alors situé à l'intersection de trois sphères distinctes.

D'un point de vue théorique, il faut donc que le récepteur puisse capter les signaux émis par trois satellites différents pour pouvoir calculer sa position: la répartition de tous les satellites de la constellation dans l'espace est organisée de telle sorte que ce soit toujours le cas. En pratique, il vaut même mieux que davantage de satellites (au moins quatre ou cinq) soient en visibilité d'un même récepteur, pour assurer une redondance des informations et donc une meilleure précision de la localisation<sup>2</sup>. Dans ce cas, en effet, le calcul est moins sensible aux éventuelles erreurs commises par l'ensemble du système (position des satellites, datation, ...).

On le voit de suite, la précision du positionnement dépend pour beaucoup de la synchronisation des horloges embarquées sur satellites mais aussi de celles disponibles sur les récepteurs. Une erreur de mesure de l'intervalle de temps qui sépare l'instant d'émission du signal émis par le satellite et l'instant de réception par le récepteur d'une picoseconde (10<sup>-12</sup> s) par exemple correspond, pour un signal qui se propage à la vitesse de la lumière, à une distance de 3 mm. Seules les horloges atomiques les plus précises, et donc aussi les plus onéreuses, peuvent atteindre une telle qualité de synchronisation et de précision. Puisque le point le plus critique est la synchronisation des horloges entre elles, la bonne méthode pour travailler consiste à faire capter les signaux émis non pas par au moins 3



Figure 4 : Une horloge à rubidium.

mais bien par au moins 4 satellites. Cela permet alors d'estimer avec grande précision la synchronisation de l'horloge du récepteur par rapport à l'ensemble de toutes les horloges en orbite.

## Un fonctionnement en temps réel, en mode absolu ou différentiel

Les modes de fonctionnement des systèmes GPS et GALILEO sont proches. Les performances sont également proches, même si celles de GALILEO sont annoncées meilleures que GPS. Aujourd'hui, un observateur au sol muni d'un récepteur GPS peut connaître en temps réel sa position (dans les trois dimensions d'espace), sa vitesse de déplacement et son heure locale avec une précision qui dépend très fortement de la qualité du récepteur et des conditions de son utilisation. Typiquement et de manière standard, la précision du positionnement peut être de niveau métrique et la synchronisation meilleure que la dizaine de nanosecondes.

Chaque satellite GPS est équipé de trois horloges atomiques au césium. Les premiers satellites GALILEO seront, eux, équipés de deux masers à hydrogène et de deux horloges à rubidium. L'Europe ne maîtrise malheureusement pas encore la technologie des horloges à césium embarquables à bord des satellites, horloges qui sont les horloges de référence pour construire l'échelle de base du Temps Atomique International. De gros efforts techniques sont encore nécessaires pour résoudre cet aspect du projet GALILEO qui apparaît comme étant pour l'instant un point critique.

Le principe que l'on vient de décrire est

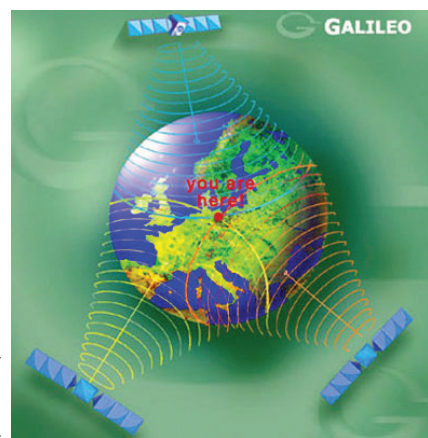


Figure 3 : Trois satellites sont nécessaires pour assurer le positionnement unique d'un point donné, abstraction faite des erreurs commises par les horloges.

- (1) la vitesse de la lumière.
- (2) et/ou pour pallier à des difficultés propres à l'environnement dans lequel est placé le récepteur, par exemple si, en milieu urbain, un immeuble se situe dans la direction récepteur-satellite.

■ ■ ■ un principe de positionnement absolu : la position du récepteur est calculée uniquement à partir des signaux émis par les satellites de la constellation. Aujourd'hui, les deux principales sources d'erreur du positionnement sont essentiellement liées à la qualité des éphémérides des satellites transmises en temps réel et à la modélisation non parfaite de la traversée des couches atmosphériques par les ondes radioélectriques qui ne se propagent pas en ligne droite et qui sont retardées : l'atmosphère, à la structure complexe, est à l'origine de biais en temps introduits dans les signaux captés par les récepteurs, biais qu'il est impossible de modéliser parfaitement.

Une des solutions consiste à répéter les messages sur plusieurs fréquences si l'on veut s'affranchir, au moins en partie, de ces distorsions. L'attribution des fréquences fait donc l'objet de négociations difficiles entre américains et européens, même si la coordination d'au moins cinq bandes de fréquences pour la radio-navigation spatiale en bande L (1,1-1,3 GHz et 1,5-1,6 GHz) est en très bonne voie. Les satellites GPS émettent en effet pour l'instant leurs signaux dans deux bandes différentes (1,2 et 1,5 GHz), et la nouvelle génération de

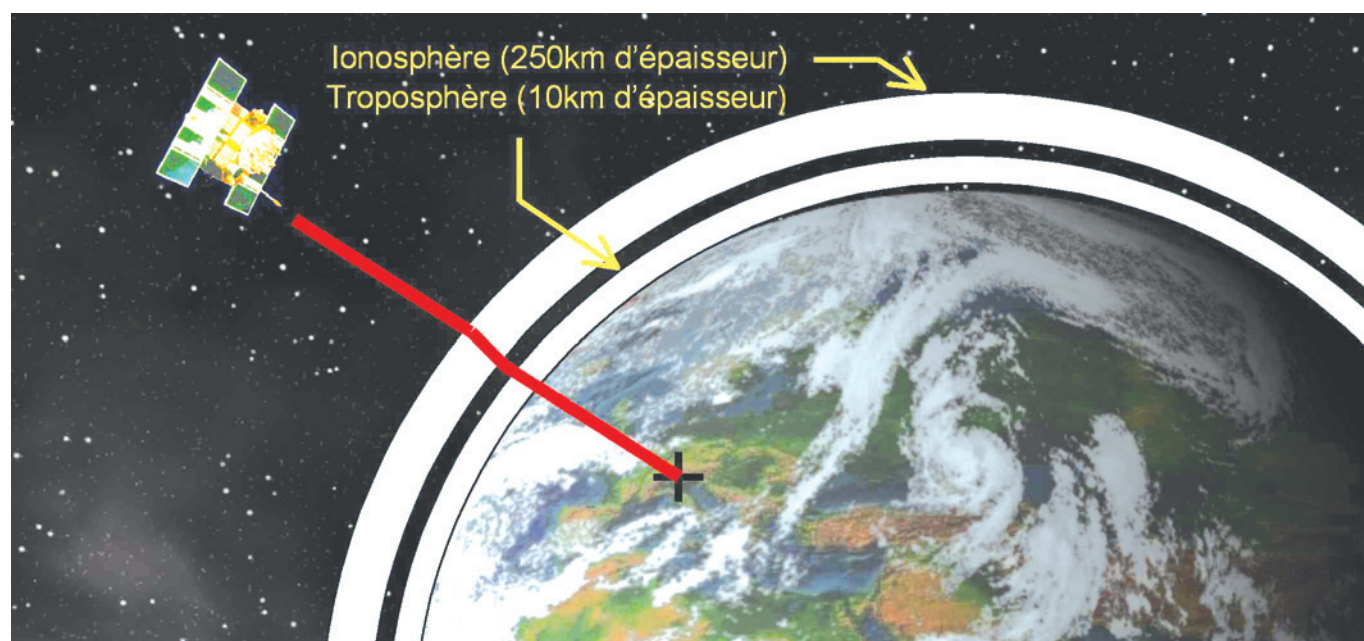
ces satellites, qui sera lancée à partir de 2005, émettra dans trois bandes de fréquences. Les satellites de la constellation GALILEO seront aussi tri-bandes ; les tous premiers devraient être lancés en 2005, en attendant le début opérationnel de la constellation des 30 satellites annoncé pour la fin 2008. Le système GPS étudie aussi des nouveaux satellites de troisième génération.

Il existe un autre mode de fonctionnement, qui consiste à repérer la position d'un récepteur par rapport à un point dont on connaît la position très exacte (par toutes sortes de moyens par exemple à partir de la technique laser ou par assimilation de données GPS sur des grandes périodes de temps) : c'est le positionnement différentiel. Le récepteur capte dans ce cas non seulement les signaux émis par les satellites de la constellation, mais également un signal spécifique émis par ce point de référence, qui diffuse l'écart (qui n'est pas nul puisque des sources d'erreur existent) entre sa position qu'il mesure en temps réel et sa position de référence. En pratique, il y a plusieurs façons de diffuser cette information, par exemple à l'aide de satellites géostationnaires ou par des émetteurs situés sur des phares, ou même par Internet. Ce sont des

récepteurs spécifiques qui doivent alors être utilisés, et qui trouvent des applications dans nombre de domaines, comme la navigation maritime à proximité des côtes : les marins ont été les premiers à utiliser de tels systèmes.

## Les mesures de phase et les services internationaux

La structure des signaux émis par les satellites contient en réalité un très grand nombre d'informations codées. En particulier, les ondes radioélectriques sont émises sous forme de sinusoïdes (appelées porteuses) caractérisées par des amplitudes et des phases. Le positionnement le plus précis, utilisé quasi-exclusivement à des fins scientifiques, est plus complexe que la "triangulation spatiale" (ou trilatération) que nous avons présentée : il s'appuie en fait sur la mesure des phases des porteuses, et peut atteindre la précision la plus ultime qui peut être de niveau millimétrique, dès lors que la longueur d'onde de la porteuse utilisée est de l'ordre de 20 centimètres, ce qui est le cas. L'importance de cette mesure est tellement grande dans toutes les applications les plus exigeantes en matière de précision qu'il faut en dire un mot et en



**Figure 5 :** La traversée de certaines zones de l'atmosphère terrestre perturbe la propagation rectiligne des ondes radioélectriques émises par les satellites, ce qui est source d'erreurs importantes si ces perturbations dans l'ionosphère puis la troposphère ne sont pas corrigées, au moins en partie. Il s'agit essentiellement d'un retard dans les temps de propagation.



donner le principe par ailleurs très simple.

La distance satellite-récepteur correspond à un nombre entier de longueurs d'onde de la porteuse, a priori inconnu, auquel il faut ajouter la distance correspondant à la mesure de phase proprement dite. En suivant la mesure de phase, on peut donc suivre les variations de distance satellite-récepteur avec une précision millimétrique, pourvu que la continuité de réception des signaux soit assurée. Cette information est suffisamment riche pour que l'analyse simultanée des mesures de phase sur plusieurs satellites, jointes le cas échéant à des mesures des signaux codés, permette de réaliser la détermination très précise des trajectoires. Cela est effectivement réalisé dans des centres internationaux comme le JPL (Jet Propulsion Laboratory) à Pasadena, Ca., ou au CODE (Center for Orbit Determination in Europe), à Berne.

Une description plus poussée de cette procédure sortirait du cadre de ce texte, mais il faut vraiment souligner l'efficacité avec laquelle les utilisateurs scientifiques de GPS ont su s'organiser pour échanger et combiner leurs données; cette coopération a été exemplaire et remarquable et a donné naissance à l'International GPS Service (IGS). Des centres de collectes des données ont été développés (citons celui de l'IGN en France) et coopèrent entre eux, notamment dans le cadre de l'IERS (International Earth Rotation Service) qui définit les protocoles d'utilisation, de combinaison et d'échange des données de géodésie spatiale.

Il est d'ores et déjà prévu que les données du futur système GALILEO soient utilisées et exploitées dans le cadre de ces services internationaux, constituant là une nouvelle pierre angulaire dans l'édification d'un système mondial unifié de navigation par satellite (projet GNSS: Global Navigation Satellite System).

## **GALILEO, un système civil et pérenne**

Une autre spécificité capitale du système GALILEO est son caractère civil. Le projet est né de la volonté d'indé-

pendance de l'Europe en matière de positionnement par satellite, face à l'actuel système GPS, pleinement opérationnel depuis 1992. Mais le système GPS est un système aux mains des militaires, même s'il est largement utilisé de par le monde à des fins civiles: en cas de grave crise internationale, la précision du système pourrait être grandement dégradée (par des techniques qui sont ici hors de propos), compromettant alors la plupart des applications, civiles ou scientifiques.

Le système GALILEO, à l'inverse, est un système civil. Même si les aspects de stratégie et de défense ne peuvent être ignorés, un tel fonctionnement doit par définition s'inscrire dans la durée et la continuité sans aucune interruption: le système GALILEO est un système pérenne, et toutes les applications peuvent dès leur conception être prévues sur le très long terme.

La gestion du système a été confiée à une structure européenne nouvelle et originale, la "Joint Undertaking", en charge de l'organisation du fonctionnement et du financement. Cette structure a été mise en place conjointement par l'Agence Spatiale Européenne et la Commission Européenne, qui ne regroupent pas forcément les mêmes états (la Suisse par exemple fait partie de l'ESA, mais pas de l'UE). Elle est destinée à mettre en œuvre et à gérer les différents aspects du programme GALILEO: aspects politiques, financiers, industriels.

Pour assurer le déploiement de la constellation, le financement est prévu dans la prochaine programmation du budget de l'Union. Il tiendra compte d'une contribution financière du secteur privé. Le budget total des phases de développement et déploiement est estimé à 3,3 milliards d'euros. Pour l'instant, seuls 4 des 30 satellites sont financés (développement, construction et lancement pour 1,1 milliard d'euros, ainsi qu'une partie du segment sol). Pour le déploiement complet de la constellation, 2,2 milliards d'euros sont donc encore à trouver notamment dans le secteur privé. Mais tout est en train d'évoluer positivement très vite dans ce domaine.

## **Les applications civiles**

## **de GALILEO**

Le secteur privé devrait générer avec GALILEO un chiffre d'affaires très important, en proposant des applications nouvelles, dont certaines payantes. En particulier, on doit citer celles qui sont fondées sur des synergies des systèmes de positionnement, navigation et télécommunications, qui devraient jouer un rôle très important dans des domaines aussi variés que, pour reprendre la liste dressée sur le site Web de l'ESA: transports, énergie, personnes handicapées, routes, télécommunications, protection civile, rail, finance, assurance, référence de temps, aviation, construction et travaux publics, science, transport en commun, agriculture, loisirs, transports maritimes, pêche, sécurité, environnement, projets pilotes, ... De la même manière que personne ne peut désormais plus se passer de connaître l'heure, personne ne pourra bientôt plus se passer de savoir la position exacte de l'endroit où il se trouve, grâce par exemple au moyen de récepteurs intégrés aux téléphones portables. Ceci n'est d'ailleurs pas sans poser un certain nombre de questions, parmi lesquelles certaines d'ordre philosophique notamment sur le respect des libertés individuelles, mais il s'agit là d'un tout autre débat.

Notons maintenant que la distinction entre les deux notions que sont la précision et l'exactitude est extrêmement importante en métrologie, puisque l'on peut très bien positionner un point avec une précision optimale tout en commettant des erreurs systématiques très grandes. Avec le fonctionnement en mode différentiel, l'exactitude peut être améliorée de plus d'un ordre de grandeur par rapport au mode absolu.

Citons ici un des exemples qui illustrent la nécessité impérieuse de doubler le système GPS. C'est de ce point de vue que GPS et GALILEO sont indissociables et complémentaires. Dans ce cadre, les futurs récepteurs intégreront les signaux émis par chacun des deux systèmes GPS et Galileo, assurant dans le même temps une meilleure exactitude des positions, en particulier sur la composante verticale (l'altitude). Dans le transport aérien par exemple, l'intégrité du seul système GPS n'est pas suf-

■ ■ ■ fisamment sûre pour faire atterrir les avions en mode complètement automatique. À l'heure actuelle, les avions, munis uniquement du système GPS, ne peuvent pas détecter assez rapidement des erreurs systématiques toujours possibles de quelques mètres. Pour promouvoir la navigation aérienne avec ces systèmes satellite, en particulier pour s'affranchir définitivement des aléas météorologiques, le système doit être sûr à 100 %. Avec GALILEO, i.e. avec au moins deux systèmes satellites indépendants, c'est un objectif réalisable à l'échelle de quelques dizaines d'années, voire moins.

## Les applications scientifiques de GALILEO

Les applications scientifiques de GALILEO sont elles aussi légions comme c'est déjà le cas avec GPS. Au-delà de toutes les possibilités liées à la connaissance des positions de récepteurs, qui peuvent être variables dans le temps (déplacements d'animaux par exemple), les applications de GALILEO en géodésie spatiale, et plus largement en astronomie fondamentale, sont regroupées en quelques grandes catégories: la construction de systèmes de référence d'espace dans l'environnement terrestre, l'exploitation de la quatrième dimension (le temps) pour la construction et l'exploitation d'échelles de temps internationales, l'étude des déformations de la Terre à des échelles locales et régionales, l'étude de l'atmosphère, et l'orbitographie de satellites de basses altitudes, particulièrement importante pour certaines applications en Sciences de la Terre.

Pour chacune de ces catégories, ce n'est plus un positionnement en temps réel qui est utilisé, mais un positionnement basé sur l'assimilation d'un grand nombre de mesures quasi-simultanées. Une telle approche permet d'accroître encore la précision et l'exactitude: dans beaucoup de cas, elles augmentent avec la racine carrée du nombre de mesures, pourvu que la position puisse être considérée fixe dans un intervalle de temps donné.

Un dénominateur commun à ces applications scientifiques est l'étude spécifique des interactions à développer entre



**Figure 6 : Toute une gamme de récepteurs pour toute une gamme d'applications.**

les différentes techniques de géodésie spatiale, en particulier avec le système GPS et la télémétrie laser, voire le système DORIS, évoqué ci-après. Non seulement cela permettra à chaque technique de recentrer ses efforts sur ses domaines d'excellence, mais surtout, la redondance des systèmes assurera une bien plus grande exactitude des calculs menés dans les différents thèmes de la géodésie spatiale, et donc une bien plus grande fiabilité. Pour l'instant, les possibilités d'étalonnage de l'ensemble des techniques sont réduites, ce qui laisse les scientifiques à la merci de certaines erreurs systématiques. Comme nous l'avons indiqué plus haut, une grande précision ne suffit plus en géodésie spatiale, il faut aussi une plus grande exactitude pour rendre compte dans les différents produits (champ de gravité, repères de référence, ...) de la qualité des mesures désormais prodigieuse.

En résumé, tout ce qui se fait aujourd'hui avec GPS sera désormais fait dans la nouvelle synergie GPS/GALILEO, mais en mieux, plus rapidement, avec une garantie supérieure de qualité et de pérennité et avec des nouveaux services et des nouvelles possibilités. Il faut également noter la force du mode différentiel qui se développera pour certaines applications ultra précises de positionnement en temps réel, comme la topographie des océans, les mouvements d'origine sismique ou volcanique.

On peut distinguer deux grandes catégories d'applications scientifiques: d'une part celles fondées sur des récep-

teurs fixés au sol, d'autre part celles fondées sur des récepteurs embarqués à bord de satellites bas.

## Utiliser GALILEO pour le positionnement

Les récepteurs placés au sol de manière permanente sont en général fixés sur des piliers de béton. Ils assurent le suivi des variations temporelles de la position de leurs points de rattachement.

Divers phénomènes, caractérisés par des périodes qui leur sont propres, sont à l'origine de ces variations: le spectre des périodes ou des fréquences est très large. À l'échelle de quelques heures, on retrouve les phénomènes d'origine atmosphérique (variations de pression), qui modifient la composante verticale du positionnement de quelques millimètres. À l'échelle de la journée, ce sont les marées terrestres, d'une amplitude de quelques dizaines de centimètres dans les séries de positionnement. À l'échelle de quelques mois voire de quelques années, ce sont les phénomènes d'origine tectonique qui sont mis en évidence, pouvant atteindre dans des cas extrêmes le décimètre: le déplacement des plaques tectoniques se traduit par des variations séculaires de la latitude et longitude, les séismes se traduisant par des ruptures de la continuité de ces séries.

Les récepteurs fixés au sol sont organisés en véritables réseaux, lorsqu'ils sont suffisamment nombreux et répartis de manière homogène dans une région du globe donnée. En France par



**Figure 7 : Le récepteur GPS permanent de l'Observatoire de la Côte d'Azur, sur le plateau de Calern (France).**

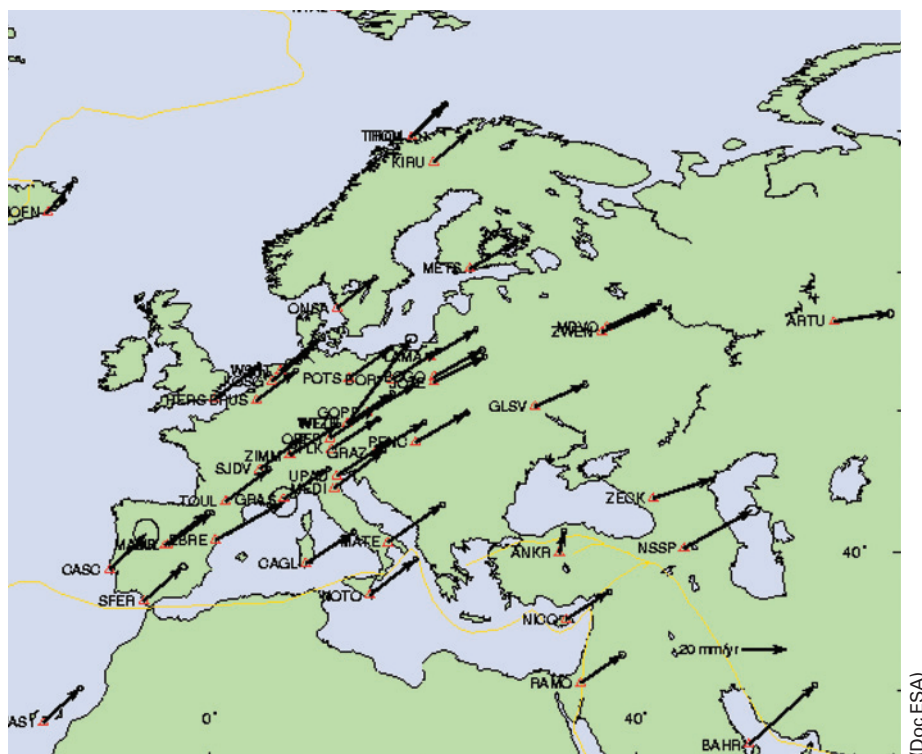
exemple, quelques dizaines de récepteurs répartis sur tout le territoire constituent le RGF (Réseau GPS Français). Ces réseaux contribuent à la définition et à la construction du repère international terrestre de référence. Des réseaux plus "locaux", qui sont aussi plus denses, sont aussi utilisés pour étudier les déformations de régions soumises à des contraintes géophysiques fortes. En France, le réseau REGAL permet d'étudier l'évolution géodynamique des Alpes; et c'est au Japon et en Californie, que l'on trouve les réseaux GPS les plus denses au monde, en raison des nombreux séismes présents dans ces régions, et que les géophysiciens cherchent à modéliser et peut-être un jour à prévoir. Une autre application de ces réseaux denses est l'étude de la structure de l'atmosphère à travers la réalisation de tomographies en trois dimensions: puisque les signaux émis par les satellites ont un trajet modifié par l'ionosphère et la troposphère, la propagation des signaux GPS/GALILEO constituent, avec des réseaux denses, des mesures indirectes de ces couches de l'atmosphère.

## Utiliser GALILEO pour reconstruire la dynamique des mouvements autour de la Terre

Un autre grand domaine d'applications de la navigation par satellites est celui de la dynamique orbitale des satellites artificiels en orbite autour de la Terre: la quasi-totalité des nouvelles missions spatiales placées sur des orbites basses (citons les missions de géodésie, CHAMP, GRACE, JASON-1), emportent désormais à leur bord des récepteurs GPS de haute précision, en attendant les futurs récepteurs mixtes GPS/GALILEO. Ils permettent de connaître la position du centre de masse du satellite, ainsi que son orientation dans les trois dimensions d'espace, avec une très grande exactitude<sup>3</sup>.

Construire une orbite consiste à relier les positions et les vitesses telles qu'elles sont prédites par les modèles d'orbite aux positions et vitesses qui

(3) c'est ce qu'on appelle aussi la restitution d'attitude d'un satellite.



**Figure 8 : Les déplacements de la plaque eurasienne, tels qu'ils sont reconstruits grâce aux différentes techniques de géodésie spatiale.**

sont effectivement observées au cours du temps. La qualité d'une orbite dépend non seulement de la qualité des mesures, mais également de la qualité du modèle d'orbite. Un modèle d'orbite est défini par le modèle des forces qui perturbent le mouvement du satellite (champ de gravité terrestre, influence de la Lune et du Soleil, freinage atmosphérique, pression de radiation solaire, effets relativistes, etc...), ainsi que la valeur des paramètres qui caractérisent ce modèle: les études de dynamique spatiale permettent, grâce à des méthodes dites de perturbations, de mieux connaître l'environnement dans lequel sont placés les satellites grâce à la détermination simultanée de ces paramètres géodynamiques et d'autres paramètres propres à l'orbite.

Les systèmes GPS et GALILEO vont ainsi renforcer l'arsenal des techniques de géodésie spatiale qui ont toutes leurs avantages et leurs défauts. Un exemple manifeste est celui des nouvelles missions spatiales d'étude de la Terre qui sont lancées sur des orbites de faibles altitudes (quelques centaines de kilomètres). Ces orbites offrent une bien plus grande sensibilité au champ de gravité que celles d'altitude plus éle-

vées sur lesquelles sont placés des satellites passifs comme LAGEOS-1 ou STELLA, complètement recouverts de réflecteurs laser, et qui conservent des applications spécifiques. À ces altitudes basses, le positionnement par GPS et/ou GALILEO constitue de très loin le meilleur moyen de disposer d'observations "par le haut" de la position d'un satellite comme CHAMP par exemple (lancé en 2000), dédié à la construction de modèles de champ de gravité et de champ magnétique: c'est le principe SST-hl (pour Satellite to Satellite Tracking - high low). Autre exemple: la nouvelle mission GRACE, lancée en 2002, exploite, en plus, la variation de la distance entre les deux satellites qui la composent et qui sont placés sur la même orbite, pour la construction de modèles de champ de gravité incluant la détermination de composantes variables dans le temps.

Chaque satellite de cette mission est équipé de récepteurs GPS, et d'un lien spécial qui mesure exactement la distance inter-satellite. Ces différentes mesures contribuent à la construction mathématique de la trajectoire des deux satellites, reposant sur le principe dit SST-II (pour Satellite to Satellite



## Tracking- low low).

Les systèmes de radionavigation apportent ainsi des mesures d'une nature nouvelle en géodésie spatiale. En permettant de positionner les satellites artificiels dans les trois dimensions d'espace, les systèmes de radionavigation apparaissent de plus en plus comme indispensables pour la construction des trajectoires des véhicules spatiaux en orbite autour de la Terre, et ont d'ores et déjà permis un saut irréversible dans l'exactitude de ces trajectoires.

## GALILEO et les échelles de temps

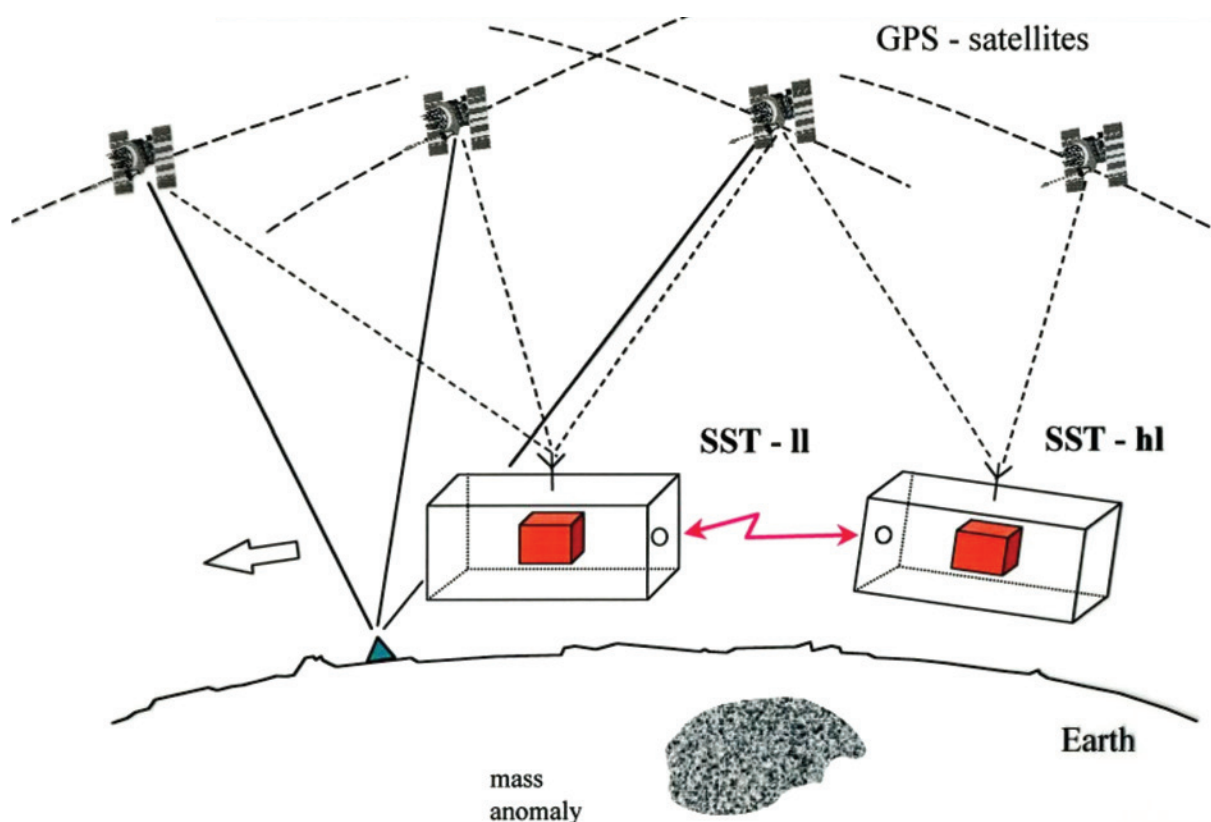
Parallèlement à la construction des trajectoires figure un autre domaine d'applications sous-jacent aux études de dynamique orbitale, celui de la construction et de la diffusion d'échelles de temps internationales. Leurs exploitations concernent aussi bien la vie quotidienne - les applications tant civiles que scientifiques -, et en particulier le domaine de la

physique fondamentale (expériences de transferts de temps, calcul de certains paramètres relativistes...).

Historiquement, les échelles de temps utilisées pour construire les orbites des satellites artificiels sont des échelles où le temps est supposé s'écouler de manière uniforme. Dans ce cadre, les effets relativistes ont longtemps été considérés comme de "simples" corrections à prendre en compte dans le mouvement. Aujourd'hui, grâce aux progrès constants de l'exactitude et de la précision des différents types de mesure acquises en géodésie spatiale, l'ensemble des équations du mouvement du satellite artificiel devrait (et devra) être réécrit dans le cadre de la relativité générale, même si certaines hypothèses simplificatrices sont encore complètement justifiées. L'évolution majeure dans ce domaine sera l'utilisation de nouvelles échelles de temps de plus en plus exactes conçues dans un cadre relativiste.

## GALILEO, une technique de géodésie spatiale parmi d'autres

Les différents exemples mentionnés ci-dessus ont pour but de convaincre le lecteur que l'arrivée programmée du système GALILEO est une réponse à bien des enjeux qui sont loin d'être seulement et purement d'ordre économique ou politique. Sur le plan scientifique, de plus, l'objectif n'est pas seulement de faire en mieux ce que fait déjà le GPS. À terme, il s'agit effectivement d'intégrer chaque technique de géodésie spatiale dans le cadre d'un réseau utilisant, combinant, et exploitant, les avantages de chaque technique. Non seulement une telle approche permettra de décorrélérer certains des paramètres calculés en géodésie spatiale, mais en outre et surtout, l'utilisation combinée d'au moins deux systèmes indépendants de radionavigation (GPS et GALILEO) permettra de détecter certaines erreurs systématiques pour l'instant indétectables. Pour le positionne-



**Figure 9 :** Les deux satellites de la mission GRACE emportent à leur bord des récepteurs qui les positionnent par rapport aux satellites hauts. Ils ont une altitude basse de manière à avoir une grande sensibilité aux anomalies de masse présentes à la surface ou à l'intérieur de la Terre. C'est également sur l'évolution de la distance inter-satellite qu'est basée la construction de nouveaux modèles de champ de gravité .

(Doc. GRGS)

ment en temps réel, le gain sera appréciable. Pour les produits scientifiques, l'exactitude des paramètres sera également améliorée : cela permettra notamment de quantifier plus précisément, après analyse des perturbations des satellites artificiels, les transferts de masse entre les différentes composantes de notre planète (terre solide, océans, glaces, atmosphère). La géodésie spatiale permettra ainsi d'encore mieux contraindre certains modèles d'évolution de la géophysique.

Plus généralement, c'est un étalonnage global des différentes techniques de géodésie spatiale qui sera possible avec GALILEO. En particulier si des récepteurs GPS sont placés à bord des satellites GALILEO et inversement, ou si des réflecteurs laser sont disposés sur les satellites GALILEO, comme c'est déjà le cas pour certains satellites GPS.

Plusieurs types de mesures permettent de calculer les orbites de satellites artificiels. D'un point de vue historique, après les mesures par méthodes photographiques, les mesures de l'effet Doppler sur les signaux radio-électriques émis ont permis la construction mathématique de l'orbite des satellites artificiels à partir de la mesure de leurs vitesses radiales. Il a été possible d'en déduire les grandes caractéristiques (ou longueurs d'onde spatiales) du champ de gravité terrestre. L'effet Doppler est encore largement utilisé aujourd'hui avec le système français DORIS, embarqué à bord de plusieurs satellites parmi lesquels certains dédiés à l'océanographie spatiale. Historiquement aussi, l'essor de la télémétrie laser sur satellite (SLR : Satellite Laser Ranging) ou sur la Lune (LLR : Lunar Laser Ranging), qui permet de mesurer la distance entre les satellites équipés de réflecteurs et une vingtaine de stations au sol réparties de par le monde, a permis à la géodésie spatiale de multiplier le nombre et la qualité des produits qu'elle a pu fournir à la communauté scientifique. Citons en particulier la connaissance détaillée des premiers coefficients du champ de gravité terrestre avec leurs variations temporelles. Citons aussi la masse de la Terre<sup>4</sup>, connue aujourd'hui avec dix chiffres significatifs, qui contribue à

**Tableau 1 : Contributions respectives des différentes techniques à la construction des produits de géodésie spatiale.**

PRODUITS	LLR	VLBI	SLR	GPS GALILEO	DORIS	SST-II
<b>Repère extragalactique</b>		***				
<b>Rattachement au système solaire</b>	***	*				
<b>Rattachement à la Terre</b>						
Précession-Nutation	**	***	*	*		
Temps Universel	*	***				
<b>Rotation de la Terre</b>						
Longueur du jour		***	*	**		
Mouvement du pôle		***	**	***	*	
<b>Repère terrestre</b>						
Homogénéité de la couverture mondiale		*	*	**	***	
Centre de masse (GM)			***	*	*	
Centre de figure		**				
Mouvement des plaques tectoniques		***	**	***	***	
Densification			*	***	**	
<b>Orbitographie des satellites hauts</b>						
Type : GPS/GALILEO			*	***		
Type LAGEOS, ETALON			***			
<b>Orbitographie des satellites bas</b>						
Type : TOPEX/Poséïdon, JASON-1			**	***	***	
Type : ERS, ENVISAT			**	***	***	
Type : CHAMP, GRACE			*	***		***
<b>Champ de gravité</b>						
Grandes longueurs d'onde			***	**	*	
Moyennes et courtes longueurs d'onde			**	***	*	
Variations temporelles			**	*		***

fixer l'échelle des systèmes géodésiques terrestres. L'interférométrie à très longue base, enfin, apporte également une autre contribution très importante et unique à la définition des repères de référence spatio-temporels et à l'orientation de notre planète dans l'espace, par l'observation au moyen de radiotélescopes de radiosources extra-galactiques.

## L'avenir de la constellation

(4) à travers la constante géocentrique GM.

## GALILEO

Chaque satellite de la constellation GALILEO est conçu pour avoir une durée de vie opérationnelle de l'ordre d'une quinzaine d'années. Le remplacement "par grappe" (plusieurs satellites seront placés en orbite simultanément par une même Ariane 5) est d'ores et déjà prévu, pour maintenir la pérennité de la configuration initiale de la constellation. Le problème est donc d'étudier la "désorbitation" des satellites arrivés en fin de vie, afin de savoir sur quel type d'orbites par-

king on peut les placer, avant que tout le carburant à bord ne soit épuisé. De telles études font appel à des méthodes et théories de mécanique céleste et spatiale, afin notamment d'étudier l'évolution naturelle (i.e. hors manœuvres) des trajectoires sur plusieurs dizaines voire centaines d'années.

Dans la gamme d'altitudes des orbites MEO (Medium Earth Orbits), comme celles de GALILEO et GPS, l'influence gravitationnelle de la Lune et du Soleil est très importante et a tendance, en particulier, à faire croître l'excentricité des orbites. Cela a pour effet, à terme, de faire couvrir aux orbites MEO un large spectre d'altitudes, parmi lesquelles celle de l'orbite géostationnaire (42 000 km), ce qui n'est pas sans poser un certain nombre de problèmes en raison du grand nombre de satellites actifs dans cette région de l'espace. De plus, l'altitude choisie fait de ces orbites des orbites qui sont fortement soumises à des effets de résonance : certaines perturbations dues au champ de gravité, habituellement négligeables, sont démultipliées. Ces orbites ont certes été choisies pour des raisons pratiques, mais les stratégies de maintien à poste (en phase opérationnelle) et de désorbitation doivent être soigneusement étudiées, en particulier pour assurer la stabilité de la constellation avec un minimum de carburant. Des études sont actuellement en cours notamment au CNES, ainsi qu'à l'ESA et à GEMINI Département de l'Observatoire de la Côte d'Azur.



**Figure 10 :** La géodésie spatiale est une science multi-disciplinaire qui repose sur la construction mathématique du mouvement des satellites artificiels en orbite autour de la Terre.

## Épilogue

Le fonctionnement global du système GALILEO reposera sur des moyens humains et technologiques importants. En particulier, le rôle du segment-sol est essentiel, car il permettra de détecter et de corriger certaines dérives des modèles d'orbites, donc des positions prévues, diffusées par les satellites de la constellation. Ces dérives, de l'ordre de quelques centimètres, sont dues principalement à l'influence de la Lune et du Soleil non parfaitement modélisée, ainsi qu'à certains effets non gravitationnels qu'il est impossible de modéliser parfaitement à toute époque et tout lieu, comme ceux dus à la pression de radiation solaire.

L'épopée GALILEO ne fait que commencer. Sur le plan européen, le projet GALILEO est d'ores et déjà à inscrire sur la liste de ceux qui ont fait le succès d'Airbus ou d'Arianespace : il s'agit là d'un projet fédérateur qui soutiendra et fera se développer l'industrie européenne de haute technologie, à la fois dans ses segments-sol et spatial. Ce projet donnera lieu à la mise en place de nouveaux services civils fondés sur le positionnement, la navigation, les moyens planétaires modernes de télécommunication, y compris des services de sauvetage.

Les applications principales ne concernent pas seulement les transports aérien, terrestre, maritime. Les applications scientifiques liées à l'utilisation du système GALILEO sont fondamentales. Un fonctionnement en mode "très haute exactitude" nécessite la participation d'équipes scientifiques intégrés au déroulement du programme GALILEO ; des récepteurs mixtes GPS/GALILEO devront être développés. Il ne s'agit pas seulement de faire "plus vite et plus précis" que le GPS ; il ne s'agit pas non plus seulement d'améliorer la précision globale du positionnement pour une meilleure exactitude, une meilleure fiabilité, pour une garantie de la continuité des services et une intégrité du système ; il s'agit bien de définir les fondements d'une stratégie globale de radionavigation par satellite. Des applications fascinantes sont à attendre, avec des retombées dont la plupart sont encore à imaginer. L'interdépendance des systèmes de positionnement, pour les applications civiles ou

scientifiques, apparaîtra très rapidement indispensable et irréversible. ●

## Références

- *Un système de positionnement GALILEO, un enjeu stratégique, scientifique technique*, rapport 2003, Académie de marine, Bureau des longitudes, Académie nationale de l'air et de l'espace
- *Le GPS amélioré* - Pour la Science N° 320 - juin 2004,
- De nombreuses informations sont disponibles sur les sites Web de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) et de la Commission Européenne.

## Contact

Florent Deleflie, François Barlier,  
Pierre Exertier  
Observatoire de la Côte d'Azur, UMR GEMINI,  
Av. N. Copernic, F-06130 Grasse  
Florent.Deleflie@obs-azur.fr

## ABSTRACT

*Galileo is a new European program of satellite radio positioning and navigation. Since the US government has opened GPS to civil applications, officially up to 2005, many applications and developments started with GPS, the Global Positioning System. The success and the immense interest of these applications is such that these services could not now be interrupted without dramatic economic and scientific disadvantages. Only a civil service, and not a military system as it is now, can guarantee such applications on a very long-term basis with, for example, a reliability of 100% for air navigation control in real time. Therefore, Europe has decided to develop, on a cooperative basis, a lasting European undertaking of immense strategic importance with GPS and Glonass. With Galileo, the number of satellite will double and all the possible applications, described here, will be dramatically enhanced with a better precision and a better accuracy. For example, scientific researches have specific applications in many fields, related to the understanding of the Earth and the atmosphere, as well as the remarkable time distribution service around our planet. The merging of different space techniques including GPS and Galileo, but also other geodetic techniques such as Satellite Laser Ranging and DORIS, enables to obtain space and time data of unparalleled precision for science applications.*



# Les repères topographiques de 1896 ou à la recherche du plan dans la ville

■ **Marc LE FLOUR et Olivier NAMIAS**

*A l'occasion d'un recensement général des tampons de regards parisiens en vue d'une exposition photographique, la découverte de l'un d'eux portant la mention "Plan de Paris N° 96" suscita des questions quant à sa destination. Le présent article retrace les différentes étapes des recherches qui aboutirent à la découverte d'un second tampon portant, lui, la mention "Plan de Paris N° 167".*

### Ces deux tampons sont les derniers témoins

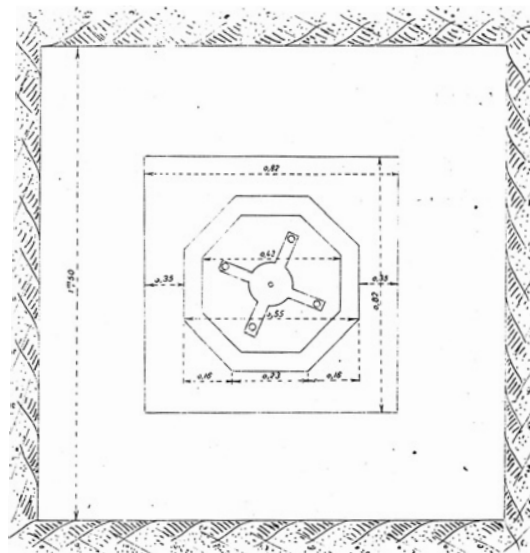
## ■ MOTS CLES

Plan de Paris, triangulation, Verniquet, borne repère, topographie, tampons de regards, cartographie, canevas trigonométrique, polygona­tion, Durenne

*physiques des bornes repères qui ont servi à l'établissement du plan de Paris en 1896. Les auteurs esquissent ainsi une archéologie de la topographie de Paris.*

**L**a topographie a-t-elle son archéologie ? Et si oui, comment se présentent les signes du marquage de l'espace, base de la maîtrise du territoire aussi bien physique que social (tracé des voies, emplacement des réseaux, conscience du territoire, propriété foncière et obligations fiscales du sol...) ? Dispersés et presque invisibles à l'œil non professionnel, c'est parfois à la suite d'enquêtes inattendues que ces signes ressurgissent, comme il arriva avec les plaques "Plan de Paris", dont nous allons relater ici les circonstances de la redécouverte.

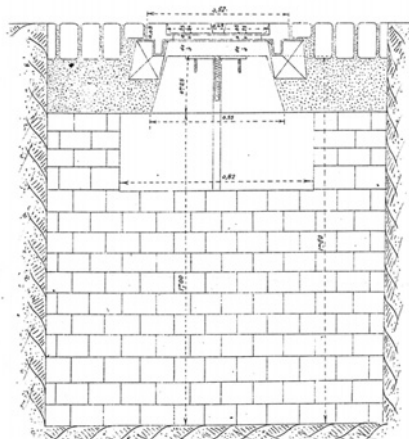
Précisons tout d'abord que nous ne sommes ni topographes ni géomètres : c'est en tant qu'architecte et journaliste que nous décidâmes un jour de nous lancer dans un projet d'exposition ayant pour thème les tampons de regards parisiens, un objet plus connu du grand public sous le vocable familier de "plaques d'égouts". Une intuition nous laissait penser que cet élément oublié du mobilier urbain recelait un intérêt certain, en dépit des apparences et du poids de la vision culturelle négative que véhicule cet objet. Restait à démontrer cette intuition, ce qui passait par un recensement des tampons existants, afin d'évaluer leur diversité et d'éprouver leur intérêt. Pour résumer, nous dirons que cet intérêt se manifeste principalement sous trois formes. Un intérêt immédiat d'ordre graphique, lié aux inscriptions et aux dessins mêmes



Plan du Chassis et Tampon  
Echelle de 0,15 pour 1 mètre



**Ancienne borne repère de la triangulation. Haut : Plan, échelle de 0,075 pour 1 mètre. Bas : Plan du Chassis et Tampon, échelle de 0,15 pour 1 mètre. Huguenin, "Lever précis d'un plan de ville", Planche 6.**



**Ancienne borne  
repère de la  
triangulation.  
Coupe, échelle de  
0,075 pour 1 mètre.  
Huguenin, "Lever  
précis d'un plan de  
ville", Planche 6.**

portés sur le tampon, un intérêt historique lié à l'explication même de ces inscriptions (type de brevet mentionné, identité du fondeur, provenance...), enfin un dernier intérêt ressortissant de la géographie des réseaux que révèlent les tampons (loin d'ouvrir vers les seuls égouts, ils sont autant de portes vers les différentes galeries techniques ou les carrières).

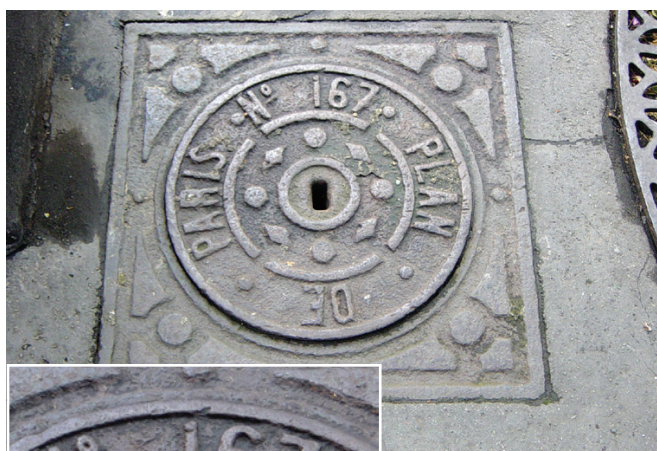
Le recensement de ces objets ne pouvait s'effectuer qu'à pieds, sur la base d'indice comme la cartographie de certains réseaux, mais doit également beaucoup au hasard. C'est en arpentant les rues parisiennes qu'eut lieu notre rencontre avec la topographie, sous la forme d'une plaque située boulevard Pasteur et portant l'inscription "PLAN DE PARIS N° 96". Le temps avait soudé le tampon, rendant son ouverture impossible. La position semblait être identique à "la Station au Poste d'Observation du Maine", nom d'un des repères utilisés pour l'établissement du canevas topographique de Paris en 1785-81. On pouvait alors penser à un vestige du plan de Verniquet. L'examen des motifs du tampon infirma cette hypothèse : ils rappelaient beaucoup ceux fondus par Durenne, mais ce dernier ne commença son activité de fondeur qu'à partir de la seconde moitié du 19<sup>e</sup> siècle. La vérité était donc ailleurs... Il fallut donc se tourner vers les sources d'archives pour tenter d'élucider le mystère de sa destination.

Les Services du Plan de la Ville de Paris allaient nous apporter un secours décisif : étonnés d'apprendre l'existence d'une telle plaque, ils nous fournirent un tirage du plan de 1896, où figuraient tous les repères utilisés pour son établissement. Il ne restait plus qu'à explorer la centaine de "bornes repère" situés sur les bastions et la voie publique... La destruction des fortifications ayant entraîné la disparition de nombre de ces bornes, ce travail fut allégé. Restaient celles situées sur la chaussée : là encore, les nombreux travaux de voirie avaient fait des ravages. Finalement, c'est dans le 16<sup>e</sup> arrondissement, avenue de Versailles, qu'eut lieu la découverte d'un second tampon, numéroté 167. Le second et dernier survivant d'une "famille" de 145 membres ! Par chance, ce tampon s'ouvrait et ce qui se trouvait dessous, dissimulé sous une épaisse couche de terre végétale, était en tout point conforme à la description qu'en fait Jean Huguenin dans son ouvrage *Lever précis d'un plan de ville* paru en 1949 : "après avoir enlevé le tampon [en fonte analogue à ceux qui obturent les puits de descente au réseau d'égout], le repère en forme de croix était mis à jour". Cette croix "permettait la mise en station d'un cercle d'alignement sur un des points de coordonnées connues (p. 31)". Elle se posait sur un massif en maçonnerie d'un mètre de hauteur, ainsi que nous le confirme la coupe trouvée dans le même ouvrage. Situé à 30 centimètres sous le sol, ce massif permettait de garder un nivellement stable à l'abri des variations du sol superficiel, qui pouvaient survenir suite à l'asphaltage de la chaussée ou autres travaux.

Le "mystère" était percé à jour ! Les tampons "Plan de Paris" sont donc la trace physique de la polygonation dans la ville. Implantés dans un sol urbain simultanément à la prise de possession du sol par les réseaux techniques, ils étaient condamnés à disparaître face aux impératifs des travaux de voiries nécessaires aux nouvelles exigences urbaines. Malheureusement, comme le rappelle Huguenin, "la disparition des

145 bornes repères triangulés fit perdre au canevas trigonométrique de Paris la moitié de sa substance (p. 31)".

Traces fragiles, ces points où se rencontrent le citadin et le géomètre mériteraient d'être conservés. Ils constituent à notre sens une partie de cette "archéologie de la topographie" que nous évoquions au début de l'article. Les plans traduisent de façon synthétique les informations de l'espace : ils se tracent en s'appuyant sur des points remarquables du territoire. En plus de leur fonction d'usage, c'est ainsi que les clochers, les coupoles, les coins d'immeubles, deviennent à leur insu des marqueurs de l'espace mesuré et triangulé. Opérant selon une démarche diamétralement opposée, les repères comme ceux dissimulés sous les tampons "Plan de Paris" reportent dans l'espace et sur le territoire un pur signe du plan. Après la ville sur le plan, voici donc le plan présent dans



Tampon "PLAN DE PARIS N° 167" fermé, lors de sa découverte.



Gros plan sur "N° 167"



Tampon "PLAN DE PARIS N° 167" ouvert et laissant apparaître la terre végétale qui l'obstrue.





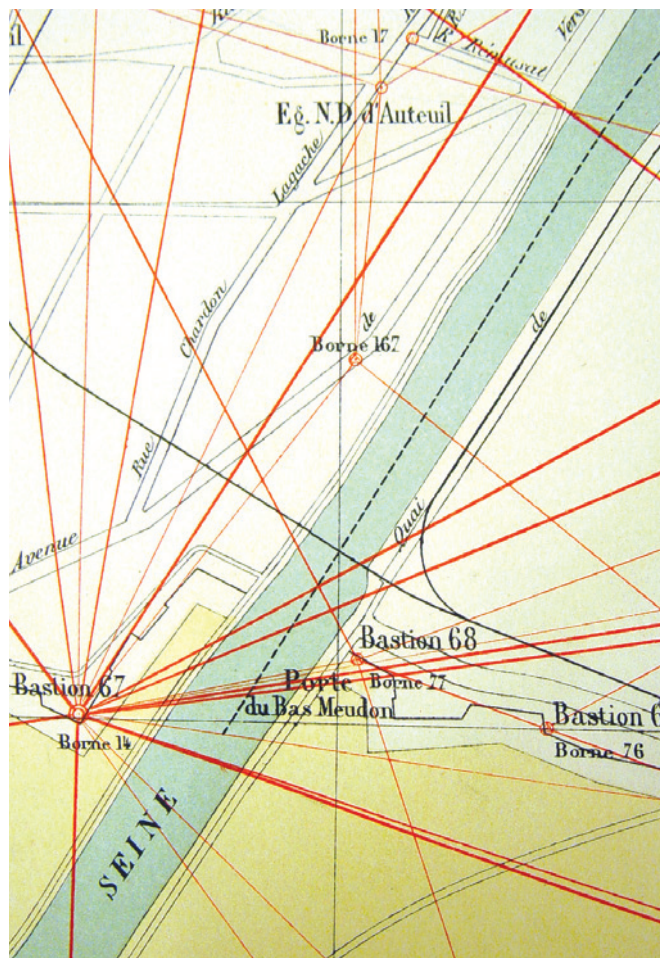
Tampon "PLAN DE PARIS N° 167" ouvert et laissant apparaître la croix après déblaiement de la terre végétale.



Tampon "PLAN DE PARIS N° 167" ouvert et dégagé de la terre végétale. Emplacement de la croix métallique.



La croix métallique, dessous, vue de l'axe.



Extrait du plan avec l'emplacement des bornes repères N° 14 et 167



Tampon "PLAN DE PARIS N° 167" ouvert, désobstrué avec la croix à ses côtés.





Colonne à l'angle des rues Abel Ferry et de La Petite Arche, Paris 16°.

■■■ la ville. Combien y a-t-il d'exemple de cette catégorie d'ouvrage, et sous quelle forme ?

Au cours de nos recherches, nous avons également rencontré d'énigmatiques plaques carrées de 20 cm de côté, apparemment localisées sur les emplacements des bornes repères figurant sur le plan de 1896 (l'une des mieux conservées se situe Place de la Concorde, à l'emplacement de la borne n° 101); et si la plupart restent "soudées" à leur support, les quelques unes pouvant s'ouvrir donnent sur un vide d'environ 60 cm de profondeur sans aucun indice au fond pouvant nous éclairer quant à leur destination.

Nous demandons à présent aux professionnels que vous êtes de nous éclairer sur cette petite colonne d'un mètre de hauteur, dressée à l'angle des rues Abel Ferry et de la Petite Arche. Située à l'emplacement du bastion 67, cette borne est-elle une représentation de l'ancien repère topographique n° 14 ou le vestige d'un temple grec? Avis aux amateurs d'enquêtes urbaines... ●

## Remerciement

Les auteurs remercient chaleureusement Monsieur Jacques Sol du Service de la Topographie et de la Documentation Foncière, Mairie de Paris.

## Bibliographie

Guy Le Hallé, *Les fortifications de Paris*, Le Coteau, Horvath, 1986.  
Jean Huguenin, *Lever précis d'un plan de ville*, t.1, Eyrolles, Paris, 1949.  
Antoine Picon, Jean-Paul Robert, *Un atlas parisien*, Picard / Pavillon de l'arsenal, Paris, 1999.  
Jeanne Pronteau, *Edme Verniquet, 1727-1804*, Paris, 1986

## Contact

**Marc LE FLOUR** est journaliste  
Créateur et animateur de la librairie en ligne urban-resources.net  
marclefour@yahoo.com  
**Olivier NAMIAS** est architecte



Tampon Durenne, Paris 19°



Tampon "PLAN DE PARIS 96", Paris 15°



Plaque carrée Place de la Concorde

photos : © Marc Le Flour, Olivier Namias

## ABSTRACT

While completing a general census of Paris manhole covers for a photographic exhibition, the discovering of the carving "Plan de Paris N° 96" on one of them raised the question of its purpose. This paper relates the different steps of the researches which led to the discovery of a second one with the carving "Plan de Paris N° 167". These two manhole covers are the last two physical remains of the reference landmarks used for the cartography of the City of Paris in 1896. Now, one can say that the topography of Paris has its own archaeology.

# Méchain géodésien

■ Suzanne DÉBARBAT

*La création de la géodésie astronomique remonte à la fin du XVII<sup>e</sup> siècle, quand Picard entreprend la mesure d'un arc de méridien, de part et d'autre de l'Observatoire de Paris. Il applique une méthode de triangulation, inspirée de Snel, et en crée l'instrumentation. La méthode sera mise en œuvre tout au long du XVIII<sup>e</sup> siècle, avec des instruments peu différents mais d'une meilleure fabrication. Une première Méridienne de France est établie entre 1683 et 1718, suivie d'une deuxième en 1739-1740 sur laquelle s'appuiera la carte générale de la France, la première, au niveau d'un pays, établie scientifiquement. Une prolongation, par Méchain, Legendre et Cassini est constituée par le raccordement, en 1787, des méridiens de Paris et de Greenwich. Méchain se trouve tout désigné pour une troisième opération, qu'il mène avec Delambre, en vue de la détermination de la longueur du Mètre (1799) du Système métrique décimal, décidé en 1790, devenu en 1960 le SI.*

## ■ mots clés

Borda, Cassini, Delambre, Lacaille, Langlois, Lenoir, Legendre, Méchain, Cercle répétiteur, cercle de Borda, quart-de-cercle, méridien, méridienne, triangulation

L'année 2004 marque à la fois la parution du numéro 100 de la revue XYZ de l'AFT et le bicentenaire de la mort de l'astronome et géodésien Pierre-François-André Méchain, né à Laon le 16 août 1744 et décédé à Catellon de La Plana le 20 septembre 1804. Il effectuait alors son deuxième et dernier voyage en Espagne, dans le cadre de la suite de l'opération de géodésie astronomique qui, de 1792 à 1798, avait conduit, en collaboration avec Delambre (1749-1822), à la détermination de la longueur du mètre du Système métrique décimal de 1799. Cette opération, venant au moment de l'achèvement de la Carte générale de la France, résolvait le problème de l'unification des mesures, pendant depuis plusieurs siècles, et montrait l'efficacité de la méthode de triangulation mise au point un siècle plus tôt.

## Prémices et instrumentation

Issue d'idées mises en œuvre aux Pays-Bas par Snel, ou Snellius (1580-1626), la première opération de triangulation scientifiquement menée en France est due à l'astronome Picard (1620-1682), membre de l'Académie des sciences



Portrait de Méchain (1744-1804) des Collections de l'Observatoire de Paris; il est représenté tenant, en main gauche, l'ouvrage "Base du Système..." publié (après sa mort) sous son nom et celui de Delambre.

dès sa création en 1666. Il détermine, de part et d'autre de l'Observatoire de Paris, le long du méridien fixé le 21 juin 1667, la longueur d'un arc de ce méridien. Picard choisit comme limite nord Sourdon (près d'Amiens), et comme



Portrait de Delambre (1749-1822) des Collections de l'Observatoire de Paris, également représenté avec "Base du Système..." Sa main droite tient un mètre ; un kilogramme est placé sur la table.

limite sud Malvoisine (près de la Ferté-Alais). Picard détermine successivement les angles des différents triangles, choisissant pour base une belle ligne droite, au profil peu accidenté, reliant Villejuif à Juvisy.

Bibliothèque de l'Observatoire de Paris.



■ ■ ■ Picard effectue la mesure de cette base grâce à des "bois de pique" d'une longueur de deux toises. Pour les déterminations géodésiques et astronomiques, il met au point trois instruments qu'il munit de lunettes et de micromètres :

- le quart-de-cercle mobile à deux lunettes, dont l'une est fixe, l'autre mobile, qui lui servira pour la mesure des angles de ses triangles,
- le secteur zénithal, dont le limbe ne dépasse pas dix-huit degrés, avec lequel il mène ses observations astronomiques pour la détermination de la latitude aux extrémités de sa triangulation,
- le niveau à lunette grâce auquel il tient compte des différences d'altitude entre les sommets de ses triangles.

Ces instruments seront utilisés pendant de nombreuses décennies. Le secteur de Bradley (1693-1762), troisième *Astronomer Royal* de l'Observatoire de Greenwich créé en 1675, inspiré de celui de Picard, conduira ce dernier à la découverte de deux phénomènes importants de l'astronomie, la nutation et l'aberration. Les corrections aux observations, que leur prise en compte entraîne, permettront d'améliorer les déterminations de caractère astronomique nécessaires aux mesures géodésiques. Le niveau sera l'instrument privilégié des topographes. Quant au quart-de-cercle, il sera encore employé par Méchain dans ses opérations géodésiques de la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle.

L'opération menée par Picard, en 1669-1670, est suivie, en 1681, d'une campagne de détermination des différences de longitude, entre les principaux ports des côtes de France et le Méridien de l'Observatoire de Paris ; cette campagne est menée de concert avec La Hire (1640-1718). Picard est alors conduit à proposer à Louis XIV d'étendre la mesure de la frontière nord à la frontière sud de la France. La cartographie, à laquelle songent le Roi et son ministre Colbert, disposerait de la référence nord-sud sur laquelle appuyer les opérations à entreprendre.

Picard meurt, en octobre 1682, avant d'avoir pu entreprendre l'opération projetée et acceptée.

## Les opérations géodésiques des Cassini, de Maraldi et de Lacaille

Jean-Dominique-Cassini (1625-1712) est ce professeur d'astronomie de Bologne qui adresse à l'Académie des sciences, en 1668, ses tables permettant de prédire les éclipses des satellites de Jupiter. Les Académiciens français en constatent la qualité et suggèrent de l'inviter en France. Ces satellites sont les quatre découverts par Galilée (1564-1642) en 1609/10, et leurs éclipses, comme celles de Lune, permettent, lorsqu'ils passent dans le cône d'ombre de la planète, des déterminations de longitudes. Après avoir attiré à Paris le savant hollandais Huygens (1629-1695), lequel a su régulariser le mouvement des horloges par introduction d'un pendule régulateur, Louis XIV obtient que Cassini vienne se joindre aux autres membres de l'Académie.

Cassini arrive à Paris en 1669, s'installe à l'Observatoire – pas encore achevé – en 1671, et reprend le projet de Picard après son décès. Mais, en 1683, alors que la triangulation n'est parvenue qu'à Bourges, Colbert décède et son successeur, Louvois, l'arrête. Les mesures ne reprendront qu'après le décès de ce dernier, quand Pontchartrain lui succède. Cassini, qui a – dès 1673 – décidé de demeurer en France, s'y est marié et a eu un fils, Jacques, né en 1677 ; en 1700 celui-ci est en mesure d'accompagner son père. L'opération reprend en 1700-1701 au sud de la France, prolongeant la triangulation interrompue. Y participent donc Cassini I et son épouse, son fils Cassini II (1677-1756), son neveu Maraldi (1665-1729), fils de sa sœur demeurée dans leur ville natale de Périnaldo du Comté de Nice. La partie nord de la triangulation ne pourra être achevée avant 1718.

J.-D. Cassini étant décédé depuis 1712, c'est son fils qui rend compte de l'opération et des résultats auxquels elle a conduit : la longueur d'un degré de méridien diminue du sud au nord de l'hexagone, conduisant à une Terre allongée vers ses pôles. Cette conformité aux idées de Cassini I, confirmée par les mesures maintenant achevées, s'oppose aux conclusions de Newton (1643-1727) ; pour ce dernier, et compte

tenu de sa rotation, la Terre est aplatie en ses pôles. Cassini fils publie les résultats en 1720.

En 1737, Maupertuis (1698-1759) rentre d'une opération de triangulation au plus près du pôle nord, dont est tirée la longueur d'un degré de méridien. Cette valeur, comparée à celle de Picard à la latitude de Paris, conforte les partisans de Newton et conduit à de nouvelles mesures le long du Méridien de l'Observatoire, par le fils de Jacques, César-François. Le degré de Picard est d'abord contrôlé, puis Lacaille (1713-1762), Cassini III (1714-1784) et leurs collaborateurs entreprennent en 1739/40 une nouvelle mesure de la Méridienne de France. Ils disposent d'instruments nouvellement construits, bénéficiant d'une facture améliorée, même si leur type n'a guère changé. Leurs horloges sont aussi plus fiables. Cassini III sera l'auteur, en 1744, d'un nouvel ouvrage fournissant la longueur d'un degré de méridien déduite des mesures pour différentes latitudes. Cassini III est conduit à admettre que la Terre est bien aplatie en ses pôles.

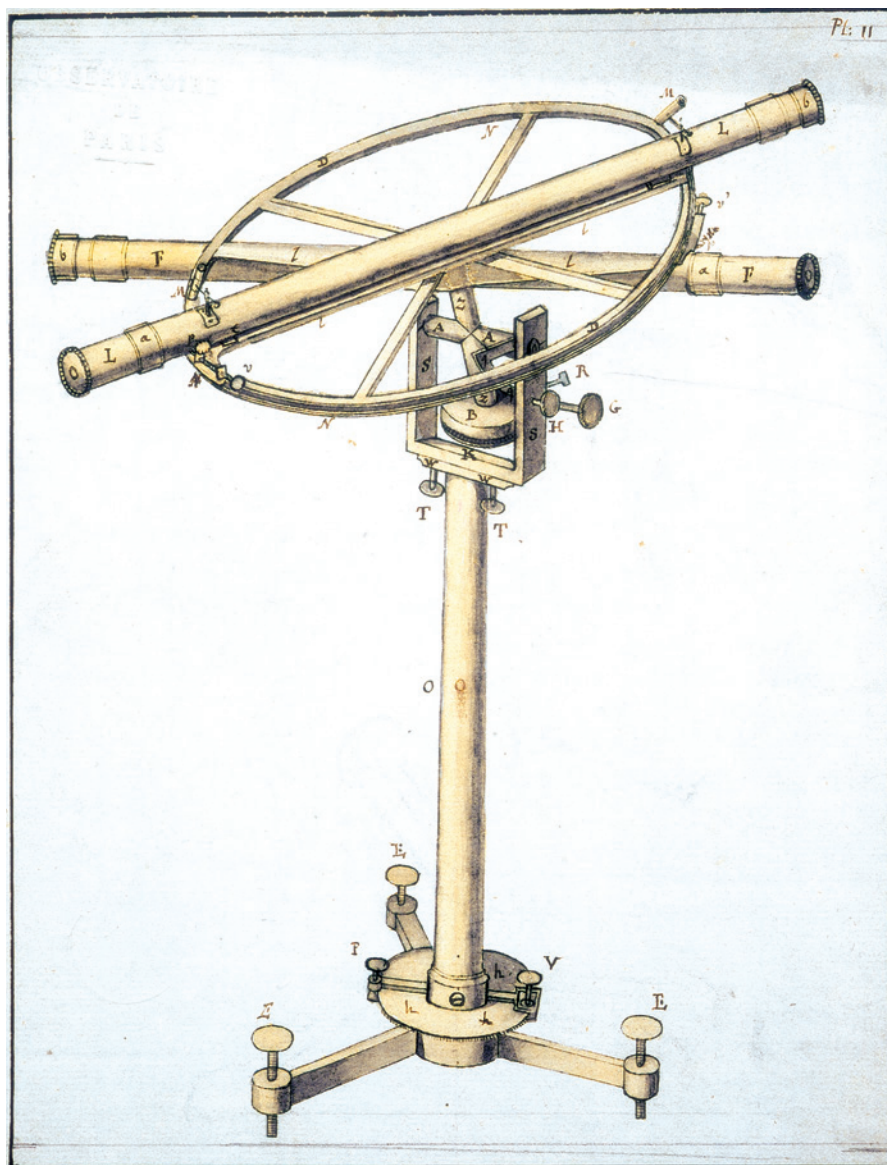
A la première carte, établie par Picard et La Hire sur laquelle est représenté le Méridien de l'Observatoire de Paris, les astronomes, devenus pour partie géodésiens, viennent d'ajouter une référence scientifiquement établie sur laquelle Cassini III va pouvoir, en une cinquantaine d'années, ancrer la carte générale de la France. Celle-ci est achevée par son fils Jean-Dominique, Cassini IV (1748-1845), en 1790, après le décès de son père.

La Méridienne de France a été, pour ce faire, parcourue et mesurée une deuxième fois, dans une opération courte et menée par les mêmes opérateurs sur toute sa longueur.

## Méchain et sa première expérience géodésique

Méchain, bon élève, entre à l'Ecole des Ponts et Chaussées à Paris, mais les moyens financiers de ses parents sont limités et il ne peut y achever ses études. Il a eu l'occasion de rencontrer Lalande (1732-1807) qui aurait acheté un instrument astronomique lui ayant





Bibliothèque de l'Observatoire de Paris.

**Dessin représentant le cercle de Borda utilisé dans l'opération de 1787.**

appartenu ; c'est du moins ce que rapporte Delambre (1749-1822) tout en mettant en doute cet achat. Quoiqu'il en soit Méchain, protégé de Lalande, suit ses cours au Collège Royal. Ce dernier lui obtient un emploi au service cartographique du Dépôt de la Marine. Ses débuts en astronomie font découvrir à Méchain deux comètes, en 1681 et, l'année suivante, il entre à l'Académie des sciences.

En 1783, alors que la Carte de France est en voie d'achèvement, Cassini III songe à l'étape suivante; elle serait européenne par engagement des pays voisins dans de tels travaux. Il a déjà établi une chaîne de triangles jusqu'à Vienne en Autriche. D'un autre côté, il serait bon de raccorder la France à l'Angleterre

laquelle a en cours une opération cartographique générale du pays. En sera issue, après la mort de Cassini III, l'opération rattachant les méridiens de Paris et de Greenwich, menée de part et d'autre du Pas-de-Calais en 1787.

Les étapes successives d'un tel rattachement, entre deux observatoires créés à la même époque, ont fait l'objet d'une communication présentée au Congrès de la FIG (Brighton 1998) dont la version en français est parue dans le numéro 79 de la revue XYZ (1999). Rappelons que les opérations sont menées côté français par Cassini IV, Méchain et Legendre (1752-1833). Côté anglais, sous l'égide de la *Royal Society*, le responsable sur le terrain est l'ingénieur Roy (1726-1790) qui appar-

tient à l'*Ordnance Survey* et qui s'est illustré dans la cartographie de l'Ecosse; contribue également le secrétaire de la *Royal Society*, Blagden (1748-1820).

Les préparatifs de l'opération débutent en 1786 quand ce dernier vient en France installer des signaux avec Méchain et Legendre. Puis les Français, Cassini IV en tête, se rendent en Angleterre. Pour la triangulation devant enjamber le Pas-de-Calais, il est prévu qu'elle sera faite en double. Les Britanniques disposent d'un instrument nouvellement construit par le "fameux Ramsden" (1735-1800) comme le désigne Cassini IV. Il s'agit d'un grand théodolite, dont le cercle a trois pieds de diamètre. Il est actuellement conservé au Science Museum de Londres, tandis qu'un autre exemplaire figure dans les collections de l'Observatoire de Palerme.

Les Français sont également équipés d'un instrument nouveau: le cercle répétiteur de Borda (1733-1799) du constructeur Lenoir (1744-1832). Ce cercle est moins volumineux. Son cercle a un diamètre d'un pied (32,5 cm) seulement, et les géodésiens, à l'œuvre, espèrent qu'il sera plus maniable que le théodolite anglais, lorsqu'il s'agira de le hisser dans les clochers, les châteaux ou sur les tours devant servir de repères aux sommets des triangles. Méchain, qui connaît bien le maniement du quart-de-cercle, en est chargé aux fins de comparaison avec le cercle de Borda.

## L'instrument du raccordement de 1787

Il est généralement considéré que, dès 1783, Borda a étendu à la géodésie le cercle entier qu'il avait mis au point pour la navigation à la mer, en modifiant le modèle que Mayer (1723-1762) avait développé entre 1752 et 1762; il est très vraisemblable de penser qu'il s'en est préoccupé en vue de l'opération qui aurait dû avoir lieu dès 1784. Quant au choix de Méchain, il provient sans doute de l'influence de Lalande à l'Académie des sciences, mais il avait pu s'imposer aussi par la formation acquise en matière de cartographie, outre les dispositions qu'il montrait pour les observations astronomiques.

■ ■ ■ Interrompues en raison de l'hiver 1786/87, les opérations vont pouvoir reprendre au printemps suivant. Louis XVI avait désigné Cassini IV et Méchain; Legendre est adjoint à l'équipe en août 1787 par le ministre du Roi, le Baron de Breteuil. Un peu plus tard, ce dernier se réjouit de la *"cordialité, l'union et le zèle qui existent entre les savants des deux Nations pour le travail qui leur est confié"*. C'est d'ailleurs ce qui ressort de la lecture du récit établi par Cassini IV à l'occasion de ce voyage mené entre le 17 septembre (date du départ de Cassini de Paris) et l'arrivée à Londres le 16 novembre 1787; les opérations ont pu être rondement menées.

Le cercle de Borda est utilisé de manière analogue au quart-de-cercle géodésique du temps de Picard lorsque ce dernier est employé seul. L'instrument possède

deux lunettes dont une est solidaire du bâti du limbe tandis que l'autre sert d'alidade. Il permet des observations astronomiques d'étoiles pour la détermination des latitudes, aussi bien que des mesures d'azimut pour les différents sommets de la triangulation, ainsi que des repérages d'altitude. Un siècle après les créateurs du XVII<sup>e</sup> siècle, les astronomes géodésiens savent en tirer le meilleur parti.

Cependant, le cercle de Borda présente l'avantage de la répétition, notamment pour les mesures d'azimuts. Ses deux lunettes sont placées de part et d'autre de son plan et sont successivement employées pour les différents pointés. L'ensemble des opérations conduit à répéter la mesure des angles autant de fois que l'observateur le désire. Par ailleurs, il suffit d'effectuer uniquement la lecture correspondant au dernier pointé qui, par différence avec le premier et par division selon leur nombre, fournit la valeur angulaire conclue; les observateurs privilégient, évidemment, 10 ou 20 pointés successifs... La comparaison, entre les mesures au cercle de Borda et celles effectuées par Méchain au quart-de-cercle, conduit à donner un avantage particulièrement net au cercle, les erreurs apparaissant plus faibles d'un facteur dix.

Pour les observations de caractère astronomique, le cercle de Borda est employé verticalement, la lunette supérieure étant seule utilisée. La lunette inférieure sert alors de simple support au niveau qui doit être, indépendamment des mouvements de rotation du cercle, maintenu en position horizontale; la verticalité est contrôlée par emploi d'un fil à plomb. La latitude du lieu s'obtient par observation de la distance zénithale d'un certain nombre d'étoiles avant, puis après leur passage au méridien du lieu. Les observations sont menées en imprimant, entre chaque visée sur l'étoile, une rotation du cercle de 180°, puis une rotation de la lunette, la hauteur de l'étoile ayant changé entre les deux ajustements. A chaque opération il convient d'effectuer les lectures correspondantes à l'horloge; elles permettent d'apporter les corrections nécessaires pour tenir compte des variations de distance zéni-

thale. Il est clair que deux observateurs sont nécessaires pour effectuer, comme l'indique Cassini IV, dix pointés en douze minutes. Toujours en position verticale, le cercle répétiteur est également employé pour déterminer la distance zénithale des repères d'azimut d'où leur hauteur et, partant, la différence d'altitude qu'ils présentent.

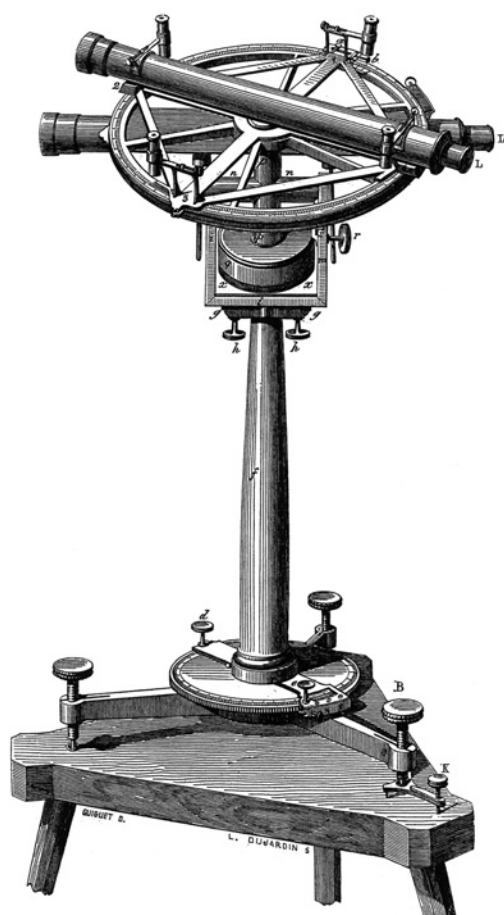
Outre l'intérêt apporté par la répétition, le cercle fabriqué par Lenoir a montré, également en 1787, sa supériorité liée à son faible encombrement. Une carrière de longue durée se préparait pour lui.

## Début des opérations pour le Mètre

En novembre 1789, au lendemain de la Révolution française, les résultats du raccordement de 1787, côté britannique sont lus à la *Royal Society* et, l'année suivante, ils sont publiés. Côté français la publication de Cassini, Méchain et Legendre, prête depuis 1789, est retardée... et paraît vraisemblablement simultanément. L'accord entre les longitudes conclues par une mesure au sol s'établit à 9 minutes 18,8 secondes d'heure côté Channel, à 9 m 20,6 s ou 9 m 18,6 s côté Manche, Cassini ayant considéré deux hypothèses quant à la forme de la Terre.

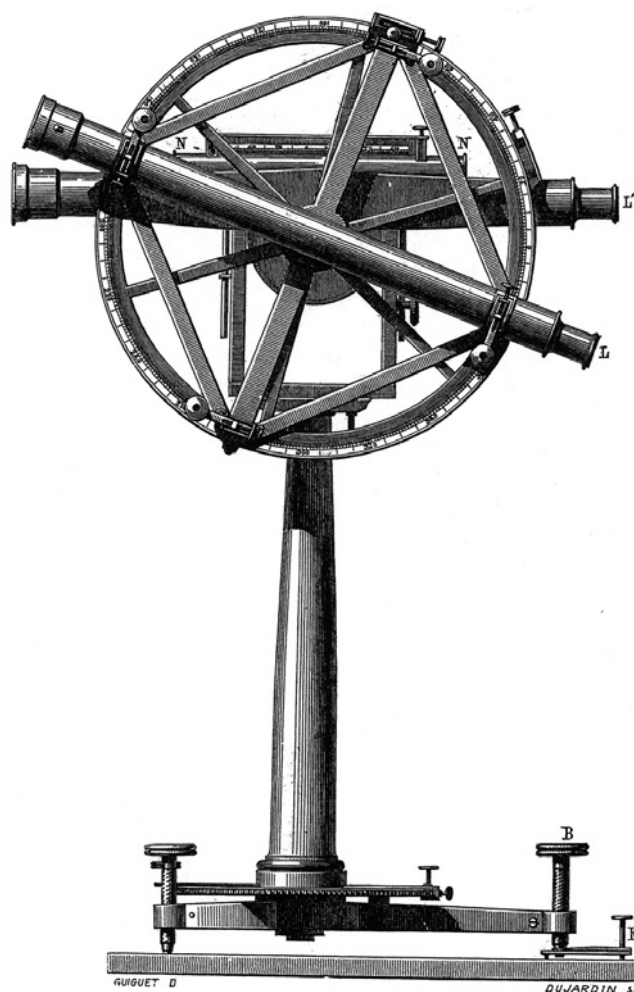
La valeur moderne 9 m 21 s (arrondie à la seconde) relie le Méridien de l'Observatoire de Paris, axe de symétrie du Bâtiment de Perrault (1613-1688) son architecte, au Méridien de Greenwich, établi par Airy (1801-1892) au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, méridien international de 1884 à 1967. En 1787, le méridien de référence, à Greenwich, était celui mis en place par Bradley pour son grand secteur mural, conservé en place au *Royal Observatory* de Greenwich. Ces deux derniers méridiens sont distants de 19 pieds anglais, soit un peu moins de 6 mètres. Le méridien de Bradley et celui de Paris sont les références cartographiques des deux pays depuis les opérations menées au cours du XVIII<sup>e</sup> siècle.

A noter que, sur une distance dépassant 77 000 pieds, la différence des résultats de 1787 atteint une dizaine de pieds seulement et que, sur les angles, les écarts sont de l'ordre de quelques dizaines de



Dessin représentant le cercle de Borda, disposé pour les observations azimutales, extrait de l'*Astronomie populaire* d'Arago (Collection particulière).





**Dessin représentant le cercle de Borda, disposé pour les observations zénithales, extrait de l'*Astronomie populaire* d'Arago** (Collection particulière).

secondes de degré. Quant au petit cercle français d'un pied de diamètre, il avait permis d'obtenir les angles à la précision de la seconde, tandis que les quarts-de-cercle la donnaient à une fraction de minute de degré.

A la même époque revoit enfin le jour, dans la foulée des événements du moment, la proposition d'unifier les mesures. Le sujet est pendant depuis plusieurs siècles et même Picard, à la fin du XVII<sup>e</sup> siècle, avait renoncé. Les premières propositions sont examinées au début de 1790; des contacts sont pris avec la Grande-Bretagne, et des échanges ont lieu jusqu'en mai. Mais le Parlement britannique est dissout en juin et, de ce fait, les projets d'études communs, entre la *Royal Society* et l'Académie des sciences, sont abandonnés. En France, tout se finalise rapidement en 1791: le nouveau système sera décimal et fondé sur le mètre, nou-

velle unité des mesures de longueur, qui doit représenter la dix-millionième partie du quart du méridien terrestre. Ce choix nécessite de connaître cette dernière quantité et, en dépit des deux mesures déjà effectuées en France, il est décidé de faire entreprendre une nouvelle opération et, cette fois, d'un niveau de la mer à l'autre.

Cassini IV est choisi en raison des opérations menées par les astronomes de sa famille et, également, en conséquence du succès de la récente campagne Paris-Greenwich. Louis XVI le reçoit la veille même du jour de la fuite à Varennes (22 juin 1791). Le cercle répétiteur a fait ses preuves; pourtant Cassini IV, Méchain et Borda entreprennent une série d'observations pour contrôler son emploi aux mesures astronomiques lesquelles n'étaient pas l'objet du raccordement. Le manuscrit des Archives de l'Observatoire de Paris, qui en rend

compte, est intitulé "Observations / des hauteurs Méridiennes du Soleil et des Etoiles / faites à L'Observatoire Royal / Avec les nouveaux Cercles de Mr Le Chevalier de Borda".

Dans un premier fascicule se trouve une petite table de correspondance entre les 360 degrés et les 400 grades (de nos jours les gons) qui divisent le cercle de  $2\pi$ . Suivent les mesures, comparatives entre un grand quart-de-cercle, le "mobile" de 6 pieds et un ensemble de cercles répéteurs de 12, 15 et 16 pouces\* de diamètre. Le document relève de plusieurs écritures, mais on note principalement celle de Cassini IV. Bientôt les observations sont menées à des cercles numérotés I, II, III. Il s'agirait donc de ceux que Lenoir construit et qu'il remet à l'Observatoire à mesure de leur achèvement.

Les observations sont effectuées au cours des années 1790, 1791, 1792. La synthèse pour les sept étoiles du programme, observées du 30 juin au 16 septembre 1791, est rédigée par Cassini IV qui commente et précise que "l'usage des nouveaux cercles [...] m'a mis dans le cas d'obtenir des résultats encore plus précis [...]". La conclusion est sans appel, en astronomie comme en géodésie, elle avantage le cercle répétiteur par rapport au grand quart-de-cercle de comparaison.

L'instrument nouveau est donc en mesure d'être employé, seul, pour l'opération géodésique projetée. Pour la mener à bien sont d'abord pressentis, outre Cassini déjà mentionné, Méchain et Legendre, artisans de la campagne de 1787. Les événements qui s'annoncent, au moment de sa mise en œuvre, sont tels que Cassini IV se récusé. Il en est de même, pour d'autres raisons sans doute, de Legendre, mais il collaborera étroitement avec les hommes de terrain par ses travaux mathématiques. Delambre (1749-1822) est alors désigné pour les remplacer, Méchain ayant accepté la mission.

## Le Mètre de Méchain

\* La nature du pouce n'est pas précisée. S'il s'agit du pouce (français) il vaut, comme le Zoll (allemand), 2,71 cm; l'inch (britannique) vaut 2,54 cm.



## et Delambre

Tous les détails de la mesure de la Méridienne de France se trouvent dans les trois volumes de "Base du Système métrique décimal..." publiés, respectivement en 1806, 1807 et 1810. Ils se trouvent aussi dans les manuscrits de l'opération remis par Delambre, en deux temps, pour être conservés à l'Observatoire de Paris, alors sous la responsabilité du Bureau des longitudes qui le gère depuis 1795. L'opération de la Méridienne de France débute en 1792. A Delambre revient la partie nord, de Dunkerque à Rodez, où les observateurs disposent des travaux antérieurs. Il s'agit, dans certains cas, de retrouver et employer les mêmes sommets et, si possible, d'établir des triangles mieux conformés pour la mesure de certains angles.

Méchain se voit confier la partie sud, de Rodez à Barcelone. Il s'agit d'une zone pour partie montagneuse, non encore

explorée pour une large part et où les meilleurs triangles sont à rechercher. La tâche implique deux nations; son intérêt réside en outre dans le fait que chaque extrémité se trouve au niveau zéro constitué par le bord de mer. Au nord il s'agit du Pas-de-Calais souvent objet de mesures depuis un siècle. Au sud c'est la Méditerranée et l'on envisage d'atteindre les Baléares, en sorte que la mesure ait pour milieu le parallèle de 45° qui passe au nord de Bordeaux. Delambre, en dépit des difficultés du temps avec interruption des opérations puis leur reprise, parvient rapidement à Rodez. Les travaux de Méchain sont ralentis au point qu'en 1795, un "Mètre provisoire" est fixé, se fondant sur la mesure de Lacaille. Le ralentissement est dû pour partie à un accident survenu à Méchain et à un séjour qu'il fait en Italie où il laisse, selon Delambre, son cercle répétiteur divisé en 360°; il y demeure actuellement introuvable.

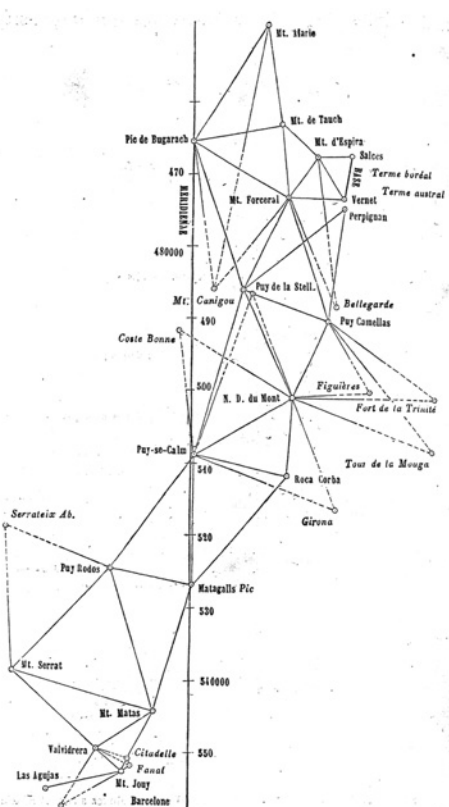
L'opération de Méchain comprend des triangles fondamentaux, observés au cercle de Borda, et des triangles complémentaires observés au graphomètre à lunette, emporté également pour s'assurer rapidement de la faisabilité des visées au sol. Une soi-disant "erreur de Méchain" – c'est lui qui le croit – mine celui-ci depuis qu'il a effectué des mesures en deux points de Barcelone, au Mont-Jouy et à l'Hôtel Fontana de Oro. Delambre, en dépit de la correspondance que lui adresse Méchain, ne semble que très peu affecté, d'autant qu'il a constaté – sur ses propres mesures – des écarts du même ordre de grandeur, lesquels seront confirmés, par Mudge (1762-1829) en Grande-Bretagne, dans des opérations similaires.

La campagne en vue de la détermination de la longueur du mètre ne s'achève réellement qu'en septembre 1798 quand Méchain rentre à Paris. Son opération géodésique lui a permis d'effectuer des mesures, en Espagne jusqu'au triangle Mt Matas-Valdivrera-Mt Jouy pour la partie fondamentale, avec pour derniers triangles complémentaires Valdivrera-Mt Jouy-Tour Castel de Fels qui est grand et un autre de très petit angle à Valdivrera, d'où sont visés dans Barcelone la Citadelle et le Fanal (l'italique indique qu'il ne s'agit pas d'un point fondamental de référence). L'un de ces derniers lui a causé beaucoup de soucis, ce qui explique aussi son retour tardif. Les experts étrangers et français assemblés, qui attendent ce retour, sont répartis en plusieurs commissions. Chacune s'emploie aux vérifications de l'ensemble des données et en tire conclusion au printemps 1799. La longueur du "Mètre définitif" est alors fixée à 3 pieds 11.296 lignes, alors que le "Mètre provisoire" avait été établi à 3 pieds 11.44 lignes, soit avec un écart de l'ordre de trois dixièmes de millimètre.

Fallait-il mener une telle opération pour une différence si minime? N'aurait-on pu choisir, simplement, la demi-toise puisqu'il était apparu depuis longtemps que la toise, ou ses équivalents d'autres pays, était d'une longueur double de ce qu'il était commode d'employer pour les mesures courantes? Dans l'un ou l'autre cas, le nouvel étalon de longueur



Partie septentrionale de la triangulation confiée à Méchain en 1792; dessin extrait de l'*Astronomie populaire d'Arago* (Collection particulière). Les parties en pointillé correspondent aux triangles complémentaires.



Partie sud de la triangulation confiée à Méchain en 1792, s'étendant du Mont Alaric à Barcelone; dessin extrait de l'*Astronomie populaire d'Arago* (Collection particulière). Les noms en italiques correspondent à des sommets de triangles non fondamentaux.

n'aurait pas répondu au vœu d'universalité souhaité et l'on comprend, dès lors, que ce caractère – outre celui beaucoup plus fondamental de la décimalisation du système – primait les autres.

## Méchain, Arago, Biot et les autres

La longueur du mètre étant fixée, l'unité de masse, à l'époque on dit le poids, s'en trouvait déduite; les nouveaux étalons, fabriqués avec grand soin par Lenoir, sont contrôlés et bientôt remis solennellement aux autorités. Mais que devient Méchain? Il vit un drame secret, si bien que, lorsque le Bureau des longitudes envisage la prolongation de la Méridienne jusqu'aux Baléares, il revendique et obtient de retourner en Espagne.

Méchain repart le 28 avril 1803 afin de terminer le projet pour lequel son collaborateur, Tranchot, avait mené des opérations de reconnaissance lors du premier voyage. Méchain effectue des mesures d'angles de quelques triangles; le dernier relie Lleberia, Saint-Jean et Mont-Sia. Mais une épidémie survient, emportant de nombreuses personnes. Méchain lui-même est atteint et, hébergé chez le baron de La Puebla, il décède le 20 septembre 1804 à Castellon de La Plana.

Pendant cette campagne Méchain a poursuivi sa correspondance avec Delambre, lui faisant part à demi-mots de ce qu'il croit être une erreur de sa part. Tout s'éclairera pour Delambre quand, après le décès de Méchain, il disposera des documents qui lui sont alors remis pour publication. Quand il rédigera les trois volumes consacrés au sujet, Delambre les prendra en compte.

C'est ce qui ressort de la lecture des volumes, publiés sous les noms de Méchain et Delambre, comme de l'ensemble des documents réunis qu'il a soigneusement étudiés et commentés. Ce dernier a traité à part un ensemble de lettres de Méchain qui a fait l'objet d'un inventaire du temps de la direction de Le Verrier (1811-1877) à la tête de l'Observatoire de Paris. Cet ensemble porte le cachet "Observatoire impérial". Peut-être même a-t-il, antérieurement,

été examiné par Arago et Biot à l'occasion de la prolongation de la Méridienne de France, interrompue en 1804.

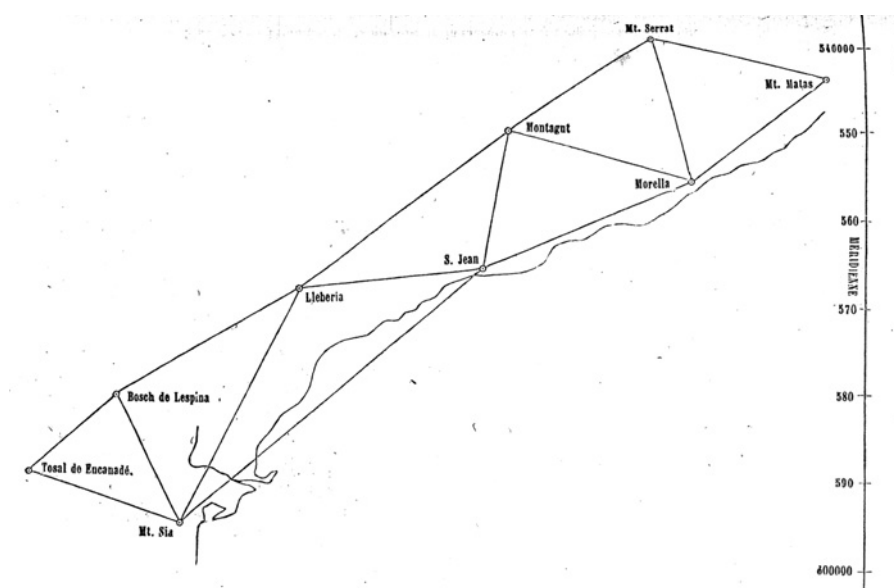
Cette correspondance a été depuis étudiée à différentes reprises, par Bigourdan (1851-1932) à l'occasion de ses articles de 1900, par Fayet (1874-1967) qui, l'ayant empruntée, a remis une collection incomplète en 1952, par Levallois (1911-2001) pour son ouvrage traitant de 300 ans de géodésie française, par A. Ten à l'occasion d'une Action intégrée franco-espagnole remontant à 1989. Plus récemment, et à l'occasion de son incroyable parcours à bicyclette de la Méridienne de France, cette correspondance a été de nouveau examinée, cette fois par K. Alder, pour son ouvrage "The measure of all things" paru en 2002.

Serait-ce la lecture de cette correspondance, ou ce qu'en aurait dit Delambre, qui aurait incité le Bureau des longitudes à faire reprendre l'opération au moment où paraît (1806) le premier volume de Méchain et Delambre? Quand sort le deuxième volume (1807) l'opération Biot-Arago n'est pas achevée. Elle le sera en 1808, avant que ne paraisse le troisième volume (1810). Dans celui-ci, Delambre fait largement état des résultats obtenus par Arago et Biot, également ceux de 1787, ainsi qu'une étude portant sur plusieurs valeurs de l'aplatissement terrestre.

Delambre y développe à cette occasion un ensemble de considérations conduisant à confirmer le caractère illusoire de toute mesure, caractère déjà apparu au moment des premières décisions.

La longueur du mètre, issue des mesures en 1799, comme de toute autre opération du même type, est une combinaison de différents facteurs: les graduations des cercles divisés avec leurs qualités et leurs défauts, les anomalies de la verticalité contrôlée au fil à plomb, la longueur des règles de Borda employées par Delambre dans la mesure des bases de la triangulation, la dilatation du thermomètre bi-métallique qu'elles constituent, leurs éventuelles déformations et défauts d'alignement, les erreurs de lecture des angles, des heures des horloges, des graduations des règles,... Il est à noter que même parmi ceux qui, plus tard, mèneront des opérations similaires comme l'arc le plus long mesuré au centre de l'Europe au XIX<sup>e</sup> siècle, peu se sont aventurés à déterminer et proposer une nouvelle longueur pour le mètre, issue de leurs mesures.

Tous avaient compris qu'en fixant arbitrairement cette longueur à 3 pieds 11.296 lignes parmi d'autres valeurs possibles, il avait bien fallu se rapporter à un étalon antérieur et qu'en fait la longueur du mètre représentait une fraction de la "Toise de l'Académie". Les mètres de



Partie sud de la triangulation exécutée par Méchain, lors de son second voyage en Espagne en 1803/04, s'étendant du Mont Serrat au Mont Sia ; dessin extrait de l'*Astronomie populaire* d'Arago (Collection particulière).



© J. Alexandre

français, Firmin-Didot, Paris, 1791.  
 Quinn T.T., *The metre and the pendulum*, *Nature*, vol. 348, 1990.  
 Roy W., *An Account of the Trigonometrical Operations...*, *Philosophical Transactions*, London, Vol. LXXX, p. 111-271, 1790.  
 Ten A., *L'Académie des sciences et les origines du Système métrique décimal*, in "Mètre et Système métrique" (Paris, Journées 1991), Débarbat S. et Ten A. Ed., Observatoire de Paris et Universidad de Valencia, p.15-31, 1993.  
 Ten A., *Medir el Metro*, Universitat de València-C.S.I.C., Valencia, 1996.

## Contact

Suzanne Débarbat  
 Observatoire de Paris  
 SYRTE/UMR 8630  
 Bureau des longitudes  
 mail : Suzanne.Debartat@obspm.fr

## ABSTRACT

**Key-words:** Borda, Cassini, Delambre, Lacaille, Langlois, Lenoir, Legendre, Méchain, Repeating circle, Borda circle, quadrant, meridian line, triangulation

*At the end of the seventeenth century, the French Picard creates the geodetic astronomy, from the method experienced by Snel in the Low Countries. He measures a meridian arc along the Paris Observatory meridian line and designs instruments for this purpose. The same method, of course with instruments better made, will be used during the eighteenth century with a first triangulation (1683-1718), a second one (1739-1740), and the general map of France, the first such scientifically made at the level of a country. Méchain, Legendre and Cassini will pursue the work, having in mind a european operation, by the linkage (1787) of the Paris and Greenwich meridian lines. Méchain will be, with Delambre, in charge of a third operation for the determination of the length of a new unit (the Mètre, 1799) to be a base for a decimal metric system for weights and measures, decided in 1790 to be, in 1960, the Système International d'unités (the SI).*

Dans la partie rouge, un repère de triangulation, utilisé ultérieurement par l'Institut Géographique National.

- Lenoir fabriqués, comparés, et entre lesquels le Mètre des Archives sera choisi en 1799, devenant en 1875 la référence des pays adhérents de la Convention du Mètre, ne sont que des approximations de la dix-millionième partie du quart du Méridien terrestre.

Les restes de Méchain peuvent demeurer tranquilles et sereins puisque le mètre, fraction de la longueur d'une barre de fer à 16.5° ayant servi de référence, a eu depuis des représentations qui lui sont demeurées cohérentes dans la limite des erreurs d'appréciation. ●

## Bibliographie

Archives de l'Observatoire de Paris, C 5-27, D 2-19, D 2-41, D 5-6, D 5-7, D 5-12/13, D 5-42, E 2-9, E 2-13, E 2-19, E 2-19bis, Ms 1053.  
 Alder K., *The Measure of All Things*, The Free Press, New-York, 2002.  
 Aubert P., *Borda et le Système métrique*, Colloque "Bicentenaire de la mort du Chevalier de Borda" (Dax, avril 1999), Bulletin de la Société de Borda, n°456, p. 49-58, 2000.  
 Bellec F., *Borda et la navigation scientifique*, le rendez-vous avec la Lune, Colloque "Bicentenaire de la mort du Chevalier de Borda" (Dax, avril 1999), Bulletin de la Société de Borda, n°456, p. 5-30, 2000.  
 Bigourdan G., *La prolongation de la Méridienne de l'Observatoire...*, Bulletin astronomique, vol. XVII, p. 348-368, 390-400, 467-480, 1900.  
 Biot J.-B. et Arago F., *Recueil d'observations astronomiques...*, Vve Courcier, Paris, 1821.

Borda J.-C. (de), *Description et usage du cercle de réflexion...*, (1<sup>re</sup> ed. 1787), Paris, Firmin-Didot, 4<sup>e</sup> ed., 1816.  
 Débarbat S., *Coopération géodésique entre la France et l'Angleterre à la veille de la Révolution Française: échanges techniques, scientifiques et instrumentaux*, in "Echanges d'influences scientifiques et techniques entre pays européens de 1780 à 1830", Congrès du Comité des Travaux Historiques et Scientifiques (Paris, avril 1989), Editions du CTHS, p. 47-76, 1990.  
 Débarbat S., *Borda et l'astronomie*, Colloque "Bicentenaire de la mort du Chevalier de Borda" (Dax, avril 1999), Bulletin de la Société de Borda, n°456, p. 31-48, 2000.  
 Débarbat S., *Arago, les Baléares et le Mètre*, Colloque "Arago" (Perpignan, novembre 2003), à paraître dans les Actes.  
 Delambre J.-B., *Grandeur et Figure de la Terre*, Ed. par Bigourdan G., Paris, Gauthier-Villars, 1912.  
 Cassini J., *De la grandeur et de la figure de la Terre...*, Paris, Imprimerie Royale, 1720.  
 Cassini C.-F., *La Méridienne de l'Observatoire... vérifiée...*, Paris, Guérin, 1744.  
 Cassini J.-D., Méchain P.-A. et Legendre A.-M., *Exposé des opérations...*, Paris, sd, prob. 1790.  
 Levallois J.-J., *Mesurer la Terre - 300 ans de géodésie française*, Association Française de Topographie, Paris, 1988.  
 Méchain P.-A. et Delambre J.-B., *Base du Système métrique décimal...*, Paris, Baudouin, 3 vol., 1806-1807-1810.  
 Prony (Riche de) M., *Description des opérations...*, traduit de l'anglais en



## La géodésie française et mondiale : une évolution considérable en 25 ans

■ Michel KASSER

*Les évolutions de la Géodésie ont été considérables durant les dernières décennies, ceci étant essentiellement dû à la possibilité d'utiliser les techniques spatiales dès les années 60. C'est grâce aux progrès de la radio-astronomie géodésique (VLBI), de la télémétrie laser sur satellites, de DORIS et du GPS que la précision de la référence géométrique mondiale a gagné plus qu'un facteur 1000 dans cette période. Et c'est ce qui a permis de définir dans beaucoup de pays, dont la France, une référence géodésique dont l'extraordinaire précision a conduit à un changement complet dans la façon d'utiliser les références, et à une ré-appropriation de ces techniques par les géomètres.*

### La géodésie : une évolution devenue très rapide

La Géodésie, au sens français du terme, c'est l'étude et mesure des dimensions de la Terre, de sa rotation dans l'espace, et de son champ de pesanteur. Il faut bien différencier ce terme de celui de "Geodesy" en littérature anglophone, terme qui pour beaucoup d'auteurs recouvre presque l'intégralité des techniques de lever. Nuance sérieuse...

C'est une science où la France a toujours été très active, sinon pionnière, avec par exemple la mesure du rayon de la Terre par Picard au XVII<sup>e</sup> siècle, la mesure de l'aplatissement de la Terre par Bouguer, La Condamine, Maupertuis, ... au XVIII<sup>e</sup> siècle, la mesure d'un arc de méridien pour la définition du mètre par Delambre et Méchain pendant la Révolution Française, etc.

Mais jamais la Géodésie n'a évolué aussi rapidement que dans le dernier quart de siècle, depuis la naissance de l'AFT (y a-t-il un lien ?). Et dans ces évolutions récentes, la France a su tenir une place tout à fait significative.

Quelles évolutions devons nous rappeler ici ? Certaines sont connues de tous, comme le GPS. Certaines devraient l'être, comme les nouvelles références de France (RGF 93), d'Europe (EUREF), et du monde (ITRF). Et certaines par contre sont très peu connues, par exemple les outils de base que sont la radio-astronomie interférométrique géodésique (VLBI), la télémétrie laser sur satellites, DORIS, et les études du champ de pesanteur par méthodes spatiales.

Nous allons donc passer en revue certaines de ces évolutions, d'abord dans certaines techniques de base, puis dans la définition des systèmes de référence. Nous pourrions ainsi en apprécier l'importance majeure.

### La radio-astronomie interférométrique géodésique

Cette technique est dénommée par le sigle VLBI (pour *Very Long Baseline Interferometry*), terme d'usage peu explicite mais qui est d'emploi classique chez les géodésiens. Elle exploite la détection du bruit radio (extrêmement faible) émis par des radio-sources extra-galactiques, que l'on peut capter avec de très grandes antennes de radio-astronomie (la plus grande, à Arecibo, est une parabole de près de 300 m de diamètre, et beaucoup d'autres font plus de 50 m). Lorsqu'on corrèle les signaux (bruits électroniques complètement aléatoires) captés dans deux antennes, le retard temporel à apporter à l'un des deux pour que la corrélation cesse d'être à peu près nulle est déterminé par essais autour de la valeur attendue (valeur basée sur la connaissance approchée de la géométrie de la Terre, de sa rotation, de la position des antennes). La VLBI apporte des données essentielles pour l'analyse de nombreux phénomènes :

- Cartographie à très haute résolution des radio-sources observées, ce qui explique l'intérêt des radio-astronomes dans ces opérations,
- Longueur et orientation du vecteur reliant les centres de phase de chaque antenne, et ainsi mesure de la rotation terrestre.

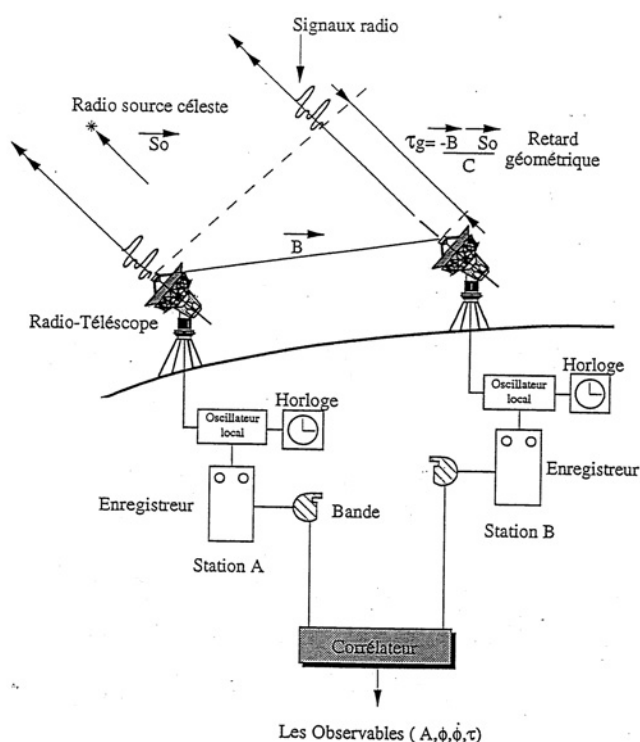
Le géodésien peut donc en tirer un moyen de positionnement, l'ensemble des centres de phase des antennes de VLBI formant un polyèdre extrêmement précis (quelques mm), parfaitement orienté dans l'espace, pour chaque session de 24 heures de mesures. Mais si les observatoires sont très distants les uns des autres (plusieurs milliers de km), ce qui est presque toujours le cas actuellement, il n'est pas question de les relier par un câble pour transférer les signaux et permettre cette corrélation. On procède alors à l'échantillonnage numérique de chaque signal et au stockage sur support magnétique. Idéalement il faudrait échantillonner avec la même horloge, ce qui est là aussi impossible, et en pratique on le fait avec des horloges différentes, mais presque parfaitement synchrones (masers à hydrogène), grâce à leurs extraordinaires stabilités (qui avoisinent  $10^{-16}$ , soit 0.1 cycle en 24 heures à une fréquence de 10 GHz, de sorte que tout se passe comme s'il s'agissait de la même horloge).

Pour le géodésien, le positionnement obtenu ainsi est ce que l'on peut trouver de plus précis : le centimètre à l'échelle de la Terre. La VLBI permet d'obtenir un extraordinaire réseau mondial de référence, certes très onéreux, mais les moyens nécessaires sont partagés avec de nombreux autres scientifiques. De plus, les directions de certaines radio-sources ont été trouvées particulièrement stables : elles définissent le meilleur référentiel d'orientation absolue disponible (précision meilleure que 0.001").

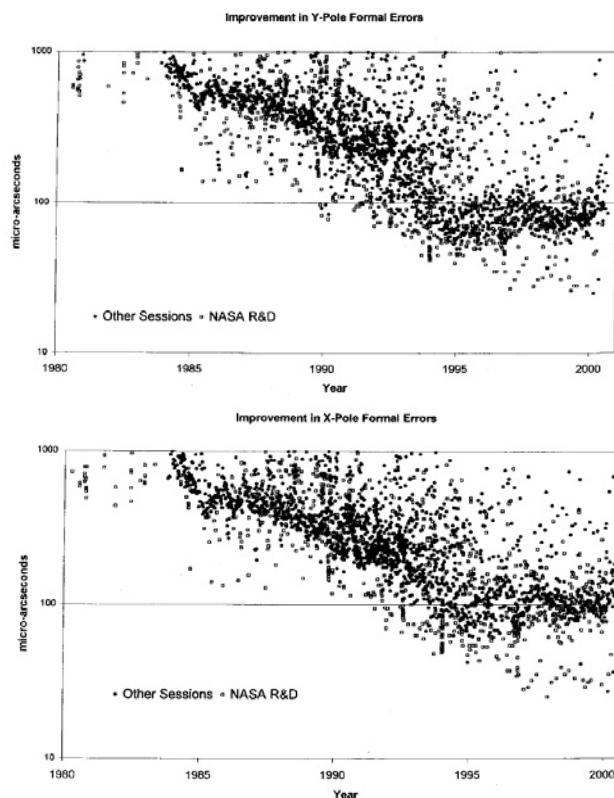
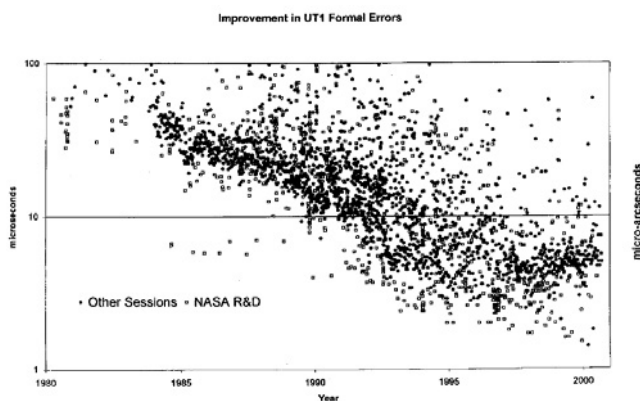


■ ■ ■ Ce développement technologique impressionnant a largement bénéficié des développements de matériels informatiques, car la VLBI exige des stockages de très grandes quantités de données: si les Giga-octets ne nous impressionnent plus maintenant, ce n'était pas le cas dans les années 80, et le plus clair de la dépense pendant longtemps était lié au transport de plusieurs quintaux de bandes magnétiques entre les observatoires et le centre de corrélation pour chaque session. Et c'est la communauté VLBI qui a eu le rôle essentiel dans le développement du GPS précis, en considérant ses signaux cryptés comme des signaux aléatoires et en les traitant comme le bruit issu des radio-sources: ainsi le GPS, système militaire de précision métrique en temps réel, est-il devenu aussi un outil capable de donner une mesure différentielle millimétrique en temps différé.

## Le principe de la VLBI (N. Rebai, 1990)



**Les évolutions temporelles de 3 paramètres déterminés par VLBI dans les dernières années (Temps Universel, qui mesure la rotation de la Terre, X et Y du pôle): la précision de la VLBI est stationnaire depuis 1995, mais à un niveau impressionnant (100  $\mu$ s d'arc, soit 3 mm pour le point où l'axe de rotation terrestre mesuré par la surface de la Terre).**



## La télémétrie laser sur satellites

Ce procédé de géodésie spatiale qui a démarré dans les années 60 mais n'est monté en puissance qu'à la fin des années 70 consiste à mesurer la distance entre une station terrestre donnée et un satellite (artificiel en général, mais la Lune fait aussi partie des cibles utilisées) équipé de rétroreflecteurs, ainsi que l'instant précis où cette distance est obtenue. Les satellites artificiels spécialement lancés pour cette technique (Lageos I et II aux USA, Starlette et Stella en France, Ajisai au Japon, Etalon en Russie,...) sont des sphères très denses à la surface desquelles ont été fixés les réflecteurs, et ils sont entièrement passifs; leur grande compacité fait que leur trajectoire est liée presque uniquement aux forces gravitationnelles (il y a toujours d'autres forces comme la pression de radiation ou la traînée atmosphérique liée aux rares molécules encore présentes sur ces orbites, mais elles ont peu d'effets sur ces satellites très compacts). Donc même avec des mesures sur seulement certains arcs de trajectoire (il n'y a qu'une trentaine de stations laser dans le monde, réparties de manière très inhomogène), il est possible de calculer une orbite extrêmement précise. De ces orbites, on peut déduire des éléments importants pour le calcul du champ de pesanteur terrestre (toute irrégularité de trajectoire est un indice d'anomalie locale de la gravité), pour la mesure de la rotation terrestre, et enfin un excellent positionnement mondial des stations laser (1 à 2 cm environ), formant ainsi un autre polyèdre extrêmement précis, dont toutefois la référence n'est pas un ensemble d'étoiles fixes, mais le centre de gravité de la Terre. Si la VLBI a été pratiquée sous forme de stations mobiles, mais de manière peu courante à cause de la taille de l'antenne requise, la télémétrie laser s'est beaucoup pratiquée dans des stations relativement faciles à déplacer (2 camions). Toutefois dans ce domaine, c'est la France qui a réalisé la percée la plus audacieuse, avec la station laser "ultra-mobile" (300 kg en 10 colis),



conçue par l'OCA et l'IGN dans les années 90 avec le soutien du CNES et de l'INSU. Cette station, de loin la plus compacte jamais développée, est de ce seul fait d'un coût de fonctionnement bien plus réduit que les autres stations mobiles, ce qui a permis de l'installer dans des zones particulièrement mal accessibles (sites choisis pour étalonner les radars des satellites océanographiques Topex-Poseidon et Jason).

La technique laser, qui est très peu limitée par notre habituelle méconnaissance de l'indice de réfraction de l'atmosphère, souffre de la mauvaise répartition géographique des stations actuelles (p. ex. impossibilité de mesurer lorsqu'il y a des nuages), ainsi que de divers biais instrumentaux très difficiles à supprimer au niveau de chaque station terrestre.



**Un satellite laser classique : Lageos 1.**

La télémétrie laser sur la Lune est quant à elle une technique privilégiée pour améliorer notre connaissance sur la gravitation



**Les trois stations laser de Grasse tirant simultanément : Laser Lune, Laser satellite fixe et laser mobile**

et pour tester au mieux des théories générales comme celle de la relativité. Mais elle exige de véritables prouesses techniques, compte tenu du nombre très réduit de photons utiles récupérés à chaque tir : en ce domaine aussi la France occupe une place centrale, la station Laser Lune de l'OCA à Grasse est la station la plus performante du réseau mondial depuis plus de quinze ans.

## Un autre système capital de la géodésie spatiale actuelle : DORIS

Pour mener à bien les missions de radar océanographique (Topex-Poseidon, Jason,...) qui exigeaient une mesure extrêmement précise d'orbites, le CNES a été à l'origine d'un nouveau système spatial original, baptisé DORIS, et dont le réseau au sol a été déployé à la fin des années 90, et entretenu depuis lors, par l'IGN. Une cinquantaine de points répartis aussi uniformément que possible à la surface du globe ont été équipés de balises émettant sur deux fréquences extrêmement stables (400 MHz et 2GHz). Certaines stations sont communes avec des stations de GPS, de télémétrie laser satellites ou des stations VLBI et ont ainsi des coordonnées mondiales très précises. A bord d'un satellite est embarqué un récepteur qui mesure, pour chaque balise émettrice, l'effet Doppler sous lequel le signal est reçu et donc la vitesse relative apparente (les premiers satellites équipés ont été SPOT II, puis TOPEX-POSEIDON, puis SPOT III et IV, puis Jason, Envisat, SPOTV, ...). Après les calculs effectués par le CNES, on en déduit l'orbite du satellite porteur avec une excellente précision (pour 10 cm prévus, on atteint actuellement 1 à 2 cm), et en sous-produit, on peut améliorer considérablement notre connaissance du champ de pesanteur terrestre grâce à l'extrême qualité des orbites obtenues. Second sous-produit appréciable, un positionnement absolu des balises à mieux que 2 cm est obtenu sur l'ensemble du réseau. Le polyèdre actuellement obtenu, avec ses 54 sommets répartis de façon très régulière, entre désormais dans le calcul global de la référence terrestre ITRF dont nous parlerons plus loin.



**La station Laser Ultra Mobile, la plus petite du monde, sur le site d'Ajaccio en 2000.**

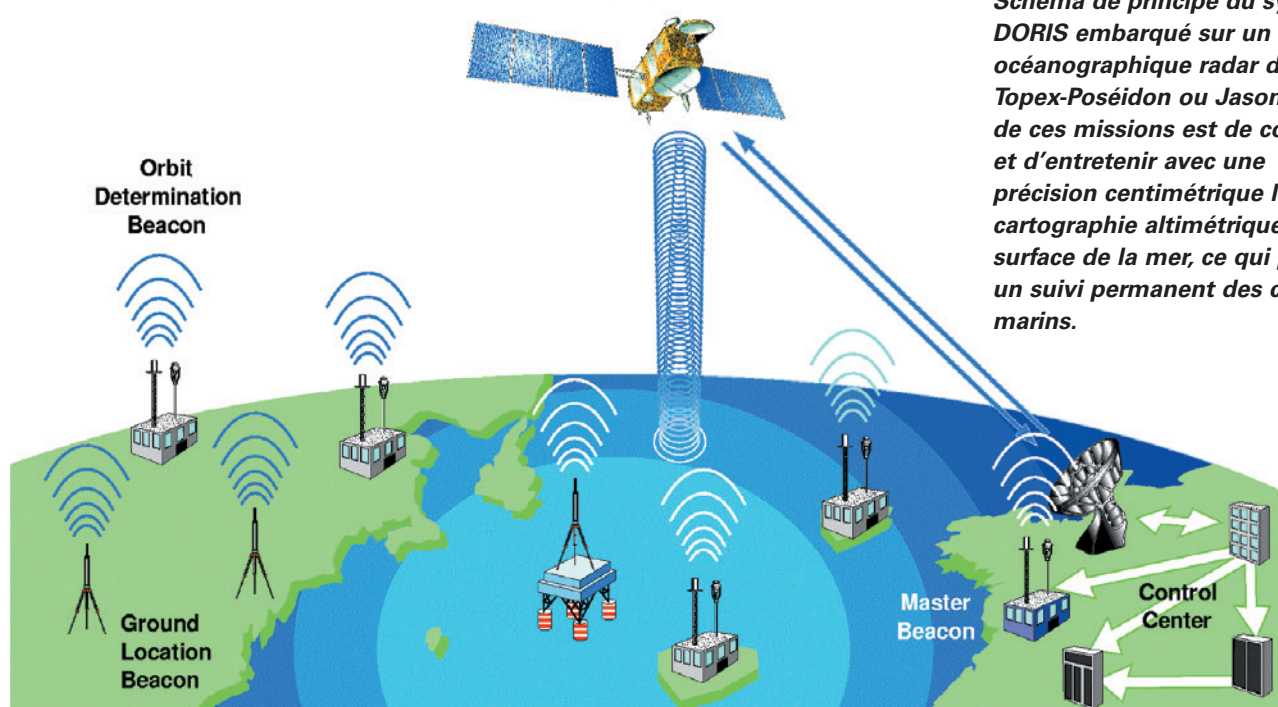
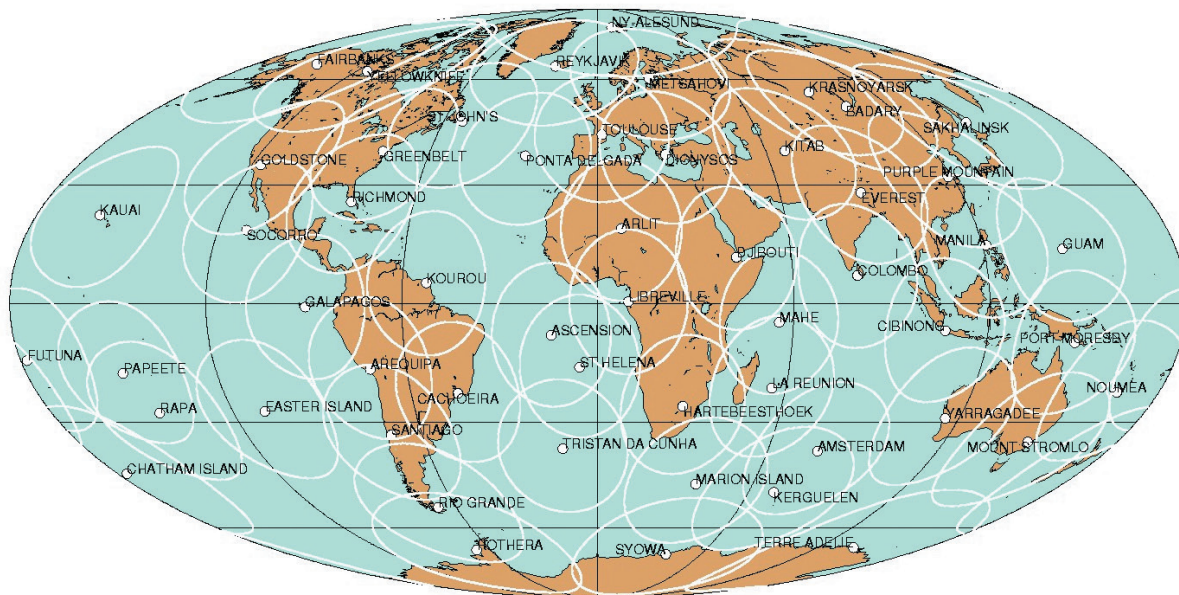


## Le GPS

C'est le système le mieux connu, et il n'est pas utile de le détailler ici une fois de plus. Mais rappelons quand même les épisodes importants de son histoire : lancements des premiers satellites, idée issue des spécialistes de VLBI de procéder à des mesures sur la phase des signaux émis (années 80). Constellation opérationnelle au début des années 90, avec un important retard dû à l'accident de la navette Challenger en 86, importants développements industriels permettant l'emploi du GPS par les géodésiens puis par les géomètres, regroupement des efforts des observatoires géodésiques entretenant des stations GPS permanentes du monde entier pour former l'IGS, en 1992. Depuis lors, efforts progressifs de mutualisation des agences géographiques nationales pour mettre à disposition des usagers des

stations GPS permanentes, efforts plus ou moins rapides suivant les pays. Des tentatives pour intégrer le système russe Glonass ont été menées, mais elles ont été freinées par le faible développement de l'ensemble de satellites (10 au lieu de 24). Une avancée significative est par contre prévue pour 2008 avec le lancement de Galileo et ses 30 satellites, ce qui améliorera beaucoup de travail des topographes dans les zones urbaines. Le GPS a surtout été, pour les géodésiens puis pour les géomètres, le premier système de mesure purement géométrique (aucune référence à la verticale p. ex.), avec un modèle d'erreur à caractère mondial et non pas local. En outre, il est apparu alors comme un procédé beaucoup moins cher pour obtenir des points de référence que les méthodes de triangulation classiques, ce qui a rapidement rendu son emploi incontournable. En ce qui concerne les modèles d'erreurs, il faut surtout noter

**L'ensemble des 54 stations DORIS actuelles : on notera leur répartition particulièrement régulière.**

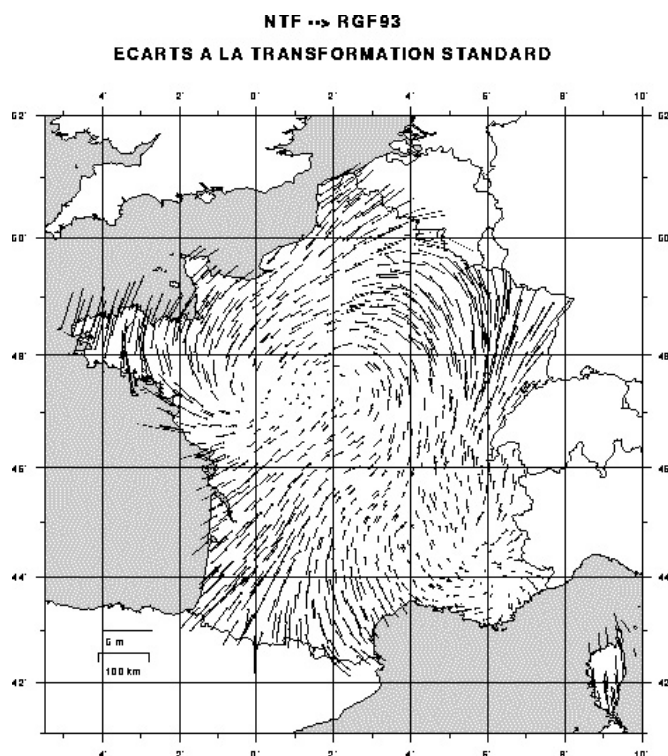


*Schéma de principe du système DORIS embarqué sur un satellite océanographique radar de type Topex-Poséidon ou Jason. Le but de ces missions est de connaître et d'entretenir avec une précision centimétrique la cartographie altimétrique de la surface de la mer, ce qui permet un suivi permanent des courants marins.*

que les géodésies anciennes (triangulations) étaient dotées d'erreurs relatives acceptables (quoique bien évidemment assez importantes), mais d'erreurs absolues considérables, alors que le GPS a été le premier système opérationnel caractérisé par une erreur absolue, et suivant le type de mesures pratiquées, cette erreur peut-être extrêmement faible (par exemple mieux que 1 cm pour des stations GPS permanentes).

*Pendant des siècles et jusqu'aux années 90, les réseaux géodésiques nationaux étaient obtenus par triangulation, avec des mises à l'échelle et des orientations assez difficiles puisque les mesures de distances n'ont pu être effectuées facilement sur grandes distances que depuis les années 70 et que les orientations mettaient en œuvre des mesures astronomiques longues et délicates. De plus les calculs ont dû se faire par blocs plus ou moins grands, selon les moyens de calculs disponibles. L'histoire de la conception globale d'un réseau impliquait, par suite des imperfections des procédés employés et des limitations inhérentes aux anciens moyens de calcul "à la main", des modèles d'erreurs très complexes. Typiquement les coordonnées diffusées en France pour la NTF s'écartaient des valeurs exactes (que l'on aurait obtenues si tout avait été parfait) de grandeurs d'autant plus élevées que l'on s'éloignait de Paris (où était situé le point de référence, le Panthéon), et pouvant atteindre quelques mètres aux extrémités de la métropole. Le référentiel faisant foi n'était donc pas le référentiel théorique, mais celui réellement disponible au travers des bornes observées et de leurs coordonnées publiées. D'où des difficultés sans*

***Cette figure, qui montre les erreurs observées sur environ 1000 points géodésiques de l'ancienne triangulation NTF, mesurées dans les années 90 par GPS, illustre bien les problèmes rencontrés lorsqu'on passe d'une référence ancienne avec une géodésie moderne, où les erreurs sont presque partout indétectables (1 à 2 cm)***



*fin lorsque ces bornes étaient détruites et reconstruites, rien ne permettant de garantir que la re-détermination aurait les mêmes erreurs que la détermination ancienne. On a coutume de présenter les modèles d'erreurs de la NTF sous la forme "1 cm/km", erreur purement relative, sans trop évoquer l'erreur absolue (pouvant donc atteindre plusieurs mètres) sur les coordonnées publiées. Ceci avec une excellente excuse: personne ou peu s'en faut ne s'intéressait à des coordonnées absolues fausses de 5 m à Marseille, mais tous étaient concernés par l'erreur relative entre deux points proches, ici inférieure à 5 cm entre deux points éloignés de 5 km et qui a été jugée tout à fait supportable jusque dans les années 80. (fiche CNIGN° 49).*

## Le WGS 84 et le référentiel mondial de géodésie ITRF

Avec un système purement géométrique et de couverture mondiale, on avait tout intérêt à mettre en place un référentiel unique pour toute la planète. C'est ce qui s'est fait, par étapes, dès la fin des années soixante, le gros du travail ayant réellement commencé dans les années 80, et il s'agit là sans doute de l'avancée la plus importante qui ait été menée dans l'histoire de la géodésie. Actuellement, le référentiel mondial est réalisé et entretenu par un groupe de laboratoires dont l'IGN (laboratoire LAREG) effectue par délégation la synthèse des résultats et publie ainsi la solution officielle (actuellement ITRF 2000). Conceptuellement, sa réalisation peut être décrite sommairement ainsi, même si la logique de calcul est en fait plus complexe:

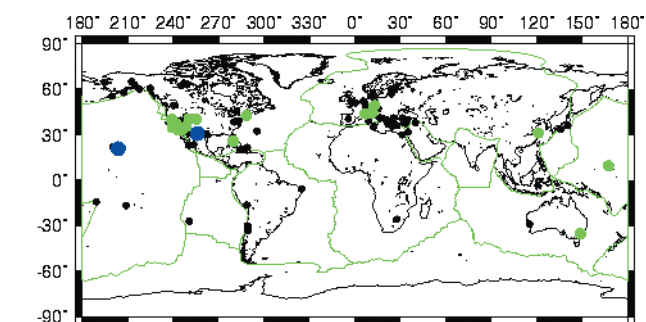
- Les observations de VLBI permettent de créer géométriquement un polyèdre d'antennes réparties dans le monde entier. On en tire d'une part les paramètres décrivant la rotation de la Terre, et d'autre part un jeu de coordonnées formant l'ossature du réseau mondial.
- A proximité de ces antennes sont installés d'autres dispositifs de géodésie spatiale (télémétrie laser sur satellites, GPS, GLONASS, DORIS,...) permettant d'employer les positions d'antennes VLBI pour en déduire avec précision les orbites des satellites employés, et ainsi de déterminer les coordonnées des autres stations observant ces mêmes satellites: une densification considérable est ainsi obtenue, passant de quelques dizaines de stations VLBI à plusieurs centaines de nouveaux points.
- On intègre à ce stade les déformations connues de la Terre (cycles quotidiens des marées terrestres, tectonique des plaques), on peut alors en déduire les coordonnées mondiales et les vitesses des stations (dues aux déformations tectoniques). On forme ainsi ce qu'on appelle l'ITRF (International Terrestrial Reference Frame) et chaque référentiel national, matérialisé par quelques stations fondamentales (télémétrie laser sur satellites, stations GPS permanentes,...). C'est ce système de coordonnées qui est mis à disposition sous le nom de WGS 84 (World Geodetic System 84), en particulier pour les usagers du GPS. Evidemment, comme le GPS est purement géométrique, il convient de spécifier aussi l'emploi d'un ellipsoïde de référence, qui peut être choisi librement certes, mais qui est généralement toujours le même, le GRS 80. La référence Européenne EUREF est extraite de l'ITRF en



■ soustrayant pour l'ensemble des stations les vitesses moyennes: ces vitesses sont pratiquement toutes égales puisque l'Europe forme une seule plaque tectonique. On obtient ainsi des coordonnées fixes pour les stations d'Europe, et c'est sur cette référence qu'on définit les références modernes de tous les pays: en France on obtient ainsi le RGF 93, devenu officiel en 2001.

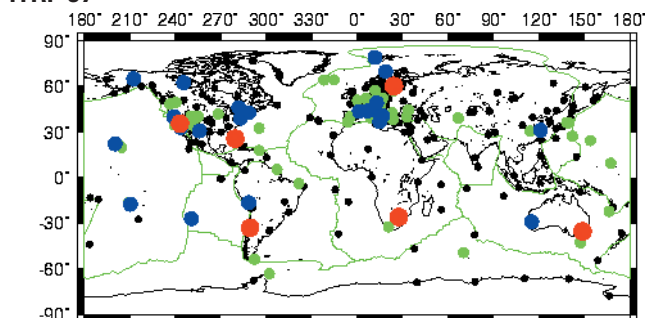
*L'évolution des ensembles d'observatoires géodésiques employés pour calculer la référence mondiale depuis 1988. Le nombre a augmenté considérablement, la précision aussi, la référence mondiale actuelle atteint ainsi une précision du centimètre.*

## ITRF 88



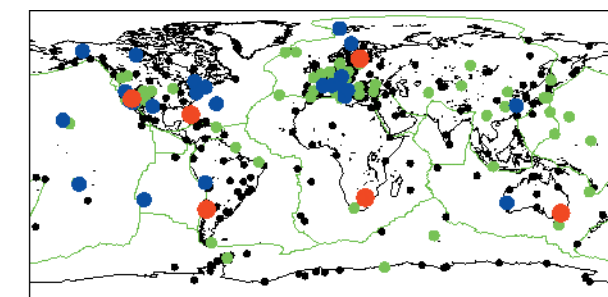
Collocated techniques --> 20 2

## ITRF 97



Collocated techniques --> 49 24 6

## ITRF 2000



Collocated techniques --> 64 24 6

En un quart de siècle la géodésie a complètement changé. Nous avons rappelé ici certaines des avancées majeures, qui pour l'essentiel ont été obtenues grâce aux efforts consentis dans le domaine spatial: actuellement, la géodésie moderne repose entièrement sur des outils spatiaux, et c'est sans doute

là qu'est l'origine de la poursuite d'une forte implication française en géodésie, structurée autour de Groupe de Recherches en Géodésie Spatiale (le GRGS, dont le CNES est un acteur essentiel). De nombreux autres aspects n'ont pas été présentés ici, par souci de concision (p. ex. les travaux remarquables menés par les français et les allemands dans le domaine du champ de pesanteur par méthodes spatiales), mais les points essentiels sont les suivants:

- la géodésie est définitivement spatiale, et donc mondiale,
- elle a progressé énormément en précision, mais il est probable que ce progrès va ralentir, voire s'arrêter (si le sens physique d'un centimètre sur le terrain est clair moyennant quelques précautions, celui du millimètre peut-il encore l'être?),
- la géodésie n'est plus un domaine réservé pour quelques rares spécialistes très pointus, mais pas toujours très convaincants dans leurs explications adressées aux usagers peu avertis. Avec le GPS elle est devenue à la portée de tous, et corrélativement elle devra être maîtrisée de tous les topographes. Elle devra donc être bien mieux connue que par le passé, et un gros effort de publication doit être mené: l'emploi de stations GPS permanentes (le RGP de l'IGN, le futur réseau de l'OGE, etc...), l'arrêt du 16-9-2003 sur les précisions des levés, l'adoption du RGF 93 comme référence géodésique officielle, l'emploi du GPS en matière de nivellement grâce à la grille de correction altimétrique très précise RAF 98, en particulier pour l'entretien du NGF, etc... conduisent de plus en plus les topographes d'aujourd'hui à ne plus pouvoir s'offrir le luxe de "n'y rien comprendre".

L'AFT a accompagné durant toute son existence cet effort soutenu de communication et d'explications sur ces sujets, manifestement pas toujours clairs pour tous. S'appuyant sur ses adhérents, elle poursuivra cet effort, car la géodésie et la topométrie sont de plus en plus fortement imbriquées, et tout laisse à penser que cette situation va perdurer. Bientôt tous géodésiens ! ●

## Contact

Michel KASSER, Directeur de l'ENSG de l'IGN, Directeur Exécutif du GRGS, Président de l'AFT.

6 - 8 avenue Blaise Pascal, Cite Descartes, Champs-sur-Marne  
F 77 455 MARNE LA VALLEE CEDEX 2 - FRANCE

Téléphone: +331 6415 3100, Télécopie: +331 6415 3107

Courriel: michel.kasser@ign.fr

## ABSTRACT

*The evolutions of the Geodesy have been considerable during the last decades, this being mainly due to the accessibility of space techniques since the sixties. The fantastic improvements of VLBI geodetic radio-astronomy, satellite laser ranging, DORIS and GPS have allowed an improvement of more than three orders of magnitude in the precision. This has led to a complete change in the way of use of the references, thanks to the definitions of the extremely precise new geodetic reference frames in most countries. And thus most surveyors have re-appropriated these techniques for their everyday work.*



# Un SIG pour les sapeurs-pompiers de Paris

■ Chef de bataillon Jean-Luc RUBOD - Adjudant Bernard BAULERY - Emmanuel NATCHITZ

*La Brigade des Sapeurs-Pompiers de Paris<sup>1</sup> défend la ville de Paris et les départements de la petite couronne (92,93 et 94) ce qui représente 6,2 millions d'habitants pour une surface de 760 km<sup>2</sup> (8100 hab/km<sup>2</sup>). La brigade se compose de 3 groupements d'incendie comprenant 77 centres de secours pour un effectif d'environ 7000 hommes. En 2003 la brigade*

*a effectuée 428458 interventions soit un départ de secours toutes les 72 secondes. Cette activité représente plus de 10000 changements quotidiens d'états pour les véhicules opérationnels.*

## ■ mots clés

SIG, prévention, aide à la décision

**A**vant l'entrée en service du SIG, la BSPP rassemblait ses informations opérationnelles sous forme cartographique dans un atlas. Celui-ci se compose de 74000 pages en format A2 dessinées et coloriées à la main. Cet atlas est l'outil indispensable des intervenants pour localiser sur le terrain les informations tactiques nécessaires à l'intervention des secours. Il ne s'agit pas de concurrencer les éditeurs de cartes ou plans qui sont des spécialistes dans leur domaine. L'atlas est un plan dépouillé, simple, positionnant l'ensemble des renseignements opérationnels tels que les établissements répertoriés à risques, les 38000 appareils d'incendie, les moyens de secours à demeure (colonnes humides et colonnes sèches), les établissements signalés, et nombre d'autres informations indispensables à la conduite des opérations de secours.

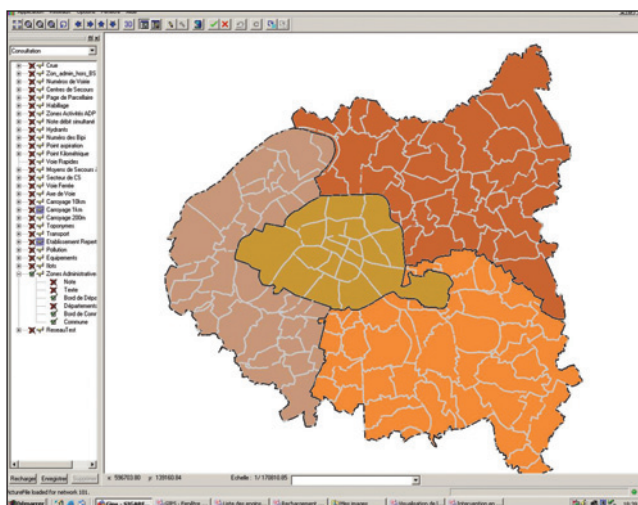
Dans les années 90, l'idée de se munir d'une cartographie numérisée apparaît. Cependant aucun outil proposé à



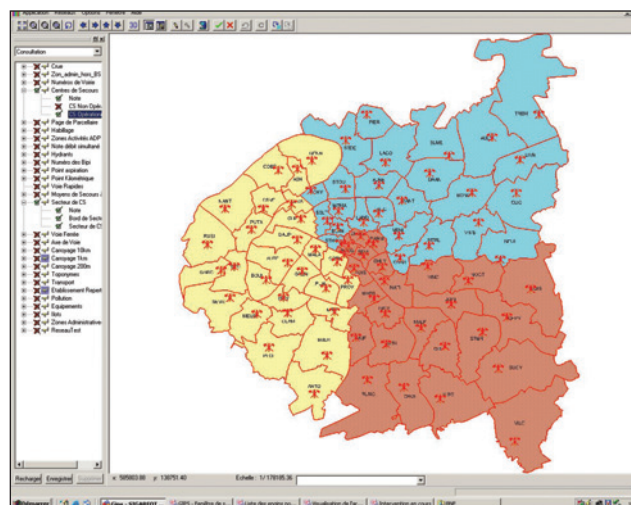
## Système d'Information Géographique Appliqué à la Recherche aux Etudes et à l'Opération

l'époque ne répondait aux exigences de la BSPP à la fois en terme de coût et en termes techniques. En 2001 la société IBM a présenté un nouveau produit séduisant par son concept : un progiciel développable en fonction d'un cahier des charges spécifique. La solution GIPS (Global Interface Pilot System) fait alors son entrée à la Brigade.

Une section système d'information géographique est donc créée au sein du bureau opérations de l'état-major des sapeurs-pompiers de Paris. Encadré par un officier, cette section de compose d'un sous-officier adjoint, d'un sous-officier, d'un gradé développeur et de deux gradés techniciens. Il est important de signaler que tout le personnel de cette section est sapeur-pompier mais a suivi un ensemble d'unités de valeur en géomatique et en informatique.



**Figure 1 :** Etendue géographique du secteur opérationnel de la BSPP (SIGAREO)



**Figure 2 :** Répartition des secteurs par centres de secours (SIGAREO)

(1) BSPP

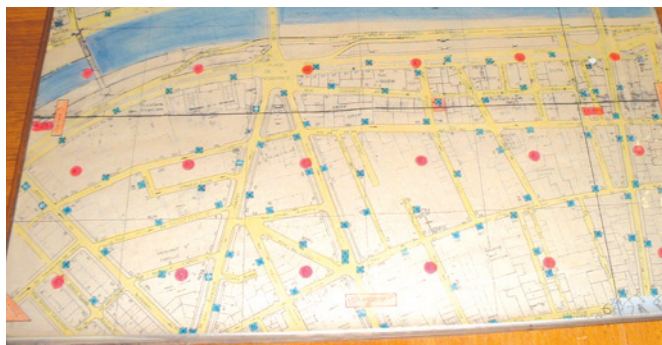


Figure 3 : Ancien atlas (rotring et crayons de couleur)

## Pourquoi créer un SIG pour la BSPP ?

La brigade doit maintenir ses bases d'informations à jours en intégrant constamment de nouvelles données graphiques. Ces données doivent être évidemment compatibles avec l'exploitation des informations déjà existantes.

Un cahier des charges a été rédigé pour expliciter les besoins avec pour principaux objectifs :

- Rénover la production d'atlas (parcellaires)
- Réduire les charges des unités opérationnelles
- Gagner des ressources
- Faciliter le contrôle de l'activité opérationnelle
- Améliorer la pertinence des informations
- Accroître la réactivité des salles de commandement
- Disposer d'outils d'aide à la décision
- Moderniser les processus opératoires
- Réduire encore les délais d'intervention
- Optimiser la couverture opérationnelle
- Argumenter le SIDACR<sup>2</sup>
- Affiner les solutions d'alerte
- Préparer en souplesse l'interaction avec le futur système de traitement de l'alerte SYNTIA2<sup>3</sup>

Chacune de ces informations est regroupée et répertoriée en différentes couches :

- Couche des ponctuels
  - Ponctuels colonnes sèches ou humides (BSPP)
  - Ponctuels hydrants (BSPP)

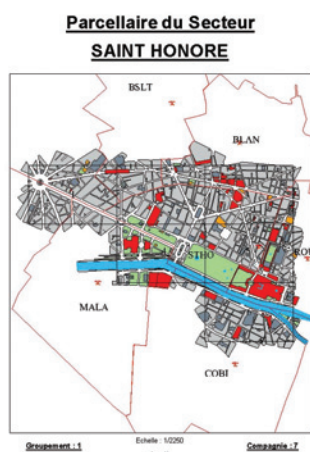


Figure 4 : Page de garde d'un atlas générée par le SIG (SIGAREO)

- Ponctuels accès métro et RER (RATP)
- Ponctuels des centres de secours (BSPP)
- Couche réseaux
  - Réseau filaire voies urbaines interurbaines (APUR<sup>4</sup>-DDE),
  - Réseau voies ferrées (SNCF-RATP-métro-val-RER-tramway)
  - Réseau voies fluviales (SCVP<sup>5</sup>, SNS<sup>6</sup>, PAP<sup>7</sup>)
  - Réseau voies rapides (SIER<sup>8</sup>, direction régionale de l'équipement, DDE)
- Couche zones
  - Zones îlots (APUR, collectivités territoriales)

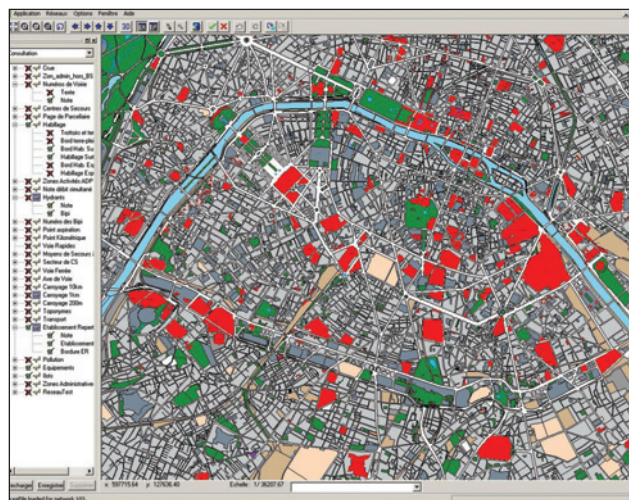


Figure 5 : vue SIG du centre de Paris (SIGAREO)

- Zones établissements signalés ou répertoriés (BSPP)
- Zones à débit simultané (BSPP)
- Zones aéroportuaires (ADP) aéroport de Paris
- Zones boisées (ONF) office national de forêts
- Zones inondations (SNS)
- Zones population (INSEE)
- Secteurs opérationnels (BSPP)
- Secteurs administratifs (collectivités territoriales)
- Schéma régional de l'organisation sanitaire (ARHIF<sup>9</sup>)
- Schéma interdépartemental de couverture et d'analyse des risques (SGZDIdF-BSPP) secrétariat général de la zone d'Ile de France
- Zones des risques majeurs (DCS<sup>10</sup>-DDRM<sup>11</sup>)

GIPS repose sur des fonctionnalités intéressantes pour la BSPP. Sans entrer dans une présentation complète du système, il est toutefois utile d'aborder certains aspects qui le rendent exploitable par les services de la brigade.

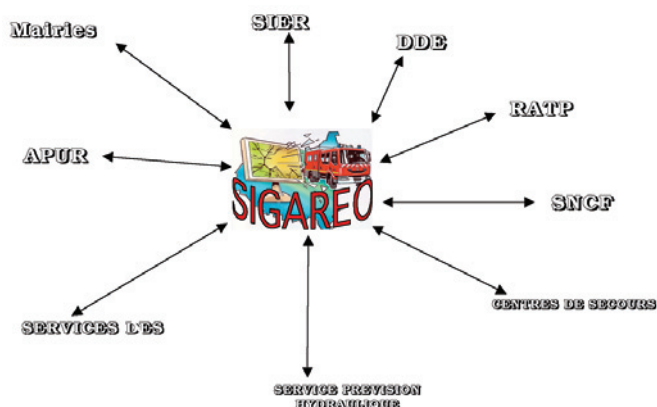
GIPS est un logiciel qui gère et manipule aisément une grande quantité de données ayant ou non une représentation graphique. Pour chaque objet créé dans GIPS, il est possible d'associer des attributs, des documents, des plans de détails ou des photos, d'établir des relations entre objets ou d'afficher avec les attributs d'un objet, ceux d'un autre.

Le système est ouvert et permet de s'interfacer aisément avec les autres applications déjà en service à la brigade. L'utilisateur dispose donc d'une vision globale et cohérente des données de l'entreprise. Il est ainsi possible d'associer à un objet GIPS des informations disponibles dans une autre application. La mise à jour des informations externes est possible depuis l'application GIPS.

L'administrateur définit pour chaque utilisateur ou groupe d'utilisateurs, le profil particulier qui correspond exactement aux tâches qu'il a à réaliser. Ainsi, tout en partageant les

- (2) schéma interdépartemental d'analyse et de couverture des risques
- (3) système numérisé de transmission des informations d'alerte = système de gestion automatisé de départ des secours
- (4) Atelier parisien d'urbanisme
- (5) société des canaux de la ville de Paris
- (6) service de la navigation de la Seine
- (7) Port autonome de Paris
- (8) service interdépartemental d'exploitation routière
- (9) agence régionale de l'hospitalisation d'Ile de France
- (10) dossier communal synthétique
- (11) dossier départemental des risques majeurs





**Figure 6 : Interlocuteurs principaux dans l'échange des données**

mêmes informations, chaque utilisateur ou chaque entité dispose de sa propre vue et de ses propres accès à une même source d'information.

GIPS associe à chaque objet des séquences d'événements et des tâches. La planification d'opérations de maintenance peut être programmée sur les divers équipements d'un réseau. D'un lieu unique, l'utilisateur dispose de tous les moyens de contrôles permettant d'assurer à tout moment la cohérence des informations. Il peut aussi paramétrer l'émission automatique de documents nécessaires à la réalisation de nouveaux chantiers.

Le SIGAREO a été développé pour respecter les principes d'architecture trois tiers où le Serveur de données, le Serveur d'application et les Clients sont dissociés. Cette architecture permet de connecter les "clients" de l'application GIPS sur une ou plusieurs bases de données, sur un ou plusieurs serveurs d'application. Cela garantit ainsi l'adaptabilité du logiciel à l'environnement de l'entreprise. De même, l'augmentation du volume des données ou des transactions peut être supportée avec un minimum d'impact sur l'application.

Le SIGAREO a été conçu en intégrant les standards du marché. Le serveur d'application est développé en Java et fonctionne sous Unix, Linux et sous Windows NT.

Les clients fonctionnent en environnement Windows. L'affichage graphique exploite le standard OpenGL. Les bases de données sont supportées en standard DB2 et Oracle.

Les acteurs nécessaires à l'acquisition de ces couches et mise à jour des données : L'essentiel des informations provient de partenaires extérieurs. Des conventions avec des organismes privés ou publics sont signées pour enrichir les bases de données de la BSPP. La génération et le développement de ces bases se font par des échanges bi-directionnels. La BSPP reçoit les informations brutes de ses partenaires, les intègre au SIGAREO et assure la mise à jour. Régulièrement elle exporte ces bases pour permettre aux fournisseurs initiaux leur propre mise à jour.

## Ce procédé permet de pérenniser les échanges avec ces partenaires extérieurs

A titre d'exemple, la BSPP a signé une convention d'échange avec l'APUR (atelier parisien de l'urbanisme) afin de récupérer les données indispensables au SIG. En échange de ces

données sur les secteurs de compétence de la brigade (couche îlot, équipement filaire et toponyme), elle fournit, deux fois par an à l'A.P.U.R la mise à jour des couches initiales. D'autres acteurs extérieurs apportent leur contribution à travers des conventions de partenariat. Chacun de ces partenaires fournit une compétence particulière dans les informations du SIG (RATP, SNCF, DDE, etc.)

Pour faciliter la récupération de ces données, des modèles conceptuels de données (MCD) ont été développés pour faciliter leur import dans le système.

La pérennisation du système repose évidemment sur l'actualisation des informations. Dans la région parisienne, l'évolution de l'urbanisme est forte et nécessite une mise à jour quasi quotidienne. La BSPP a contacté toutes les mairies des communes couvertes. Leurs services techniques doivent envoyer directement au service d'informations géographiques les courriers officiels avec les plans de créations, de modifications des rues et des places de leurs secteurs respectifs. Lorsque ces informations ne sont pas mises à disposition par les communes, les centres de secours jouent alors un rôle d'anticipation en remontant rapidement les informations collectées directement sur le terrain.

L'intérêt de SIGAREO ne s'arrête pas là. C'est un outil de conduite des opérations et d'aide à la décision grâce au développement de modules propres à la brigade (développement en langage objet java).



**Figure 7 : Géo-localisation d'une bouche d'incendie par relevé GPS**

### 1 - Gestion des hydrants:

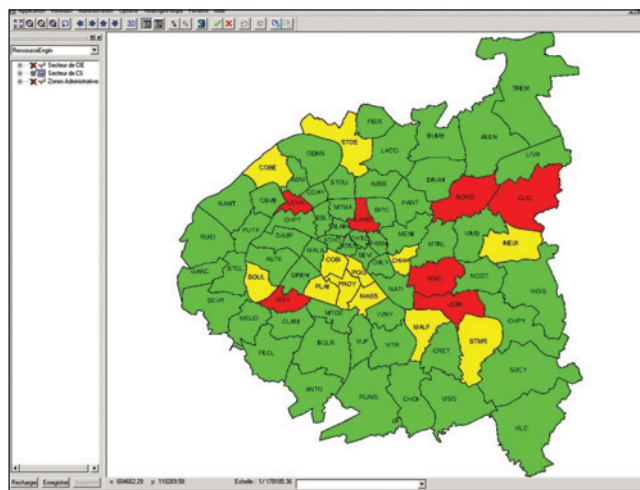
Les bouches et poteaux d'incendie sont géo-localisés dans le système et répondent aux changements d'état (disponible ou non) par un code couleur visible en temps réel. Leur positionnement se fait par GPS

### 2 - Couverture opérationnelle:

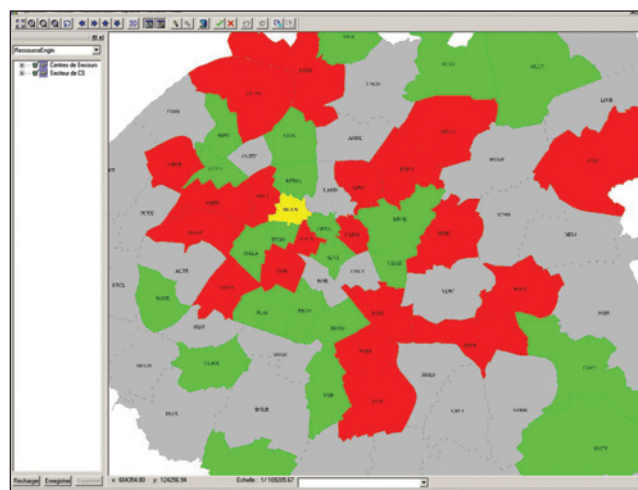
Cet outil permet d'afficher l'ensemble des secteurs des centres de secours de la Brigade et de représenter sous forme de couleur l'état en temps réel des ressources d'une

catégorie d'engin dans un centre de secours. Sur l'exemple de la figure, la couleur rouge signifie que le secteur en question est démuné en engins-pompe, la couleur verte que 100 % des ressources sont disponibles, la couleur jaune que 50 % des ressources sont disponibles ou en intervention, la couleur grise que le secteur ne dispose pas de ce type d'engin. Cette visualisation est disponible pour toutes les catégories d'engin par un changement d'activité. Cet outil est conçu pour rééquilibrer plus rapidement la couverture opérationnelle. Il est déjà fonctionnel dans la salle de commandement du centre de coordination des opérations et des transmissions (CCOT), situé à l'état-major de la BSPP, dans le 17<sup>e</sup> arrondissement de Paris. En cliquant sur le secteur, nous pouvons découvrir l'armement du secteur et aller visualiser les interventions en cours.





**Figure 8 : Figure 5 : Sollicitation des engins-pompes (SIGAREO)**



**Figure 9 : Carte statistique du secours routier (accident de deux roues)**

■ ■ ■ **3 - Statistiques en direct :** Le SIGAREO permet d'afficher en temps réel le nombre d'interventions en cours par commune ou par centre de secours. Cette visualisation s'étend jusqu'aux détails de chaque intervention.

**4 - Statistiques descriptives :** Il en est de même pour les statistiques descriptives. Le SIGAREO récupère dans une base externe, le code rapport de toutes les sorties qui s'y réfèrent et d'afficher sous forme graphique et de couleur la concentration de ce type d'intervention.

**5 - Conception d'un guide autoroutier :** Ce guide est conçu pour tronçonner toutes les autoroutes et voies rapides du secteur de la brigade afin de visualiser toutes les bornes d'appel d'urgence et d'afficher les informations correspondantes aux accès les plus proches dans les deux sens de circulation par rapport à l'emplacement de ces bornes.

**6 - Un guide opérateur pollution :** Ce document permet de visualiser les chantiers anti-pollution pré positionnés sur la Seine et la Marne afin d'anticiper d'éventuelles pollutions.

**7 - Gestion des risques NRBC (nucléaire, radiologique, biologique, chimique) :** Cet outil permet de créer sur la carte des zones pré calculées selon des modèles de simulation de risques de type NRBC et d'en extraire tous les objets se trouvant à l'intérieur (rue, établissement...) pour proposer un plan d'action le plus efficace possible.

**8 - Parcours de graphes :** Cet outil calcule à partir de n'importe quel nœud situé sur un arc de voie, des parcours pondérés par une distance ou une vitesse et un temps et ainsi créer une zone à partir des nœuds les plus éloignés. Cet outil permettra de recalculer les secteurs d'intervention par rapport à l'emplacement des nouvelles casernes construites ces dernières années. L'informatique embarquée permettrait le positionnement des engins sur SIGAREO et ainsi de les rediriger vers de nouvelles interventions proches d'eux. Plusieurs sociétés proposent leurs technologies et notamment "Benomad" qui sur un échantillon de données géographiques existantes ont simulé des déplacements d'engins en temps réel.

## Conclusion

Le SIGAREO est devenu un outil indispensable et étroitement lié au système de transmission d'alerte. Il répond facilement et efficacement aux exigences des interventions de secours et de préventions. Les limites potentielles de SIGAREO appartiennent aux limites de l'imagination. La solution GIPS Web offre un accès à distance au système d'information. Elle permet la consultation, l'établissement de requêtes et la mise à jour de bases de données au travers du réseau.

Ceci laisse entrevoir la création de nouveaux modules liés à la gestion des hydrants (possibilité aux différents services des eaux de signaler en direct l'indisponibilité des hydrants). Les Sapeurs-pompiers sont de plus en plus sollicités. Leur rapidité d'intervention repose sur des règles précises et rigoureuses. La BSPP doit disposer d'outils performants comme son système de transmission d'alerte et le SIGAREO. ●

## Références des rédacteurs

**Chef de bataillon Jean-Luc RUBOD**, chef du centre de coordination des opérations et des transmissions et chef de projet SIG

**Adjudant Bernard BAULERY**, chef du groupe système d'information géographique

**Emmanuel NATCHITZ** Enseignant chercheur ESTP

Site Web : [www.pompiersparis.fr](http://www.pompiersparis.fr) - mail : [sigareo@pompiersparis.fr](mailto:sigareo@pompiersparis.fr)

## ABSTRACT

**Key words:** GIS, prevention, decision-making aid  
*The fire brigade of Paris defends the town of Paris and the closer suburban (92, 93 and 94) which represents 6.2 million of inhabitants for an area of 760 km<sup>2</sup> (8100 hab/km<sup>2</sup>). The brigade is composed of 3 separated firemen brigade including 77 help barracks composed approximately by 7000 men. In 2003 the brigade carried out 428458 interventions who mean a departure of help every 72 seconds. This activity represents more than 10.000 daily state's changes for the operational vehicles.*

# Suivi automatisé des piles du pont de Fleury-Mérogis lors des opérations de poussage

■ Frédéric DADOUN et Didier DUPUIS - François LEBLANC et Sylvain SABINI

*Les 103 m du tablier du pont construit par Eiffage TP ont été poussés en 3 fois à une vitesse de 7 à 8 cm/mn au dessus de la RN104 à Fleury-Mérogis. Pendant toute la durée de la poussée, l'effort horizontal exercé sur chaque pile est surveillé. Une solution par théodolite automatisé n'étant pas envisageable, DYNAOPT GEODESIE INDUSTRIELLE a proposé et mis au point une solution de surveillance au moyen de clinomètres à electrolevel présentant l'avantage de rester à demeure sur la pile et de séparer la rotation d'ensemble de la semelle de la déformation propre du fût. Les données ont montré une rotation des têtes de fût en "dents de scie" qui correspond à la montée en intensité de la force du frottement et à la relaxation au moment du retour des pistons des vérins. La réflexion commune menée par l'ensemble des intervenants (chantier, bureau d'études, spécialistes instrumentation) a permis de faire de l'instrumentation mise en oeuvre un outil d'optimisation de la méthode de poussée, de prévention des risques et d'apport d'informations utiles pour les projets à venir.*

## ■ mots clés

Pont poussé, surveillance, clinomètre, electrolevel

## L'ouvrage

Dans le cadre du plan d'amélioration des liaisons intercommunales en Ile de France, une nouvelle route est actuellement en cours de construction entre le vieux bourg de Fleury-Mérogis (91) et la zone industrielle des Ciroliers.

Le franchissement de la Francilienne s'effectue grâce à un ouvrage d'une longueur totale de 350 mètres, comprenant un pont de 103 mètres de long et des rampes d'accès nécessitant la mise en oeuvre de 12 000 m<sup>3</sup> de remblais. EIF-FAGETP a été déclaré adjudicataire du marché de construction de l'ensemble début Juillet 2003.

Le pont est constitué par une dalle en béton précontraint de 1,20 m de haut et de 9,50 m de large, reposant sur 7 appuis fondés superficiellement. Le profil en élévation du tablier est un arc de cercle de 1200 mètres de rayon, avec des pentes en extrémités respectivement de 6 et de -2,5 %.



Figure 1 : ouvrage vue du dessus

D'un point de vue architectural, le choix de la forme des piles a fait l'objet d'une attention particulière: elles pré-

sentent une section ovoïdale et sont traversées en leur centre par une ouverture circulaire de 3,00 m de dia-



■ ■ ■ mètre destinée à alléger leur aspect, tandis que leur parement est ouvragé. La réalisation des trois piles situées au voisinage de la Francilienne a nécessité le blindage des fouilles à l'aide de palplanches.

## La méthode de construction

Une des contraintes du projet est de limiter au strict minimum les interruptions de circulation sur la Francilienne. Aussi, la méthode de construction par poussage s'est-elle imposée naturellement, d'autant plus que la géométrie du tablier s'y prêtait directement sans aménagements particuliers.

Le tablier est construit en 3 tronçons successifs de 39, 25 et 40 mètres coulés sur une aire de préfabrication située à l'emplacement de la rampe sud. Une fois un tronçon achevé, l'ensemble du tablier est poussé au dessus des travées, libérant ainsi les coffrages pour la construction du tronçon suivant.

L'aire de préfabrication est essentiellement constituée par deux longrines en béton armé présentant une section en forme de T renversé. Chaque longrine est recouverte d'une tôle métallique destinée à permettre le glissement de la feuille de contre-plaqué sur laquelle est coulé le béton du tablier.

Le déplacement du tablier est assuré par deux dispositifs de poussage qui

prennent chacun appui sur une longrine par l'intermédiaire d'un sabot métallique et développent un effort de poussage unitaire de 320 tf. Le poussage s'effectue par translations élémentaires de 25 cm, qui correspondent à la course des vérins. Le temps moyen nécessaire au poussage d'un tronçon est d'environ 13 heures.

Pour permettre au tablier de résister aux efforts de flexion sous poids propre en cours de poussage, on met en tension une première série de câbles de précontrainte qui demeure en place en phase de service. La continuité de ces câbles au droit de deux tronçons est réalisée au moyen de coupleurs.

Le premier tronçon du tablier est prolongé par une poutre métallique de 14 mètres de long, appelée avant-bec, dont le but est de prendre appui sur la pile suivante, afin de limiter les efforts de porte-à-faux dans le tablier.

La mise en place par poussage d'un tablier en béton précontraint n'est possible que parce qu'il existe des dispositifs de glissement présentant un coefficient de frottement suffisamment faible pour ne pas compromettre la stabilité des piles au cours de l'opération. Dans la pratique, on utilise des blocs d'appui provisoires recouverts d'une tôle en acier inoxydable et comportant un embecquetage à chaque

extrémité. Des plaques de néoprène-téflon placées entre l'intrados du tablier et la tôle inox accompagnent le tablier dans son déplacement, en glissant avec un coefficient de frottement téflon sur inox compris entre 2 et 5 %. Lorsqu'une plaque échappe à l'appui, elle est récupérée pour y être introduite par l'embecquetage arrière, et ainsi de suite tout au long de l'opération de poussage.

## L'objectif du suivi des déplacements des piles

On contrôle la force globale de poussage en limitant la valeur de la pression aux vérins en fonction du nombre de tronçons à pousser.

Cette précaution nécessaire est loin d'être suffisante, car elle ne permet pas de détecter si une pile ou une culée particulière subit un effort horizontal dépassant de façon importante la valeur admissible. Dans le contexte de cet ouvrage, où la forme élégie des piles réduit de façon sensible leur résistance aux efforts horizontaux, il importe de pouvoir s'assurer de façon fiable qu'elles ne seront jamais sollicitées au delà de la limite autorisée.

D'où l'idée de surveiller de façon continue les piles durant le poussage ; cela se fait en suivant leur déformation, plutôt qu'en tentant de mesurer directement l'effort de frottement appliqué par le tablier à la pile, ce qui serait particulièrement délicat.

On vérifie donc que les piles ne sont pas sollicitées au-delà de la limite admissible, en s'assurant que les déplacements observés restent inférieurs à une valeur limite fournie par le Bureau d'Etudes.

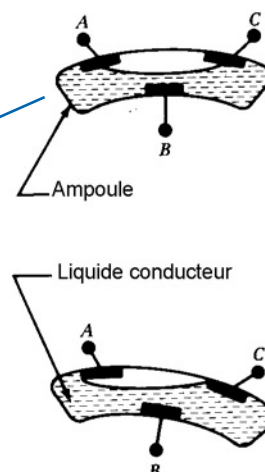
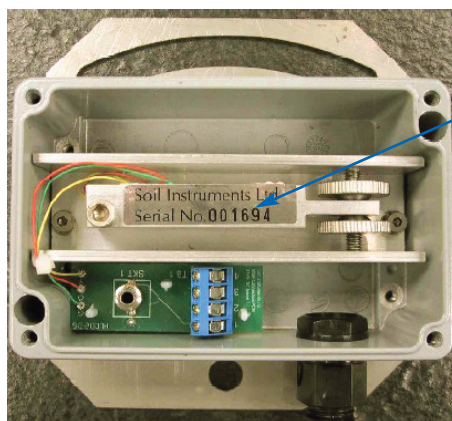
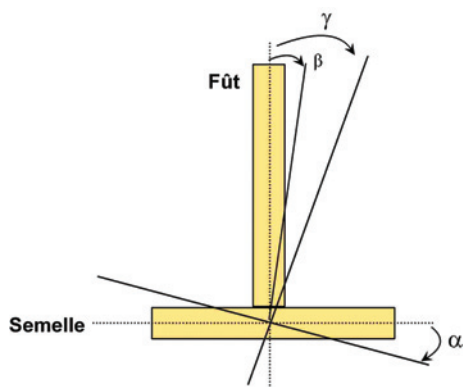
## Les limites d'une approche classique

Le suivi en continu de l'évolution des coordonnées (x, y, z) d'un ensemble de cibles constitue aujourd'hui, grâce à l'utilisation généralisée de théodolites motorisés, un problème classique habituellement simple à résoudre.



Figure 2 : Dispositif de glissement avec dispositif de guidage





### Principe et mise en place des clinomètres à electrolevel

Ainsi, cette solution est fréquemment retenue pour la surveillance de glissements de terrain ou le monitoring de grands ouvrages d'art lors des épreuves de chargement.

Cependant, après examen des contraintes spécifiques au site, il s'est avéré que cette solution ne pouvait être adoptée, du fait du manque de recul possible pour l'appareil et de l'absence d'une emprise protégée.

### Le recours à une solution originale

Plutôt que de chercher à caractériser la déformation d'une pile par le déplacement de sa tête, on s'intéresse à des variations angulaires, dont les valeurs limites autorisées sont également fournies par le Bureau d'Etudes.

Cette solution, proposée par DYNAOPT GEODESIE INDUSTRIELLE, et mise au point en collaboration avec EIFFAGETP, présente plusieurs avantages :

- on peut utiliser comme moyen de mesure des clinomètres installés à demeure sur les piles avant que celles-ci ne soient sollicitées par le tablier,
- en plaçant deux capteurs distincts, un sur la semelle, l'autre en tête de pile, on sépare clairement la rotation d'ensemble de la semelle de la déformation propre du fût, ce qui peut être utile lors de l'interprétation des mesures observées.

### La technologie de mesure retenue

Les clinomètres utilisés sont du type electrolevel, dont le principe de fonctionnement est le suivant. Une ampoule, à laquelle sont connectées trois électrodes, est partiellement remplie d'un liquide conducteur. Lorsque l'ampoule bascule, les surfaces de contact des électrodes A et C avec le liquide conducteur varient : l'une décroît pendant que l'autre croît ; la troisième, qui est la référence, reste en contact sur toute sa surface, quelle que soit l'inclinaison. Aux différences de surfaces de contact des électrodes A et C, correspondent des différences de résistances entre chacune de ces électrodes et l'électrode de référence, qui

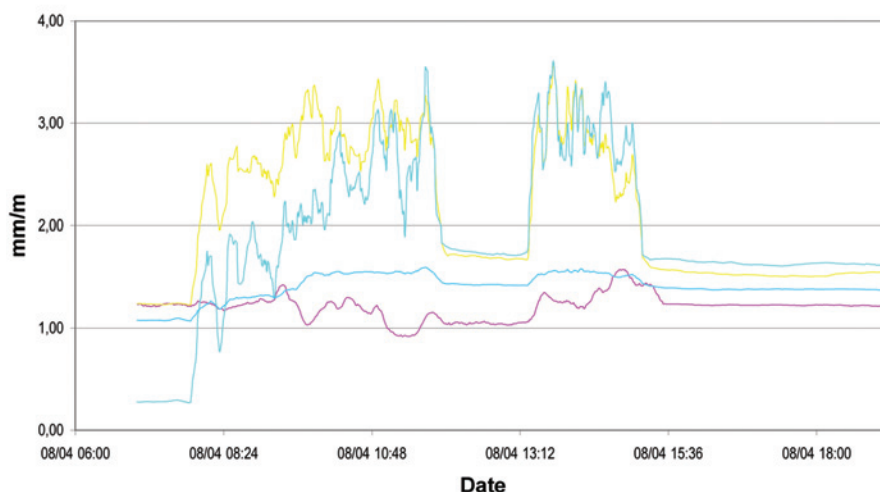
sont mesurées grâce à un pont de Wheatstone<sup>(1)</sup>.

### La mise en œuvre pratique du suivi

La conversion des variations de résistance en variations d'angle, ainsi que l'enregistrement des mesures s'effectue de façon continue à l'aide d'une station d'acquisition DYNACAD. On visualise en temps réel les valeurs des angles de rotation des fondations, ainsi que celles des rotations des têtes de fût par rapport à leur base, grâce à un logiciel prévu à cet effet. En cas de dépassement des valeurs admissibles ■■■

(1) Le pont de wheatstone permet de mesurer une résistance variable en alimentant un circuit de quatre résistances dont trois sont connues.

### Rotation des piles



■ ■ ■ des rotations fournies par le Bureau d'Études pour chaque pile, une alarme se déclenche (clignotant et sirène) et l'opérateur aux commandes des vérins de poussage interrompt immédiatement la manœuvre.

Le système reste en place durant toute la durée du chantier, ce qui permet d'observer le retour élastique des piles, lorsque les efforts de frottement se dissipent avec le temps.

Le système mis en place permet de détecter des rotations de 0,2 milliradian.

## Les résultats obtenus

La figure 14 montre les enregistrements des valeurs des rotations de la semelle et de la tête de fût pour deux piles de l'ouvrage. On constate que les rotations des semelles (courbes inférieures) varient assez peu durant le poussage, tandis que les rotations des têtes de fût (courbes supérieures) présentent une allure en dents de scie, qui correspond essentiellement à la montée en intensité de la force de frottement lors d'une translation élémentaire, puis à la relaxation de cette dernière durant l'arrêt du poussage au moment du retour des pistons des vérins. Le palier visible sur les courbes de rotation des têtes de fût coïncide avec l'interruption de l'opération de poussage durant la pause du déjeuner.

Durant chacune des opérations de poussage correspondant à la sortie des 3 tronçons des coffrages, les valeurs observées des rotations sont toujours restées inférieures aux valeurs admissibles fournies par le Bureau d'Études.

## Les enseignements

L'instrumentation des piles de l'ouvrage en cours de poussage a permis de réaliser l'opération de mise en place du tablier en toute sécurité, puisque à chaque instant on pouvait être assuré que chaque pile n'était soumise à aucun effort horizontal trop important. En particulier, tout incident, tel que plaque de glissement introduite néoprène contre inox, tablier en butée sur dispositif de

guidage,...,pouvant provoquer une augmentation brutale des efforts sans que cela ne se traduise forcément par une augmentation aux vérin de poussage, aurait pu être détecté grâce au monitoring.

Un dispositif en tout ou rien pourrait a priori s'avérer suffisant pour remplir strictement cette fonction. Néanmoins, pour un coût à peine supérieur, on dispose d'un ensemble de données, dont le traitement conduit à des informations techniques très utiles, notamment en ce qui concerne les valeurs et l'évolution des coefficients de frottement sur chaque pile.

Ces informations peuvent à leur tour être exploitées à deux niveaux :

- d'abord sur site, pour intervenir sur les piles où les frottements se révéleraient être plus élevés que la moyenne : nettoyage des plaques de glissement, graissage du téflon, ...
- ensuite, dans le cadre d'une démarche de capitalisation d'expériences, pour mieux appréhender, à partir de données expérimentales, le comportement réel des dispositifs de glissement.

## Une dernière remarque

L'instrumentation d'un ouvrage en cours de construction est trop souvent perçue comme une obligation contractuelle stipulée par le Cahier des Charges, dont on appréhende mal la finalité, mais qu'il convient de remplir correctement, tout en cherchant bien sûr à en limiter le coût au strict minimum.

Avec cet état d'esprit, l'opération est alors souvent vécue comme une contrainte, suscitant un intérêt limité auprès des différents intervenants (Maître d'Œuvre, personnel chantier de l'entreprise, bureau d'études).

En revanche, si les objectifs visés par l'instrumentation sont clairement définis, quitte à ce que le problème soit reformulé par l'ensemble des intervenants, alors les données fournies par les mesures joueront pleinement leur rôle de moyen de contrôle de la sécurité des opérations et d'outil d'aide à la déci-

sion. La réussite d'un tel projet passe par une préparation rigoureuse faisant intervenir des ingénieurs et des experts de profils et de responsabilités complémentaires, qui, ensemble et en intégrant les contraintes des différentes spécialités, définissent et mettent au point les procédures et les moyens de suivi : ingénieurs d'études, ingénieurs méthodes, ingénieurs travaux, spécialistes instrumentation, ... ●

## Les auteurs

**Frédéric DADOUN & Didier DUPUIS,**  
Spécialistes Instrumentation, DYNAOPT  
GEODESIE INDUSTRIELLE

**François LEBLANC & Sylvain SABINI,**  
Ingénieurs Travaux, EIFFAGE TP

## ABSTRACT

**Key words:** Pushed bridge, monitoring, tiltmeter, electrolevel

*The 103 m long slab of the bridge built by Eiffage TP have been pushed in three steps at a speed of 7 to 8 cm/min over the RN104 at Fleury-Mérogis. While pushing, the horizontal force exerted on each pile has been monitored. As automated theodolite could not be used, DYNAOPT GEODESIE INDUSTRIELLE designed a monitoring solution using electrolevel tiltmeters with the advantage of being installed all time and identifying sole tilting and pile flexion. Data showed pile head tilting which corresponds to the rise in intensity of friction forces and to relieving at time of pistons jacks return. This instrumentation designed and developed by all the users including building team, design engineers, and instrumentation specialists was of interest to all allowing pushing method optimisation and risk limitation, while increasing data base knowledge on pushed bridge techniques.*



# Géomatique, la chenille ou l'imgo<sup>1</sup>? Question de définition...

■ Tania NEUSCH et Hans-Peter BÄHR

*Cette revue n°100 a pour originalité de rassembler une contribution par thématique citée en couverture. Lors de la définition du contenu de ces thèmes, nous sommes restés bloqués en abordant la Géomatique, car se pose alors la question : que placer sous cette thématique ? un article orienté SIG ou photogrammétrie ou GPS ou... ? Nous mettons le doigt sur le problème : le flou existant autour du contenu scientifique de ce terme bien qu'il fasse partie de notre langage courant. On parle de "...faire apparaître le terme géomatique dans les items de formation...", "renommer les géomètres en géomaticiens...", "rebaptiser la filière topographie en filière géomatique...", "...l'association française de topographie en association française de géomatique...", etc. Tant d'idées ou de pensées qui nous ont traversé ou qui nous traversent encore l'esprit à l'ère de la Géomatique.*

### ■ mots clés

définition, topographie, géomatique, géomètre, géomaticiens, dénomination

**L**a géomatique, est-elle la solution miracle à tous nos quiproquos ou une source de confusions dans nos esprits ? Il faut dire que c'est un métier d'avenir, puisqu'il paraît que le marché français de la géomatique enregistre un taux de croissance d'environ 10 % chaque année (lettre d'information du CNIG, octobre 2002). Formidable, mais que signifie "géomatique" ? Quels métiers et applications comprennent cette discipline ? Qu'en pensent nos voisins frontaliers ?

Cet article rassemble quelques idées et expériences du côté français et allemand. Il n'engage que la responsabilité de ses auteurs et n'a pour prétention que d'être un clin d'œil à tous ceux qui se sont sentis perdus dans le brouillard géomaticien.

## L'origine ? Une (r)évolution des moyens informatiques

Heureuses sont les disciplines dont le nom évoque quelque chose aux oreilles de tout un chacun : la théologie, la médecine, l'architecture, etc.

Ces exemples montrent que malgré un fractionnement en sous domaines spécifiques, la correspondance entre le nom et son contenu reste encore exacte. Cela n'est plus le cas pour un grand nombre de secteurs des sciences de l'ingénieur. En effet, les changements y sont tellement dynamiques, voire "paradigmatiques", que se pose systématiquement la question de savoir si le nom classique est encore adéquat.

L'évolution rapide des nouvelles technologies vécue dans le monde de la topographie depuis ces 10 dernières années a engendré la nécessaire remise en question de nos disciplines. Les méthodes et les instruments employés aujourd'hui par les géomètres topographes (ordinateur, GPS, station totale, appareil photo numérique, scanner laser,...) auront révolutionné son quotidien, alors qu'il y a encore une petite dizaine d'années, le dessin manuel était incontournable. La généralisation de l'usage de l'informatique, le tout numérique et l'automatisation incessante, même s'ils soulèvent de nouveaux problèmes (coût,

définition des besoins, gestion du rapport entre échelle et précision, etc.) auront simplifié la vie du géomètre autant qu'ils auront exigé de lui une totale remise en question et adaptation permanente. Se pose alors la question de savoir si le nom traditionnel donné à la profession reflète encore convenablement son contenu aujourd'hui.

Dans son article paru dans XYZ n° 3 en mai 1980, M. Dubuisson décrivait le topographe de l'an 2000 tel qu'il l'imaginait dans notre société actuelle : "la géodésie des pays en développement sera basée sur la géodésie par satellites, la cartographie à petite échelle résultera de traitements d'images satellitaires, [...] la télédétection des radiomètres, des radars, sera issue de vecteurs satellitaires, la topométrie sera issue de tachéomètres électro-optiques enregistreurs, etc."

Ses visions se sont révélées exactes, mais il ne se doutait probablement pas, en tant que fondateur de la notion "Géomatique", que ce terme serait employé avec tellement d'aisance aussi bien par les géographes que les topographes ou les informaticiens... Avant toute chose, penchons-nous sur sa définition.

(1) Imago : n.m. Insecte adulte n'ayant plus à subir aucune mue.[...] Imago, ou insecte parfait, ailé, reproducteur, mais dont la vie est très courte [Larousse encyclopédique, 1978]

## ■ ■ ■ Qu'est-ce que la géomatique ?

Très jeune et déjà sur le petit écran ! Elle a en effet fait l'objet d'une émission diffusée sur France 5 au mois de mars dernier où le tout public l'a découverte comme étant *"l'ensemble des techniques de l'information géographique : une discipline qui fait appel à la géographie, à l'informatique et à la gestion de données."* Si cette définition est satisfaisante pour les néophytes, elle ne peut l'être pour les professionnels ayant affaire à la géomatique. En attendant, l'engouement généré par les activités de la géomatique est grandissant et se reflète par la multitude de revues, congrès, masters, listes de diffusions abordant ce thème...

A voir le nombre de publications (se rapportant à la géomatique) en provenance du Canada, on peut penser que le terme provient du continent américain, mais c'est une erreur. En effet, le mot GEOMATIQUE est un néologisme proposé à la fin des années soixante par le scientifique français M. Bernard Dubuisson, cité précédemment. Géomètre et photogrammètre, il est intervenu pendant plus de 10 ans à l'université de Laval à Québec...

D'après ses racines étymologiques, "Géomatique" proviendrait de la composition de "Géo" (en grec "gê" qui signifie "terre") et "-matique" (fin du mot (infor)matique, du latin "informare" : informer) et aurait pour sens le traitement automatique de l'information pour la (représentation de la) terre. La recherche d'une définition unique s'est soldée par le recueil d'une multitude de définitions proposées par des auteurs de divers horizons (voir Tableau 1). On peut y lire des définitions assez succinctes (ex : déf. 1 ou 4) ou plus exhaustives (ex : déf. 7, 12, 16). La seule qui soit officielle est celle parue au Journal Officiel du 14/02/95 (déf. 2) et qui met l'accent sur la source de données représentée par la télédétection aérospatiale, en occultant les autres sources... La majorité des définitions rencontrées emploient néanmoins les termes "information géographique" ou "données à référence

spatiale" et "informatique", ce qui est tout à fait cohérent avec l'origine étymologique du mot. Toutefois, leurs interprétations sont différentes : les uns mettent l'accent sur les SIG, les autres sur l'informatique, ou sur la télédétection aérospatiale...

En France, aucune définition, mis à part celle du JO datant de 1995 – à notre avis incomplète –, n'a été adoptée officiellement, ce qui engendre des discussions multiples sur la nature et l'importance des différentes disciplines la composant.

## Géomatique = SIG ?

En France, "géomatique" et "SIG" semblent fréquemment employées comme synonymes. Dans un article datant de 1980 intitulé "Problèmes de compromis entre représentation graphique et géomatique", l'auteur employait le terme de géomatique dans le contexte de la cartographie assistée par ordinateur (Dubuisson, 1980b). Dès lors, le développement des technologies de l'information a très vite joué un rôle moteur dans l'économie, que ce soit en Allemagne ou en France, en ouvrant ainsi de larges perspectives commerciales et donnant une place prépondérante aux SIG.

Mais doit-on pour autant résumer la Géomatique au SIG ? Cette question se pose déjà à la lecture de certaines définitions et à la vue des publications françaises, qui placent les SIG au centre des recherches en géomatique (définitions 9, 13, 15 ; SIG la lettre, Hypergeo, De Blomac et al., etc).

## Deux raisons nous poussent à répondre par la négative.

- La première raison est liée à un emploi abusif. Si le SIG est devenu aujourd'hui un outil indispensable de modélisation de données géographiques, il faut toutefois veiller à ne pas confondre les "outils" (GPS, SIG, ordinateur, PDA, et les "disciplines" (géodésie, topographie, informa-

- La seconde raison est qu'une définition trop restrictive de la géomatique déplace le problème vers la dénomination des autres disciplines de l'information géographique laissées pour compte. En effet, le positionnement par satellite, la géodésie, la cartographie, la photogrammétrie, la télédétection, etc. utilisent l'outil informatique pour traiter des données numériques et géographiques visant à la représentation de la terre... donc étroitement liées à la "géo-(infor)matique".

Ajoutons une troisième raison : si la géomatique se résume à une égalité, pourquoi créer un nouveau nom ?

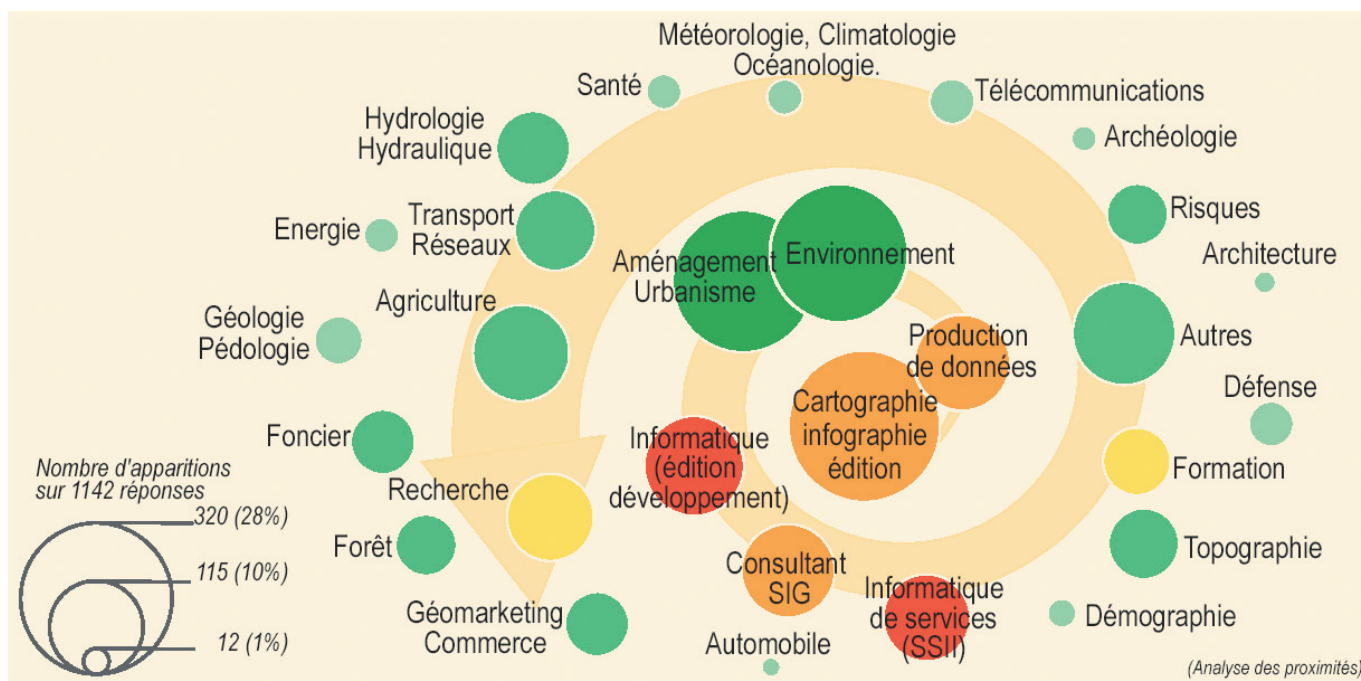
Si cette confusion entre "géomatique" et SIG est très perceptible en France, elle ne fait que souligner la nécessité de définir officiellement cette notion en spécifiant ses objectifs et les disciplines impliquées.

Dans de nombreux pays, la géomatique a obtenu le rang de département, de domaine d'activité et de discipline d'enseignement à part entière comme par exemple au Canada (Université de Laval) ou en Suisse (ETH, Zürich).

Elle y englobe, en tant que discipline technique d'enseignement, toutes celles en rapport avec la représentation du terrain : géodésie, topographie, cartographie, GPS, photogrammétrie, télédétection, S.I.G..

Côté canadien, une définition claire et complète de la géomatique a été définie en 1993 par l'Office de la langue française du Québec : *"discipline ayant pour objet la gestion des données à référence spatiale et qui fait appel aux sciences et aux technologies reliées à leur acquisition, leur stockage, leur traitement et leur diffusion. La géomatique fait appel principalement à des disciplines comme la topométrie, la cartographie, la géodésie, la photogrammétrie, la télédétection et l'informatique"* (déf. 6, reprise dans déf. 12). Cette définition pourrait constituer une base de discussion en France.

## Des efforts pour formaliser



**Figure 1 : Secteurs d'activités de la géomatique. Extrait du poster "Panorama des métiers de l'information géographique." élaboré par AFIGEO, CNIG, Portail Géomatique, Univ. ParisI.**

## le métier de géomaticien ...

Le 2 juillet 2003, l'AFIGEO (Association Française pour l'Information GEOgraphique), le CNIG (Conseil National de l'Information Géographique) et le Portail Géomatique (GeoRezo.net) ont entrepris une démarche groupée auprès de l'ANPE afin que les métiers de la géomatique apparaissent clairement dans le Répertoire Opérationnel des Métiers (ROME). Cette action a été initiée par M. Rousselot (ancien Directeur de l'ESGT), à l'époque président du groupe de travail Formation et Recherche (GD2) du CNIG.

Ainsi, une enquête métier très intéressante a été entreprise, basée notamment sur un questionnaire mis en ligne en avril/mai 2003 et qui suscita 1142 réponses spontanées. Les documents relatifs et l'analyse des résultats sont consultables sur : [www.afigeo.asso.fr](http://www.afigeo.asso.fr) et <http://geomatique.georezo.net>.

Ce questionnaire a révélé notamment la nécessité de "faire comprendre que [les métiers relevant spécifiquement, sinon de la "géomatique", du moins de l'information géographique] étaient multiples et qu'ils se situaient à la croisée d'un nombre de secteurs d'activi-

tés particulièrement important, principalement : la cartographie, l'environnement et l'aménagement", comme l'illustre la figure 1. On apprend également que dès 2004, le poste de géomètre devrait être redéfini, que la création d'un domaine "aménagement et urbanisme" est envisagée, que la notion d'alliance entre l'informatique et la géographie est en train de faire son chemin et l'intitulé "géomaticien" pourrait être retenu (Magazine de l'IGN, février 2004). Le CNIG, qui a pour mission de conseiller le gouvernement sur toutes questions relatives au secteur de l'information géographique, abordait déjà ce point il y a quelques années dans sa fiche technique n° 48 de la série 2001 "Géomaticien : un nouveau métier".

Faut-il comprendre que le géomètre d'aujourd'hui – qui allie pourtant informatique et géographie – sera nommé géomaticien demain ? Ses missions ont-elle changé ou ne sont-ce que ses outils... ?

Dans la fiche métier proposée aux responsables du répertoire métier de l'ANPE en juin 2003, le géomaticien "gère, met en œuvre, valorise le Système d'Information Géographique

(SIG) d'un établissement public ou privé. Il assure l'échange d'informations localisées au sein de l'établissement ou auprès des partenaires extérieurs (cartes papiers et numériques, plans, base de données, tableaux statistiques). Il prend en charge la production, le suivi et le contrôle sur les données géo-localisées utilisées et produites par l'établissement."

Un ingénieur géomètre topographe sortant de nos grandes écoles peut prétendre répondre à cette mission, est-il nécessaire de créer un nouveau métier ? La plaquette sur "Les métiers de la géomatique" (élaborée fin 2003 notamment par le CNIG), précise que ces derniers comprennent aussi bien l'ingénieur géomètre ou géographe, le géomètre-expert, le chef de projet informatique, l'administrateur de données que le directeur de service topographique, le dessinateur cartographe, l'expert en aménagement et en développement durable, etc. Les perspectives d'emplois qu'elle suscite sont tout aussi diversifiées... Mais rien n'est définitivement arrêté. Selon les responsables de l'ANPE, l'ensemble devrait être stabilisé pour la fin de l'année 2005.

Cette démarche, visant à promouvoir



■■■ L'Information Géographique est honorable et tout à fait nécessaire. Toutefois, il peut paraître étonnant de constater qu'aucune définition de la "géomatique" n'accompagne ces documents. Ce terme apparaît pourtant comme un domaine de formation dans les résultats de l'enquête, au même titre que Géomètre Topographe...

## Comment cela se passe-t-il de l'autre côté du Rhin ?

En Allemagne et en Suisse, beaucoup de disciplines cherchent refuge dans les notions composées, en greffant par exemple "informatique", "environnement" ou "écologie" à la notion plus désuète, en pensant ainsi la moderniser. Ainsi ont vu le jour des disciplines telles que la Geo-ökologie, Geo-informatik, Geo-technik, Umwelt-technik... Notre propre spécialité est également confrontée à cette tendance. Un nouveau nom comblera-t-il le fossé entre l'ancienne dénomination et les nouveaux contenus, s'il y en a ?

Le nom donné aux secteurs des sciences et techniques que représente cette revue, a toujours été un problème, en France, en Allemagne et dans la communication entre nos deux pays. En Allemagne, les termes employés traditionnellement sont "Geodäsie" (géodésie, selon Helmert<sup>2</sup>) et "Vermessungswesen" (arpentage).

Toutes les autres notions, telles que la cartographie, la photogrammétrie, la télédétection ou la topographie décrivent des sous-groupes de ces deux termes, de même que le foncier au sens le plus large.

"Vermessungswesen" est perçu par les Allemands comme un mot illégitime, avec lequel l'expert voit son travail non adéquatement décrit et doit craindre que la nouvelle génération ne s'en désintéresse. Et ce, bien qu'aux yeux du public l'homme de métier – le géomètre –, soit perçu comme un personnage fiable, honnête, précis et incorruptible. C'est

ainsi que fut créé le terme allemand "Geoinformatik" (pendant de la géomatique en France), dans le souci de modernisation évoqué précédemment. De manière implicite, aujourd'hui, ce terme sous-entend la synthèse de "cartographie", "photogrammétrie" et "télédétection", auquel cas le plus ancien domaine "Vermessungswesen" (arpentage) y est représenté fortement.

Et en France ? Pour être honnête, peu de gens parmi ceux qui ne sont pas du métier, sauraient dire ce que signifie le métier de topographe. Ces mêmes personnes affichent un sourire de satisfaction lorsque l'on ajoute "géomètre..." Souhaitons que le futur "géomaticien" en France ou "Geoinformatiker" en Allemagne soit plus parlant pour nos concitoyens et illustre davantage nos activités.

## Où puiser les définitions ?

Où trouve-t-on des commentaires détaillés sur les noms cités précédemment, des définitions des différents domaines de spécialités ?

- On peut citer tout d'abord les standards : les normes.

En Allemagne, les normes sont fixées par des DIN (Deutsche IndustrieNorm = norme industrielle allemande) et sont nées de la coopération des collègues des domaines de spécialités respectifs. Ainsi, ces normes DIN sont l'avis d'un groupe d'experts et font donc autorité.

- Les définitions sont plus délicates dans les manuels ou ouvrages scolaires.

Inconsciemment ou consciemment, l'auteur transmet dans ses interprétations sa propre perception des choses en ajoutant une touche personnelle à son domaine de compétence. C'est pourquoi les définitions issues des manuels devraient toujours être considérées avec précaution.

- Un autre moyen d'accéder à des définitions consiste à se tourner vers les associations professionnelles, car

comme pour les normes, derrière les notions abordées se cachent des groupes de spécialistes.

L'ancienne et respectable association DVW ("Deutscher Verein für Vermessungswesen") est équivalente à notre AFT (Association Française de Topographie) et porte depuis peu le sous-titre "Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement" (Société de géodésie, géoinformation et gestion de l'espace). De même, dès 1977, la "Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie" (société allemande de photogrammétrie) a complété son nom par "...und Fernerkundung" (...et de télédétection). Ces deux exemples montrent bien, que la modification du nom illustre un élargissement du domaine de la spécialité.

Dans cette même optique, l'Association Française de Topographie avait lancé un appel à idées en début d'année pour renommer son association en introduisant le terme "Géomatique". Mais les résultats de l'enquête n'ont pas dégagé un avis favorable, signe que nos membres ne souhaitent pas modifier l'intitulé. Ce refus provient-il du flou lié au manque de définition ? Ou ne voit-on pas l'utilité de la démarche ?

Il devrait également être un objectif de l'AFT, de participer à l'élaboration d'une définition cohérente et de compléter ainsi celle proposée dans son lexique topographique ([www.aftopo.org](http://www.aftopo.org)).

- Enfin, une quatrième source d'informations se situe au cœur des grandes écoles, par le biais des noms affectés aux filières de formations (spécialités) et aux disciplines d'enseignement.

Une tendance très claire se dessine en Allemagne : abandonner la traditionnelle filière "Vermessungswesen" (arpentage) au profit de "Geodäsie und Geoinformatik" (géodésie et géomatique). En effet, ces deux domaines que sont la géodésie et la "Geoinformatik" couvrent deux piliers de la spécialité. Bien que la "géodésie" pourrait compter pour une notion d'ordre supérieur, elle souligne encore une fois, aux côtés de la notion "géo-informatique", la

(2) Die Geodäsie ist die Wissenschaft von der Ausmessung und Abbildung der Erdoberfläche / F.R. Helmert, 1880. La géodésie est la science de la mesure et de la représentation de la surface de la Terre.).

mesure de la terre à proprement parler.

Les formations devant répondre aux besoins croissants des professionnels, les grandes écoles en France préparant au diplôme d'ingénieur géomètre topographe (ENSG, ESGT, ESTP, INSA Strasbourg) ont su adapter leurs programmes d'enseignement aux exigences du métier en abordant les activités de la géomatique par le biais des disciplines la composant (topométrie, cartographie, géodésie, lasergrammétrie, photogrammétrie, télédétection, informatique, etc.). Mais les connaissances topographiques de l'ingénieur topographe devront toujours consti-

tuer une base solide de sa formation.

Avant de considérer la géomatique comme une discipline nouvelle à part entière, il nous faut aussi prendre conscience qu'elle se trouve à cheval sur plusieurs sciences et technologies. En effet, au même titre que les topographes, les géographes ou les informaticiens pourraient prétendre que la nature de leurs activités est tellement vaste, qu'elle englobe à elle seule les activités de la géomatique. De disposer d'outils communs, cela suffit-il à confondre le géomètre, le géographe, l'informaticien ? Cette tentative d'appropriation du terme se lit déjà dans

les intitulés et provenances des masters proposés pour la rentrée 2005 ...Mais peut-être portons-nous un regard trop sectoriel sur la géomatique et devrions développer une vision plus globale de la géomatique / Geoinformatik ?

## Conclusion

Comment résister aux tentations d'employer un terme contemporain ? En posant la question de son utilité, de l'enjeu de son utilisation, de son sens, de sa place dans notre métier,... En Allemagne, la "Geoinformatik" a

**Tableau 1 : Quelques définitions se rapportant à la géomatique (liste non exhaustive)**

	Exemples de définitions de la "Géomatique" (liste non exhaustive)	Source
1	Ensemble des applications de l'informatique au traitement des données géographiques, en particulier à la topographie et à la cartographie.	Lexique topographique de l'AFT ( <a href="http://www.aftopo.org">www.aftopo.org</a> )
2	Ensemble des techniques de traitement informatique des données géographiques dont certaines peuvent provenir de la télédétection aérospatiale. Ces techniques incluent celles d'acquisition et de restitution sous forme de cartes, d'images ou de fichiers de données dont certaines proviennent éventuellement de la télédétection aérospatiale	J.O. n° 38 du 14/02/1995 basé sur l'arrêté du 27/12/94 relatif à la terminologie de la télédétection aérospatiale
3	Ensemble des techniques de l'information géographique : une discipline qui fait appel à la géographie, à l'informatique et à la gestion de données.	Emission sur France 5 du 17/03/2004, sur les métiers de la géomatique
4	[le concept de géomatique] regroupe les technologies de la collecte, de l'analyse, de l'interprétation, de la distribution et de l'utilisation de l'information géographique d'une part et témoigne de l'omniprésence de l'outil informatique d'autre part. Avec la géographie physique et la géographie sociale et économique (ou géopolitique), la géomatique constitue le 3ème volet des sciences géographiques.	IGN MAGAZINE n°21 de Jan/fév2004 "Les métiers de la Géomatique" ISSN 1624-9305.
5	La géomatique est le nom donné aux sciences et techniques de l'information géographique.	Site de l'IGN ( <a href="http://www.ign.fr">www.ign.fr</a> )
6	Discipline ayant pour objet la gestion des données à référence spatiale et qui fait appel aux sciences et aux technologies reliées à leur acquisition, leur stockage, leur traitement et leur diffusion. La géomatique fait appel principalement à des disciplines comme la topométrie, la cartographie, la géodésie, la photogrammétrie, la télédétection et l'informatique.	Office de la langue française du Québec
7	Nouveau nom donné aux sciences et techniques de l'information géographique, dont l'application conduit notamment aux productions ou activités suivantes : cartes géographiques et plans topographiques, cadastre, bornages et expertises des géomètres-experts, plans d'urbanisme, de génie civil,... positionnement par satellite (GPS, Galileo...), images de satellite, [...], cartes statistiques, observation de la Terre et de l'environnement, [...] systèmes d'information géographique (SIG), etc.	plaquette de présentation des métiers de la géomatique par CNIG, ENSG,ESGT, ESTP, INSA de Strasbourg, IGN l'Université PARIS1, (2003)

8	Champ d'activités qui intègre selon une approche systémique l'ensemble des moyens d'acquisition et de gestion des données à référence spatiale requis pour effectuer les opérations scientifiques, administratives, légales et techniques dans le cadre du processus de production et de gestion de l'information sur le territoire.	revue GEOMATICA, vol 53, No. 1, 1999
9	Application de l'informatique à la géographie (par exemple sous la forme de SIG - système d'information géographique).	Tout-savoir.net (www.tout-savoir.net)
10	technique informatique associée à l'étude des données géographiques.	Lexique de l'encyclopædia universalis
11	Regroupe de façon cohérente l'ensemble des connaissances et technologies nécessaires à la production et la gestion des données numériques décrivant le territoire et ses ressources.[...]. Les disciplines de la géomatique sont la géodésie, la cartographie, topographie, le positionnement par satellites, le traitement d'images numériques (photogrammétrie aérienne et terrestre, orthophotographie, télédétection), l'informatique (traitement numérique, modélisation 3D, dessin assisté par ordinateur), les systèmes d'information géographique, le droit professionnel et foncier, aménagement, urbanisme.	GC et Habitat <a href="http://genie-civil.scola.asc-paris.fr/delarue/accueil.htm">http://genie-civil.scola.asc-paris.fr/delarue/accueil.htm</a> (site de JF Delarue, Lycée Dorian)
12	La géomatique est un domaine qui fait appel aux sciences de mesure de la terre mettant en relation un réseau plus ou moins complexe de bases de données descriptives et cartographiques, permettant d'obtenir une information géographique offrant aux agents socio-économiques ainsi qu'aux organisations, d'accroître leur productivité et leur compétitivité tout en optimisant le service à la clientèle et aux citoyens. La géomatique regroupe trois secteurs spécialisés : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Le 1<sup>er</sup> est l'acquisition de données mettant en présence différentes technologies et équipements (GPS), imagerie satellitaire, station total, vidéo numérique géoréférencée, etc.</li> <li>• Le 2<sup>e</sup> est le traitement de la donnée, afin de rendre celle-ci intelligente ou interprétable. Ce segment de marché de la géomatique se fait à l'aide d'outils technologiques appelés systèmes d'information à référence spatiale (SIG, GIS en anglais).</li> <li>• Le dernier segment, la diffusion de l'information, intègre les architectures systèmes et bases de données en plus de faire référence aux technologies de communication et de télécommunication</li> </ul>	Centre de géomatique de Québec, 2003. <a href="http://www.cgq.qc.ca/">http://www.cgq.qc.ca/</a>
13	La géomatique, c'est de la géographie par l'informatique. Le géomaticien est un homo-sapiens assisté par ordinateur. [...] Son métier consiste à exploiter un Système d'Information Géographique pour faire des cartes, des analyses, ou pour mettre des données géographiques à disposition d'utilisateurs.	<a href="http://www.geomaticien.com">www.geomaticien.com</a>
14	La géomatique est une thématique de recherche pluri-disciplinaire orientée vers la représentation, l'intégration, l'analyse et la visualisation de données géographiques.	Site de la revue internationale de Géomatique <a href="http://geo.e-revues.com">http://geo.e-revues.com</a>
15	Terme créé vers 2001 pour désigner les systèmes géographiques. Voir aussi : Cartographie, MNT, topographie, toponymie. Termes proches : SIG, SIRS.	Dictionnaire de l'ASTI (Assoc. Franç. des Sciences et Techno. de l'Information)
16	La géomatique ( de "Géo", qui veut dire Terre, et "matique" pour informatique) est le domaine de la gestion des données terrestres à référence spatiale. Elle fait appel aux sciences et aux technologies d'acquisition (géodésie, imagerie satellite, photogrammétrie, GPS, ...), de stockage, de traitement (SIG, télédétection, navigation, ...) et de diffusion (instituts géographiques, diffuseurs imageries, éditeurs produits métiers, ...) qui constituent le travail du géomaticien. Les applications sont multiples : développement du territoire, positionnement embarqué, ressources naturelles, ...	Site du Géo-événement ( <a href="http://www.geo-evenement.com/">www.geo-evenement.com/</a> )



■ ■ ■ trouvé une place à côté de la géodésie (Géodésie), sans lui faire d'ombre. Et la Géomatique en France ? Ce sujet est bien trop vaste pour être développé en quelques pages, et nous préférons laisser la place aux personnes plus compétentes dans ce domaine.

Si la géomatique touche à tous les métiers qui ont trait à la gestion de l'espace, elle entraîne implicitement des interactions et connexions entre différents domaines scientifiques et technologiques. Afin que ces interactions soient constructives, une définition claire et complète de la Géomatique, ni trop restrictive et ni trop large, soulevant toute ambiguïté s'avère indispensable.

Le bouleversement technique et technologique de la dernière décennie a-t-il changé nos missions au point de devoir renommer notre métier ? Ou le nom affecté à notre métier suscite-t-il des incompréhensions ? Faut-il créer un métier de géomaticien ? L'imagerie médicale ou l'informatique de manière générale a-t-elle changée les missions du chirurgien au point de le renommer "chiru-maticien" ? Doit-on laisser les nouvelles technologies déterminer le nom des sciences ? Pourquoi la "géomatique" plus que la "topomatique" = TOPOgraphie + inforMATIQUE proposée par (Brabant, 2000) ?.

Tant de questions aux réponses délicates et difficiles, qui demandent prudence et vigilance face à nos actions, face à l'avenir que nous nous forçons. Nous espérons, par le biais de cet article, ouvrir un débat auprès des lecteurs de la revue.

Terminons cette conclusion en citant l'inventeur du terme Géomatique ("la Topographie de l'an 2000", XYZ n° 3) : Si l'homme doit adopter de nouvelles attitudes dans cette future société, "la constante remise en question de [son] mode d'action n'implique surtout pas celle de sa philosophie et celle de sa science. La mise en place des moyens puissants, qui instaure une discipline écrasante n'affecte ni l'indépendance, ni l'homme des professions libérales ;

elle est indispensable à l'évolution." (Dubuisson, 1980a)

## Bibliographie ou informations :

**Brabant, M., 2000 : Maîtriser la Topographie. Des observations au plan.** Editions Eyrolles.

**De Blomac, F. Gal, R., Hubert, M., Richard, D. Turret, C., 1994 : ARC/INFO: Concepts et applications en géomatique Hermès 1994.** (coll. Traité des nouvelles technologies)

**Dubuisson, B. 1980a : La Topographie de l'an 2000, XYZ n° 3, mai 1980.**

**Dubuisson, B. 1980b : Compromis entre représentation graphique et géomatique, XYZ n°5, décembre 1980.**

**Fiche technique du CNIG n°48 : "Géomaticien : un nouveau métier", série 2001.** (www.cnig.fr)

**Géo-événement** - Site officiel des rencontres européennes de la géomatique.  
www.geo-evenement.com

**Géomaticien** : présentation de la géomatique, forums, rubriques programmation, géodésie, météo, cartes.  
<http://www.geomaticien.com>

**L'actualité de l'information géographique :**  
[www.sig-la-lettre.com](http://www.sig-la-lettre.com)

**Hypergeo, P.L. 3 juin 2004.** Encyclopédie électronique de Géographie  
<http://hypergeo.free.fr>

**IGN MAGAZINE n°21 de Jan/fév2004 Les métiers de la Géomatique** ISSN 1624-9305.

**Le portail géomatique** - portail francophone de la géomatique  
<http://geomatique.georezeo.net>

**Revue internationale de géomatique** publiée par les éditions Hermès.  
<http://geo.e-revues.com>

## Contact

**Tania NEUSCH,**  
Maître de Conférences  
INSA de Strasbourg

**Hans-Peter BÄHR,**  
Professeur à l'Université de Karlsruhe  
Allemagne

## ABSTRACT

*The drastic evolution due to scientific and technical progress revolutionized surveyors work. Indeed, the changes are so dynamic, even "paradigmatic", that the question systematically arises if the traditional name of our discipline is still appropriate. But does it explain a metamorphose of our profession ? Is „geomatic“ the word we need, or does it create misunderstandings ? By looking for an official definition, we found several interpretations, which raised even more questions. In Germany, Geoinformatik is the word used to describe the informational evolution in surveying. It found its place beside the traditional terms. This article gathers some ideas and experiments on the French and German side. It reflects the authors opinions and opens the discussion for finding light in the geomatician fog.*

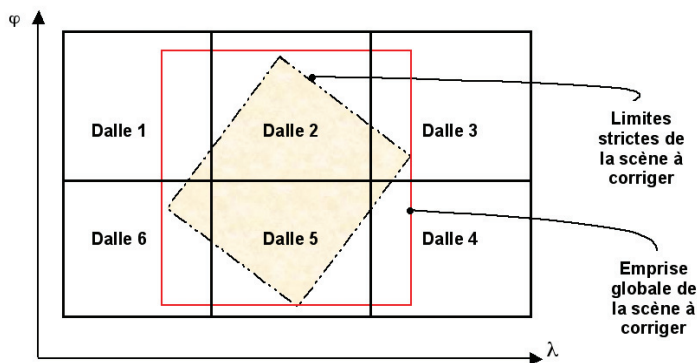
# La génération automatique de spatiocartes

■ Simon BAILLARIN et Marc BERNARD

*L'instrument HRS, qui permet d'acquérir des couples d'images stéréoscopiques quasi-simultanées sur de très vastes étendues, est l'une des innovations majeures de SPOT 5. L'exploitation de ses images (assurée conjointement par IGN et Spot Image au travers de la coédition du produit Reference3D) a permis l'avènement d'un outil entièrement automatique de production d'orthoimages d'une précision géométrique unique sur le marché: ANDORRE.*

## ■ mots clés

SPOT, HRS, ortho-rectification, processus automatique



**Figure 1 :** Emprises des différents objets géographiques mis en jeu dans le processus

**L**a fonction d'ANDORRE est d'assurer l'orthorectification automatique de toute scène SPOT, en s'appuyant sur Reference3D :

- L'orthoimage HRS incluse dans Reference3D, aussi précise qu'une carte régulière (précision horizontale de localisation absolue de 15 m CE90), est utilisée comme source de calage. L'idée est de retrouver automatiquement des points homologues dans l'orthoimage Reference3D et dans la scène SPOT à traiter, et d'en déduire un modèle géométrique de cette dernière.
- le MNE DTED2 de Reference3D intervient ensuite pour l'orthorectification de la scène SPOT.

Le cœur algorithmique d'ANDORRE, dont l'idée est née des travaux IGN sur la mission HRS, a été développé sous maîtrise d'ouvrage CNES. La première version de ces algorithmes sera intégrée fin 2004 par Spot Image dans son atelier [ANDORRE] de production d'orthoimages. Les adaptations d'ANDORRE à des sources images autres que SPOT sont envisagées.

## Principe de la méthode automatique d'orthorectification

La méthode d'ortho rectification automatique se décompose en trois étapes principales :

- Génération de l'image ramenée au plan focal de SPOT
- Calcul de la correction de localisation de la scène SPOT par corrélation multi-échelle
- Ortho-rectification de l'image SPOT

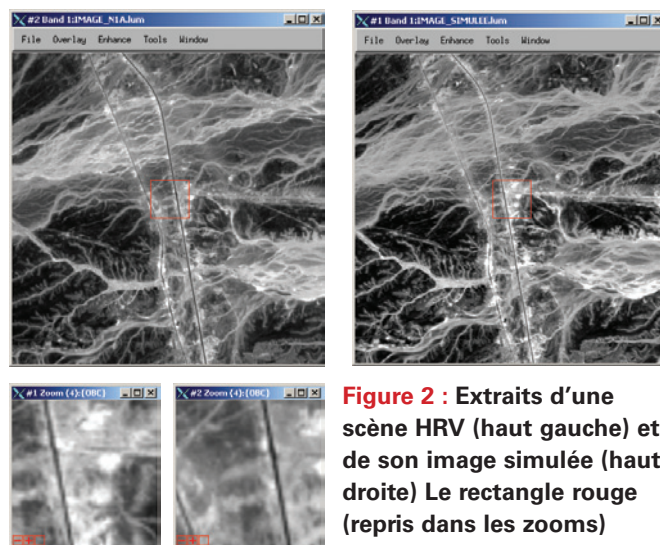
### ■ Génération de l'image "simulée"

On nomme ainsi l'orthoimage Reference3D ramenée dans la géométrie du capteur CCD au plan focal de SPOT. Les dalles Reference3D touchant la scène SPOT à corriger sont

mosaïquées de façon à obtenir une seule orthoimage et un seul MNT. Le plus souvent, cela met en jeu 1 ou 4 dalles Reference3D, puisque leur taille avoisine couramment les 10,000 km<sup>2</sup> (1° de longitude par 1° de latitude).

Ensuite, le modèle physique de la scène SPOT et le MNT issu de Reference3D sont utilisés afin de créer l'image "simulée" dans le plan focal. L'image ainsi créée prend exactement en compte les variations du relief. Ainsi le décalage mesuré entre l'image "simulée" et la scène SPOT réelle est uniquement dû à l'imprécision de localisation de son modèle physique (calculé à partir des données auxiliaires).

La Figure 2 ci-dessous représente un extrait d'une scène SPOT4 HRV (IMAGE\_N1A) et l'image simulée correspondante, le rectangle rouge délimitant une zone ayant les



**Figure 2 :** Extraits d'une scène HRV (haut gauche) et de son image simulée (haut droite) Le rectangle rouge (repris dans les zooms) représente la même zone de l'image

mêmes coordonnées dans les deux images. L'important décalage Est-Ouest parfaitement visible matérialise l'imprécision de localisation du modèle de cette image HRV.

### ■ Détermination de la correction à appliquer au modèle de localisation de la scène

La correction est calculée via un processus de corrélation multi-échelle. A chaque étape on détermine un grand nombre de points homologues entre la scène SPOT et son image "simulée". On en déduit le modèle de correction à appliquer pour ramener la scène SPOT dans la géométrie de l'image simulée. Le modèle de correction est affiné à chaque niveau de la pyramide de résolution.

Les deux images initiales sont d'abord sous-échantillonnées puis ramenées progressivement à la pleine résolution. Le facteur initial de sous-échantillonnage est calculé pour conserver une fenêtre de recherche d'une taille raisonnable (5 pixels):

$\text{Facteur\_initial} = \text{Precision\_Loc} / (\text{Ech\_image} * (\text{Taille\_Fenetre}/2))$

- Ech\_image est le pas d'échantillonnage "pleine résolution" de l'image SPOT à traiter (20 m, 10 m, 5 m). La dernière itération se fait à la résolution de Reference3D, soit environ 5 m.
- Precision\_Loc est la précision à 3 (du modèle physique de localisation pour le satellite considéré (150 m pour SPOT 5, 1500 m pour SPOT2 à 4))
- Taille\_Fenetre est la taille de la fenêtre de recherche de la corrélation (5 pixels).

Par exemple, dans le cas d'une image SPOT4 panchromatique, un niveau de dézoom initial de 1/64 est nécessaire (soit 7 niveaux de dézoom).

Pour chaque facteur de dézoom, la corrélation calcule les décalages géométriques entre les deux images. Le résultat est filtré afin d'extraire un nombre de points homologues équi-répartis sur l'ensemble de l'image et de modéliser le décalage mesuré. Ce modèle est ensuite utilisé comme prédicteur de décalage

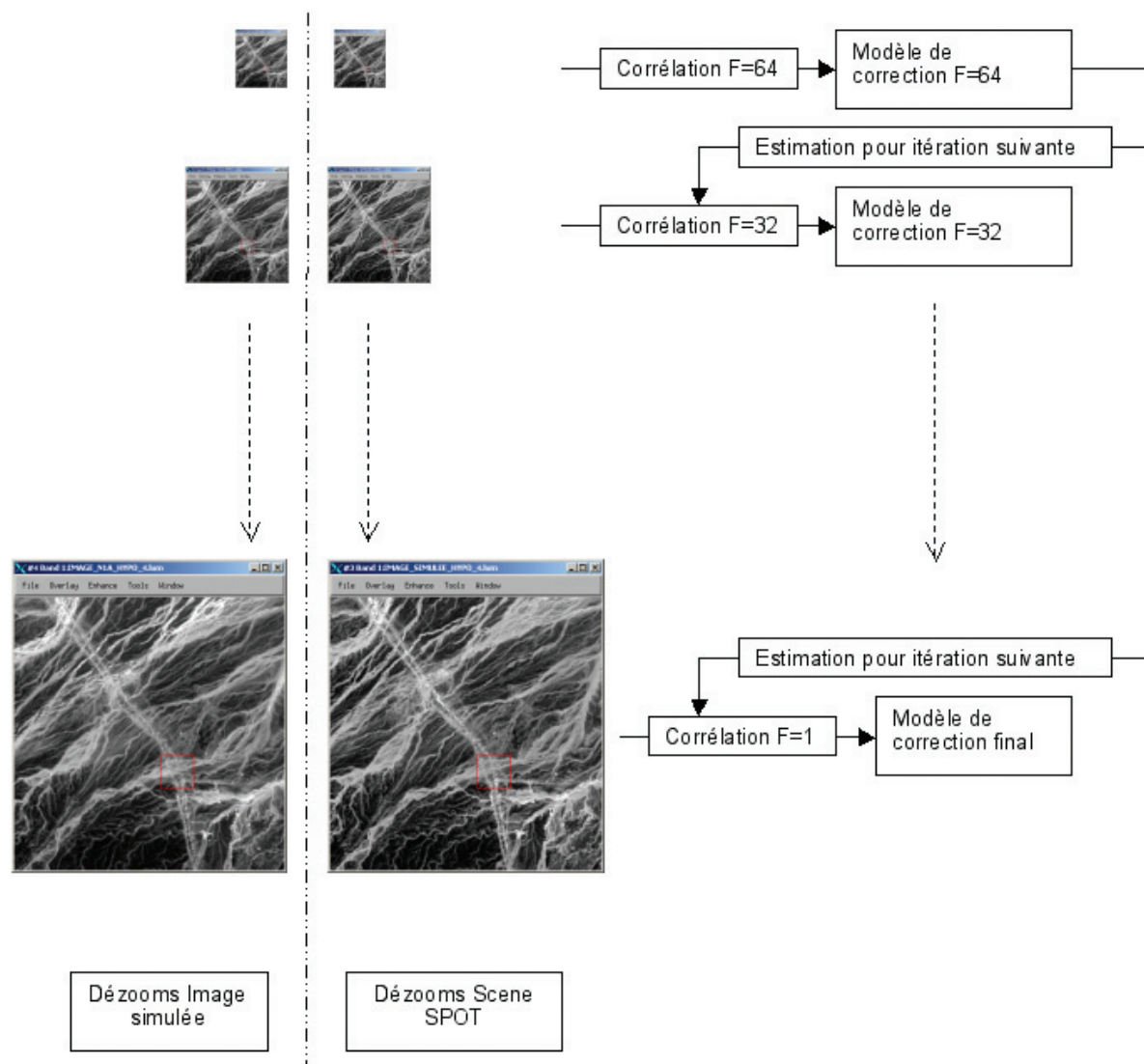
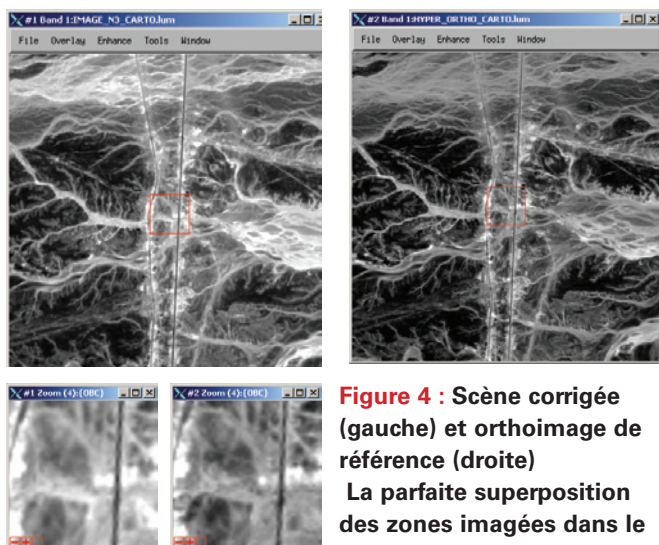


Figure 3 : Schématisation du processus multi-échelle utilisé dans ANDORRE





**Figure 4 : Scène corrigée (gauche) et orthoimage de référence (droite)**  
La parfaite superposition des zones imagées dans le rectangle (zooms) illustre la précision du processus.

pour la corrélation au niveau d'échantillonnage supérieur. Ce processus de corrélations multi-échelle converge vers un modèle de recalage. Ce modèle est affiné en pleine résolution (plusieurs itérations sont réalisées à  $F=1$  afin de s'assurer de la convergence du modèle).

Les points homologues obtenus à l'issue de cette étape sont conservés dans le cas où une image identique (ou issu du même segment de prise de vue) devrait être produite plus tard.

## ■ Ortho-rectification de l'image

La grille de rectification pour la scène SPOT est calculée en combinant le modèle précédemment calculé avec la grille de localisation associé au modèle de prise de vue inverse de l'image SPOT, dans le référentiel WGS84, éventuellement combinée avec la grille de conversion entre WGS84 et la projection cartographique finale souhaitée.

Enfin, la dernière opération consiste à orthorectifier la scène SPOT en utilisant cette grille.

La Figure 4 ci-dessous reprend la même zone illustrée Figure 2, une fois mise en projection UTM et recalée sur la dalle Reference3D(tm). Le rectangle rouge a les mêmes coordonnées dans les 2 images. On constate que les deux images sont parfaitement superposables.

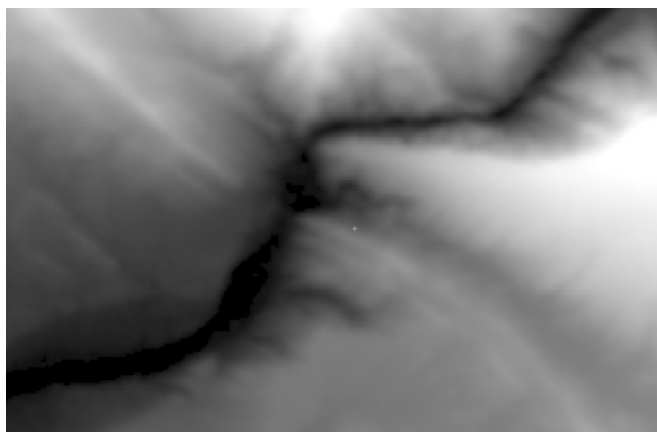
La parfaite superposition des zones imagées dans le rectangle (zooms) illustre la précision du processus.

## Conclusion

Par son fonctionnement entièrement automatique, ANDORRE ramène les coût et délai de production de l'orthoimage au niveau de ceux pratiqués jusque là pour les images brutes. C'est donc une petite révolution: grâce à ANDORRE, l'orthoimage, directement utilisable par les SIG des utilisateurs mais handicapée par un différentiel de prix, peut enfin réellement devenir le produit "image spatiale" de base. ●



**Figure 5 : Orthoimage SPOT 5m (ci-dessus) calculée sur le MNT Reference3D (ci-dessous)**



## Contact

**Simon BAILLARIN**

CNES - Toulouse

**Marc BERNARD**

Spot Image

marc.bernard@spotimage.fr

## ABSTRACT

*Following the SPOT5 launch, Spot Image and the French National Geographic Institute (IGN) have decided to design a worldwide accurate database called Reference3D™ using data from the High Resolution Stereoscopic SPOT5 instrument (HRS). Spot Image now commercializes a system called ANDORRE to automatically produce ortho-rectified images thanks to Reference3D™ data. ANDORRE has been designed to take advantage of Reference3D™ planimetric and altimetric accuracy to automatically register and rectify any image from SPOT satellites. In this framework, CNES is acting as prime contractor to realize and industrialize the algorithms following a preliminary study undertaken by IGN. This paper focuses on the algorithms and the architecture of the ANDORRE process.*

# MAGMA : l'expédition de l'ENSG au Mont-Blanc

■ Julien VARJABETIAN et Jérôme VERDUN

*Comme nous l'avions annoncé dans notre précédente édition (XYZ n° 99), des étudiants de l'Ecole Nationale des Sciences Géographiques se sont rendus sur le massif du Mont-Blanc entre les 28 juin et 2 juillet derniers afin d'y effectuer des mesures altimétriques et gravimétriques. Cette mission appelée MAGMA, encadrée par le Groupe Militaire de Haute Montagne (GMHM), visait à mieux connaître le géoïde sous le massif alpin, en présentant la particularité de coupler des données GPS avec des mesures de la variation de la pesanteur terrestre, acquises à l'aide d'un gravimètre.*

## ■ mots clés

Mesures conjointes  
GPS/champ de pesanteur –  
gravimètre – points fixes  
– altitude – haute  
montagne – géoïde

Pour ces quinze étudiants du Master en Science de Management des Systèmes d'Information et Applications Géographiques (MSIAG) de l'ENSG, le début de l'été a constitué l'aboutissement de près d'un an de travail pour organiser une mission qui a réuni l'ensemble de cette promotion ainsi que des encadrants de l'école, et surtout des guides du Groupe Militaire de Haute Montagne (GMHM). Tout ce beau monde mobilisé autour d'une même cause, celle de Mesures Altimétriques et Gravimétriques du Mont-Blanc après Ascension (MAGMA), ou le désir d'assurer la continuité des mesures déjà effectuées sur le massif du Mont-Blanc par des géomètres experts.



## Objectifs scientifiques de la mission

En effet, les Géomètres Experts de Haute-Savoie, en collaboration avec l'IGN et Leica, avaient déjà réalisé avec succès deux mesures de l'altitude du Mont-Blanc, respectivement en 2001 et

en 2003, à l'aide de techniques de positionnement par GPS. La mission MAGMA comprend donc une réitération de cette mesure d'altitude par des techniques similaires, dans le but de suivre les fluctuations de l'altitude du Mont-Blanc. Cependant, la démarche MAGMA va plus loin : son originalité vient de ce que chaque mesure altimétrique est couplée à une mesure du champ de pesanteur terrestre au même point. L'utilité d'une telle combinaison ne peut se comprendre que si l'on connaît le principe de détermination d'une altitude à partir de mesures GPS. Nous expliquerons donc pourquoi une connaissance fine du champ de pesanteur terrestre dans la zone d'étude est indispensable pour assurer une bonne précision sur la mesure d'altitude.

Les mesures gravimétriques servent également aux géophysiciens pour établir des modèles décrivant la densité des roches dans le sous-sol des zones couvertes. En général, les massifs montagneux d'accès difficile sont très

pauvres en mesures gravimétriques, ce qui complique le calcul des modèles dans ces régions. Or, l'étude des chaînes de montagnes est d'une importance capitale pour comprendre le mouvement des plaques tectoniques à grande échelle (en l'occurrence pour les Alpes, le mouvement relatif de la plaque africaine par rapport à la plaque eurasiennne). Les géophysiciens sont très demandeurs de nouvelles données pour raffiner leurs modèles, d'où l'idée d'enrichir la mission MAGMA d'un volet consacré à des mesures géophysiques.

La réalisation d'un profil de mesures conjointes GPS/champ de pesanteur a donc été prévue dans la Vallée Blanche à l'aplomb du tunnel du Mont-Blanc. Le choix du site n'est pas fortuit puisque le champ de pesanteur à l'intérieur du tunnel a déjà été cartographié avec précision, et l'acquisition de mesures en surface permettrait d'obtenir la carte du champ de pesanteur sur deux niveaux d'une seule et même structure géologique. Une telle configuration de données est très rare en géophysique, mais extrêmement instructive du point de vue de la modélisation des roches.



## Principe de la mesure

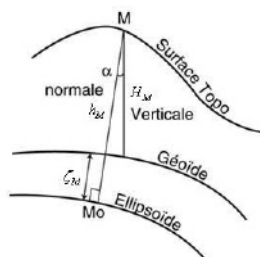
C'est le DPTS (Département de Positionnement Terrestre et Spatial) de l'ENSG qui a encadré la partie technique du projet en formant les élèves aux théories et pratiques liées aux techniques de mesures qu'ils allaient appliquer plus tard sur le massif.

D'un point de vue géométrique, l'altitude d'un point correspond à la distance verticale qui le sépare de la surface d'altitude 0 m. Dans le système d'altitudes normales IGN69 utilisé en France, cette surface correspond au quasi-géoïde dont un modèle d'ondulation est donné par la "Référence des Altitudes Françaises" RAF98. L'altitude normale peut être mesurée par des techniques de nivellement en réalisant un cheminement depuis un point de référence dont l'altitude est connue dans le même système. Un tel cheminement n'est pas nécessaire avec le système de positionnement GPS. Ce dernier fournit directement les coordonnées géographiques du point de mesure, constituées de la longitude, la latitude géographique et la hauteur ellipsoïdale. Cette grandeur correspond à la distance verticale qui sépare le point de mesure de l'ellipsoïde GRS80 associé au système géodésique français RGF93, version raffinée du système mondial WGS84 utilisé par le système GPS. Sachant que les ondulations du quasi-géoïde sont mesurées par rapport au même ellipsoïde, l'altitude normale,  $H_M$ , peut se calculer en effectuant la différence entre la hauteur ellipsoïdale,  $h_M$  et l'ondulation du quasi-géoïde,  $\xi_M$  au même point

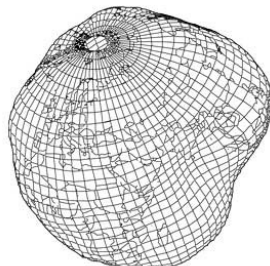
$$H_M = h_M - \xi_M \quad (0.1)$$

Cette relation n'est qu'une approximation ; elle revient à confondre localement la normale à l'ellipsoïde avec la normale au quasi-géoïde, c'est-à-dire, à négliger la déviation de la verticale. Cette approximation est justifiée par le fait que l'erreur commise en la réalisant est inférieure à la précision de détermination de la hauteur ellipsoïdale et de l'ondulation du quasi-géoïde.

La détermination d'une altitude à partir de mesures GPS nécessite donc, en plus des données GPS proprement dites, un modèle le plus fidèle possible des ondulations du quasi-géoïde sur la zone étudiée.



Surface topographique, géoïde, ellipsoïde  
(source <http://pse.ensg.ign.fr>)



Géoïde exagéré 15000 fois  
(source <http://pse.ensg.ign.fr>)

## Précision de la détermination d'altitude

L'écart-type  $\sigma_H$  obtenu sur l'altitude dépend de ceux obtenus respectivement sur la hauteur ellipsoïdale,  $\sigma_h$ , et sur l'ondulation du quasi-géoïde,  $\sigma_\xi$ , au point considéré. En supposant ces deux grandeurs comme des variables aléatoires indépendantes, l'écart-type  $\sigma_H$  peut se calculer par  $\sigma_H = \sqrt{\sigma_h^2 + \sigma_\xi^2}$  (0.2)

La précision moyenne sur la détermination de la hauteur ellipsoïdale par GPS est de l'ordre de 4 cm. Les ondulations du quasi-géoïde sont, quant à elles, connues avec une précision moyenne de 3 cm, valeur qui se dégrade dans les régions montagneuses. L'écart-type attendu sur la mesure de l'altitude est donc égal à  $\sqrt{4^2 + 3^2} = \sqrt{25} = 5 \text{ cm}$ .

Améliorer sensiblement la précision obtenue sur la hauteur ellipsoïdale



Le gravimètre de l'IPGP, enveloppé dans sa housse isotherme

nécessiterait des sessions d'enregistrement longues et de multiples réoccupations, chose difficile à réaliser dans le cadre d'une campagne de mesures en haute montagne. En revanche, il est possible d'améliorer localement la précision obtenue sur l'ondulation du quasi-géoïde en densifiant le jeu de données gravimétriques disponibles au voisinage de la zone d'étude. En effet, cette ondulation, en un point donné, s'obtient par intégration des anomalies du champ de pesanteur sur la totalité de la surface terrestre. L'évaluation pratique de cette intégrale, appelée intégrale de Stokes, suppose un échantillonnage fin du champ de pesanteur sur une zone suffisamment étendue autour du point de mesure. Toute nouvelle mesure gravimétrique permet donc de raffiner localement le modèle de quasi-géoïde, chose qui a motivé l'acquisition de mesures GPS et gravimétriques "co-localisées".

## Protocole expérimental

### Mesures GPS

Le DPTS a choisi d'utiliser des couples de récepteurs GPS géodésiques bi-fréquences en mode statique différentiel. Dans ce mode de fonctionnement, le récepteur stationné au point de mesure fonctionne conjointement avec un autre récepteur placé en un point de référence de coordonnées connues. Le traitement des données consiste ensuite à estimer la longueur de la ligne de base reliant les deux récepteurs, à partir des



Récepteur GPS Leica 1200



signaux de phase enregistrés sur les ondes L1 et L2, et en déduire les coordonnées du point de mesure. Une durée d'enregistrement de 15 minutes à raison d'une mesure toute les 15 secondes, permet d'obtenir une précision centimétrique pour des lignes de base de longueur inférieure à 5 km. Il convient d'ajouter à la durée d'enregistrement 3 minutes par kilomètre supplémentaire, ce qui donne 30 minutes à 10 Km et 45 minutes à 15 Km. Les hauteurs d'antenne ont été soigneusement mesurées et les décalages des centres de phase des antennes pris en compte.

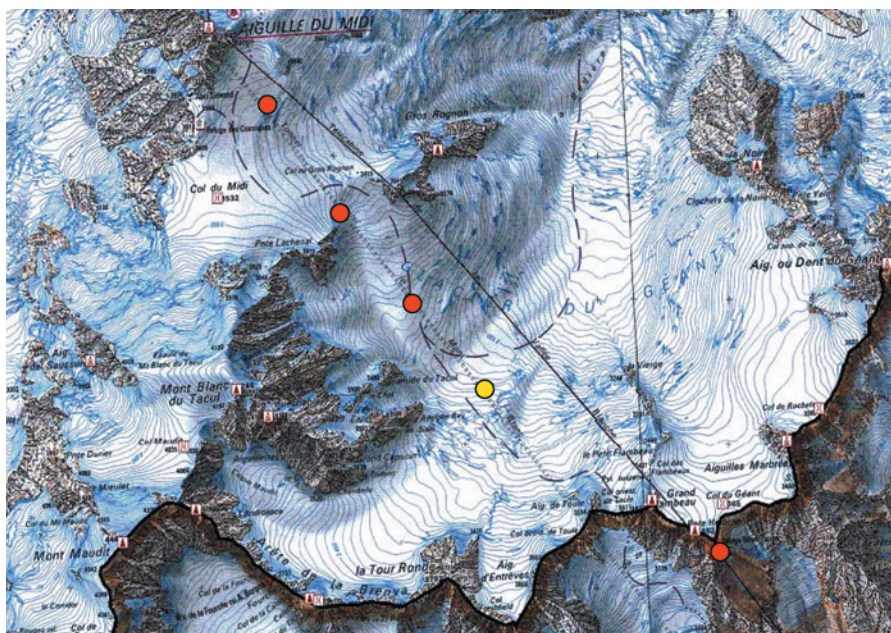
### ■ Mesures gravimétriques

Le gravimètre CG-3M de la société "Scintrex" (Concord, Ontario, Canada) est un instrument qui permet de mesurer les variations de la pesanteur terrestre avec une précision de l'ordre de  $10 \mu\text{gal}$  c'est-à-dire 100 millionième de la pesanteur terrestre moyenne. L'instrument doit être nivelé à chaque mesure, de sorte que sa direction sensible coïncide avec la verticale du lieu. Il nécessite également un point de base où la valeur absolue de la pesanteur a été préalablement déterminée, et où débiteront et aboutiront toutes les mesures relatives réalisées avec le gravimètre. Cette base peut être obtenue par un rattachement aux points de référence du réseau gravimétrique français. Enfin, chaque série de mesures doit comporter, outre le point de base, au minimum une réoccupation afin d'estimer la dérive temporelle de l'appareil au cours de la journée.

Chaque mesure gravimétrique correspond à une moyenne obtenue sur 100 échantillons acquis au rythme d'un échantillon par seconde. La mesure est répétée 3 fois en chaque point. Une mesure est acceptable lorsque son écart-type est inférieur à  $10 \mu\text{Gal}$ . La mesure globale est considérée comme correcte lorsque l'écart entre les 3 mesures individuelles n'excède pas  $10 \mu\text{Gal}$ .

### Objectifs atteints

Un point presse organisé le vendredi 2 juillet dans les locaux de l'Ecole Militaire de Haute Montagne, en présence de MM. Michel Charlet et Jean-Marc Peillex, maires respectifs des communes de Chamonix et St Gervais,



Répartition des points fixes dans le tunnel du Mont-Blanc  
(source IGN Rando) - ● Point fixe mesuré - ● Point fixe non mesuré



Itinéraire de la "Mission Mont-Blanc" (source IGN Rando)



L'équipe de la "Mission Vallée Blanche"



clôt la mission MAGMA. L'occasion de constater que les objectifs scientifiques initialement fixés ont été atteints lors des deux séries de mesures effectuées durant l'expédition.

Pour commencer, la "mission Vallée Blanche", composée de huit élèves du Master, accompagnés de trois guides du GMHM et de trois encadrants de l'IGN, consistait à faire, à l'aplomb du tunnel du Mont-Blanc, des mesures à la verticale de quatre points du tunnel à l'emplacement desquels des mesures gravimétriques avaient été effectuées en 2001. Ce qui permet de disposer désormais d'un jeu de données géophysiques exceptionnel, de par les éléments gravimétriques recueillis à la fois à l'intérieur et à l'aplomb d'une même structure géologique, à savoir le tunnel de la Vallée Blanche.

Deuxièmement, la "mission Mont-Blanc", composée des six autres élèves, cinq guides du GMHM, quatre encadrants de l'IGN ainsi qu'un géomètre expert d'Annecy, avait pour but l'ascension du Mont-Blanc, en vue de mesures combinées GPS/champ de pesanteur au sommet. Les conditions de vent, de grêle et de brouillard épais interdisant l'ascension, l'expédition s'interrompt, par mesure de sécurité, au Refuge de Vallot à 4 362 mètres d'altitude, où sont effectuées les mesures prévues, ce qui constitue un cas rare de mesures conjointes GPS/champ de pesanteur à plus de 4 000 mètres d'altitude. Cette acquisition combinée de données altimétriques et gravimétriques ouvre des perspectives de nouvelles mesures couplées GPS/champ de pesanteur à proximité du toit de l'Europe dans un avenir proche.

D'autre part, l'équipe pédagogique en charge du Master MSIAG peut se féliciter d'avoir proposé à ses étudiants un



L'équipe de la "mission Mont-Blanc"

projet à la réussite duquel vient s'ajouter la satisfaction d'avoir mobilisé l'ensemble de la promotion, pour l'organisation d'une mission au cours de laquelle le gravimètre a joué un rôle prépondérant. A tel point qu'aux dires des guides du GMHM, *"le gravimètre a été le personnage central de la semaine. Comme pour tout autre participant de la mission, il a fait du dénivelé, il a effectué ses mesures, on s'est préoccupé de sa bonne santé. Il a finalement été considéré comme une personne à part entière, durant cette expédition."*

Vu son succès, il ne fait aucun doute que la cuvée MAGMA 2004 en appellera d'autres. C'est dire si les appareils de mesures gravimétriques vont susciter les convoitises en haute montagne, par exemple du côté du massif du Mont-Blanc, pour commencer. Les élèves du Master MSIAG eux-mêmes seront les premiers à encourager leurs successeurs à prendre leur relais, toujours dans cette optique de mise en place d'un observatoire des fluctuations du sommet du Mont-Blanc.

## Remerciements

Outre nos différents partenaires, à savoir l'AFT, l'IGN, le GMHM, la société Leica-Geosystem qui nous a prêté gracieusement quatre GPS 1200, l'OGE, l'association B-sharp, les sociétés Fit conseil,

Salomon, Petzl, Autodesk, Atlog, EADS, ESRI France, la Compagnie du Mont-Blanc, Funivie Monte Bianco et la Société Générale, sans qui le projet MAGMA n'aurait pas été possible. Nous tenons à remercier particulièrement Michel Diamant, Directeur du laboratoire de Gravimétrie et Géodynamique de l'IPGP, qui nous a prêté un gravimètre et à souligner le travail de Jérôme Amman, l'ingénieur qui a conçu et réalisé la housse isotherme du gravimètre. ●

## Contacts

<http://magma.ensg.ign.fr>  
Département de Positionnement Terrestre et Spatial - Ecole Nationale des Sciences Géographiques - 6 & 8 avenue Blaise Pascal  
Cité Descartes - Champs-sur-Marne  
77455 MARNE-LA-VALLEE CEDEX 2  
Tél. : 01 64 15 31 09  
Courriel : [verdun@ensg.ign.fr](mailto:verdun@ensg.ign.fr)  
[botton@ensg.ign.fr](mailto:botton@ensg.ign.fr)

## ABSTRACT

**Key words:** Combined GPS/gravity field measures – gravimeter – fixed points – altitude – high mountain – geoids

*As we wrote it in our previous edition (XYZ #99), students of the Ecole Nationale des Sciences Géographiques went on the Mont-Blanc mountain between June 28th and July 2nd 2004 in order to do altimetric and gravimetric surveys. The local 'Groupe Militaire de Haute Montagne' (GMHM) was in charge of that mission called MAGMA. The purpose of that mission was to improve the geoid under the alpine massif. That mission was very peculiar because it combined GPS data with measures of gravity field variation, obtained by a gravimeter.*



# Les pays du sourire...

■ Par Pierre RODRIGUEZ, Paul COURBON et Philippe PELLEGRINI

*Les missions sont toutes différentes mais conservent une constante :  
nous avons la chance de travailler dans des pays de sourire...*



## De la mission Madagascar 2003

▲ Où l'on voit Pedro, l'as de la débrouillardise informatique, sauver les fichiers des relevés, effectuer les calculs de contrôle, toujours la nuit pour que les lendemains soient opérationnels...

Où notre ami Pellegrini, après avoir vainement tenté d'accrocher un parrainage financier de la Ville de Lyon en visite sur le projet d'adduction d'eau, doit fermer sa valise et ... ouvrir ses cadeaux d'adieu préparés par les Sœurs qui hébergeaient la Mission...

▲ Où l'ami Florent est accueilli dans la famille de son aide topographe de quelques jours...

Et où la petite fille espiègle qui nous a suivi tout le jour durant se laisse petit à petit apprivoiser par ces étranges géomètres venus d'ailleurs et leur offre ce merveilleux cadeau d'un visage éclairé par la joie de la rencontre... ►



## De la mission Bénin 2004

Où Paul, ici au milieu de ses élèves, nous envoie ce mél en fin de mission : *"tout s'est bien passé à Cotonou où les gens sont toujours aussi sympathiques... Nous sommes souvent obligés de constater que nos différences de culture et d'éducation nous donnent des logiques très différentes."*

Lesquelles "logiques" n'empêchent pas l'école Béninoise de grandir au point de construire des locaux qui deviennent impres-

sionnants, signe de sa vitalité et de la justesse de notre choix de partager avec les élèves africains notre savoir... contre une ambiance familiale extraordinaire et des sourires tout au long des jours passés là-bas... Merci à Maximilienne et Constantin BAH ! Et où le bureau de GSF ne peut vous fournir de cliché vous montrant ses membres la mine défaite de ne pouvoir proposer de mission à toutes les demandes de volontaires...





# Jean Dewasne :

■ Adriana MIRI et Jean-Pierre MAILLARD

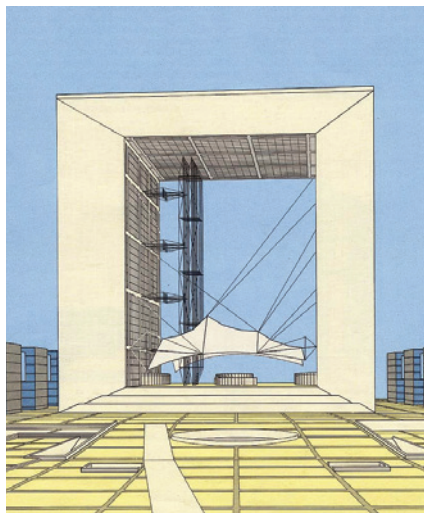
*Le n°100 d'xyz mérite la découverte et l'analyse d'une œuvre remarquable. Sans préjuger de sa grandeur au sens de la reconnaissance universelle que seul le temps saura conférer, "Art et géométrie" s'intéresse pour cette revue exceptionnelle aux deux immenses fresques de Jean Dewasne réalisées dans le bâtiment sud de l'Arche de la Défense dont les mêmes démesures sont égales à 70 m x 100 m. Le sujet étant conséquent, la rubrique est cette fois écrite à deux mains, Adriana Miri ayant souhaité partager la recherche et participer à la rédaction. Sa contribution est heureuse et bienvenue.*

## La Grande Arche

L'édifice est implanté dans l'axe historique de Paris: Palais du Louvre – Place de la Concorde – Place de l'Etoile – Rond-point de la Défense, ce dernier ayant fait place, dès 1958, au quartier d'affaires international. Il aura fallu trois présidents de la République et trois concours d'architecture pour qu'un projet visant à marquer l'autre extrémité de l'axe historique, la "Tête Défense", soit réalisé. Il est l'œuvre d'un architecte danois, alors professeur à l'Académie royale des Beaux-arts de Copenhague, Johan Otto Von Spreckelsen. Sa proposition a été jugée *"remarquable par sa pureté, par sa force (...) et par son ouverture"*. En s'affranchissant de la préoccupation de la fermeture de l'axe historique, Otto Von Spreckelsen lui a donné un avenir et, paradoxalement, a fourni la meilleure réponse architecturale dans un environnement d'immeubles de plus grande hauteur.

La Grande Arche se présente comme un gigantesque cube évidé de plus de cent mètres de côté. Pour apprécier l'échelle, notons que le vide central pourrait par ses dimensions (70 m de large et 90 m de haut) accueillir Notre-Dame de Paris et sa flèche.

La nécessité d'aligner deux rangées de six piles pour supporter la construction dans un sous-sol encombré de voies de circulation a conduit l'architecte à valider un pivotement de 6° 30 si caractéris-



tique de l'orientation du monument. On y voit aussi un parallèle avec la rotation d'un même angle de l'axe du Palais du Louvre proprement dit avec l'axe historique. Otto Von Spreckelsen s'est d'ailleurs félicité d'une implantation désaxée qui permette au cube d'apparaître en volume. Pour ajouter au prestige, l'utilisation du marbre de Carrare et celle du verre donnent un air de palais à l'ensemble. Pour s'en convaincre, il suffit de gravir les trois volées d'escaliers si blanches et si raides permettant, depuis le parvis, l'accès au rez-de-dalle, la descente des bâtiments.

Ces bâtiments sont improprement baptisés "paroi" puisque ce vocable s'attache à une surface. Prenant acte de l'évolution de langage sans forcément y souscrire, il est constaté que la Paroi

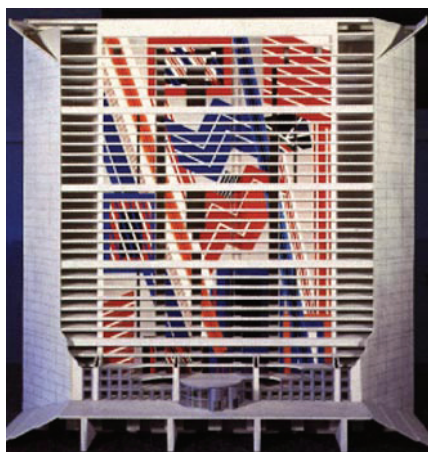
Sud abrite le Ministère de l'équipement et que la Paroi Nord est occupée par des grandes entreprises nationales et internationales. Pour sa part, le Toit de l'Arche a été affecté à la Fondation internationale des droits de l'Homme et des sciences de l'humain, aujourd'hui sans avenir, et reçoit les nombreux touristes qui vont admirer une vue imprenable sur Paris et vérifier l'alignement de l'axe historique.

La Grande Arche a été inaugurée le 14 juillet 1989 lors du sommet des chefs d'Etat invités à l'occasion du bicentenaire de la Révolution française et a constitué un des Grands travaux décidés sous la présidence de François Mitterrand. Dans ce cadre, le Ministère de la culture a financé une intervention plastique "à la hauteur du projet". Sur proposition d'Otto Von Spreckelsen qui connaissait le travail de Jean Dewasne, ce dernier ayant réalisé une peinture pour une usine du Danemark en 1979, une commande publique a été passée à l'artiste à qui il a été demandé une conception coordonnée à celle de la maîtrise d'œuvre du projet.

## Les plus grandes fresques du monde

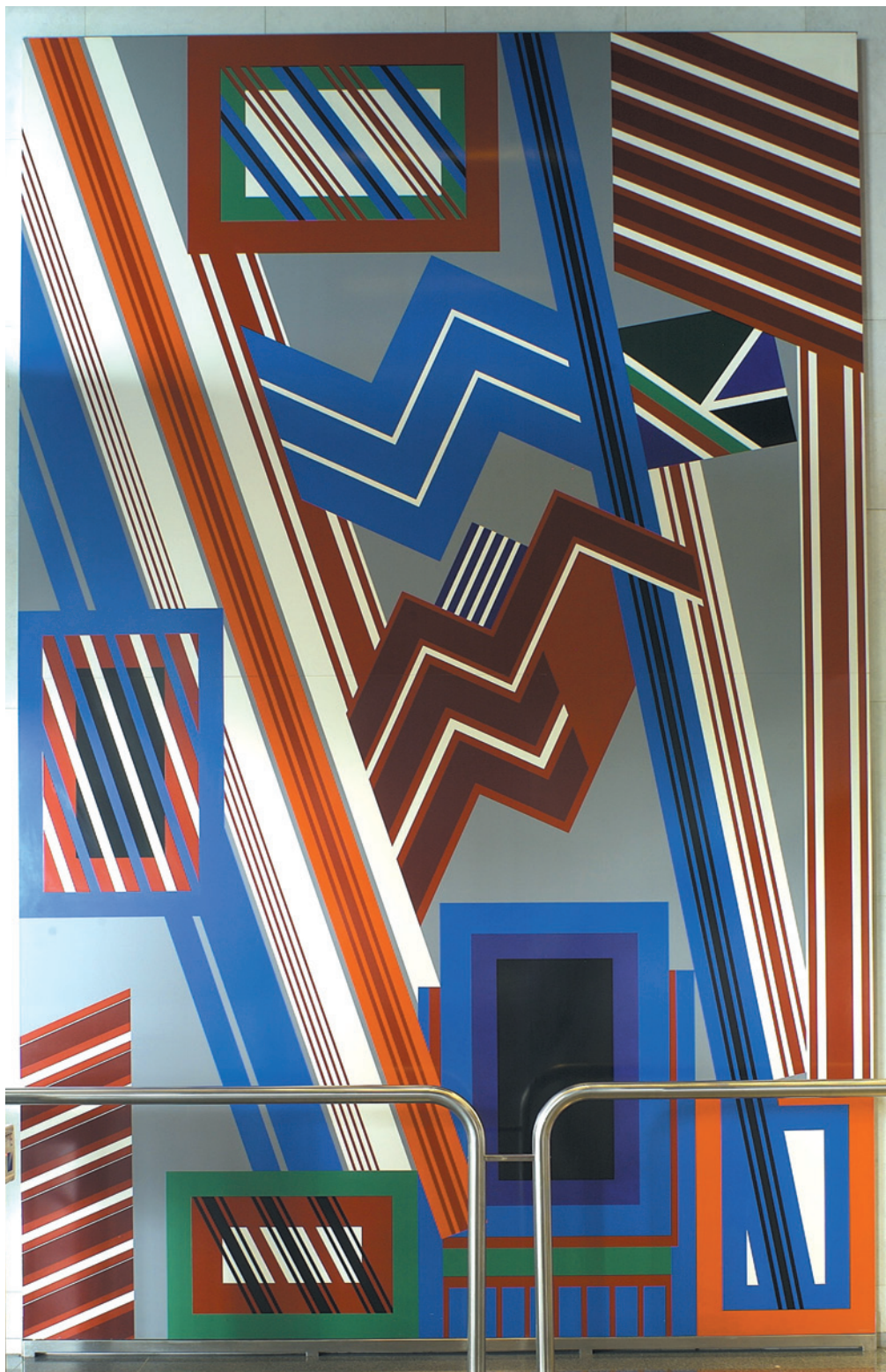
La seule vue d'ensemble des deux fresques se présente sous la forme de deux panneaux originaux réalisés à l'échelle du 1/20<sup>e</sup> accrochés dans le hall du Ministère de l'équipement situé, comme l'entrée, au 3<sup>e</sup> étage du bâtiment. La particularité du rendu consiste à une transposition de la peinture à l'échelle 1 par bandes successives, du 5<sup>e</sup> étage au 34<sup>e</sup>, couloir après couloir. Ainsi, les murs des couloirs sont égayés de couleurs pures en nombre limité (du bleu, du blanc, ... et du noir principalement) inscrites dans des formes géométriques simples (rectangle, triangle,...). Cette démarche

# De l'art à l'hectare



conceptuelle rend impossible à tout jamais d'appréhender l'œuvre dans son entier à l'échelle 1. En revanche, elle peut être comprise par les utilisateurs des couloirs qui perçoivent une décoration différente à chaque étage et, dans le même temps le sentiment, même inconscient, d'une unité. Les plus avertis trouveront peut-être la sensation d'une appropriation voire celle de rentrer dans l'œuvre. S'agissant pour la plupart de fonctionnaires ils devraient être sensibles aux couleurs de la nation, bleu, blanc, rouge, tant Jean Dewasne les utilise. Pour un visiteur occasionnel, la référence au drapeau national est évidente, même si elle ne s'impose pas exagérément. Au-delà de l'évocation du sentiment patriotique, le dessin des surfaces colorées révèle le mouvement et dégage une énergie qui devrait avoir une influence roborative sur le personnel des bureaux.

Les peintures ont été faites comme "à fresco" par une équipe de peintres italiens. Réalisées avec soin, elles n'en subissent pas moins les outrages d'une occupation à usage de bureaux. Il sera cependant loisible aux gestionnaires, en tant que de besoin et le moment venu, de reconstituer une peinture à l'identique dès lors que les





■■■ dessins des polygones sont connus et les références des peintures répertoire.

Aux 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> étages, le dessin des formes géométriques a été harmonisé avec l'échelle du 1/20<sup>e</sup> des panneaux du hall. Les peintures de ces deux étages ont été faites sur de la tôle cette dernière ayant été passée au four tout comme le sont les panneaux de signalisation, sans doute un clin d'œil au Ministère de l'équipement.

Le thème des droits de l'Homme et de la Fraternité en général s'est inscrit en filigrane dans le projet de la Grande Arche. Il n'est donc pas surprenant que Jean Dewasne ait été invité à exprimer les liaisons unissant la pensée et les êtres humains. Sa réponse a le mérite de signifier que même si l'on ne le voit pas, on fait partie d'un tout.

Le projet global visait à une seconde intervention de Jean Dewasne sur la Paroi Nord. A ce jour, il reste à financer.

## L'œuvre de Jean Dewasne

D'une manière globale, on peut décrire l'œuvre de Jean Dewasne, par une connaissance et une utilisation en profondeur de la couleur. Ces couleurs deviennent expressives à travers des systèmes de formes et structures très complexes. Une relation intense se dessine entre la forme, la structure et la couleur. Cette relation constitue la force de ses œuvres et crée la transformation dynamique des tableaux. Il fonde un concept bien défini (mais complexe en même temps) de départ, qui se développe au fur et à mesure de la lecture analytique de l'œuvre.

L'idée plastique est exprimée par la mise en place d'un nombre assez réduit de couleurs (quatre ou cinq) qui évoluent selon des formes géométriques précises. La lecture des tableaux s'effectue d'une manière dynamique. Les formes données par les couleurs augmentent et finissent par se joindre selon des axes ou des lignes sinueuses. Ce sont les couleurs même qui créent les formes lors de leur développement. En s'étalant, elles se dispersent et entrent en contact avec les couleurs voisines créant parfois des glissements, parfois des pressions, selon des axes visibles ou non.

La peinture abstraite s'appuie sur les qualités et la valeur émotionnelle de la couleur, de la forme et de la structure. La complexité expressive de l'œuvre naît par la composition de ces éléments. Chez Dewasne il est difficile de faire une analyse des éléments séparément. Son œuvre n'est lisible seulement que d'une manière globale. En analysant l'œuvre totalement et en mouvement, on peut mettre en évidence et comprendre la valeur de chaque forme (toujours en relation avec les autres), et de chaque plage de couleur (toujours en relation avec la structure, le rythme et les tracés régulateurs du tableau).

Si Kandinsky jugeait chaque forme et chaque couleur isolément, pour Dewasne chaque forme ou couleur fait appel à d'autres formes ou couleurs. Selon cette juxtaposition, il y a un développement et une transformation qui peuvent donner des événements plas-







tiques inattendus et créer de nouveaux rythmes et structures. Cela constitue la richesse de son œuvre. Les formes, les couleurs, les structures agissent ensemble tantôt par similitude, tantôt par symétrie, tantôt par alternance. Les formes s'étirent, se ferment et s'ouvrent créant une surface élastique et même s'il s'agit d'un plan, ce mouvement attribue par moments des qualités d'espace.

L'organisation des formes qui coule au premier regard d'une façon spontanée, suit après une analyse plus profonde, des tracés régulateurs en forme de courbes très souples et complexes. Ici, une ligne devient une vraie figure plastique, plus loin une courbe est matérialisée ou au contraire est coupée d'une contre-courbe.

## Jean Dewasne

Jean Dewasne est né à Lille en 1921. Il est mort à Paris en 1999.

Après des études de musique et de philosophie, Jean Dewasne suit une formation d'architecte et s'engage en 1943 dans l'abstraction. En 1946 il intègre le comité

fondateur du Salon des réalités nouvelles où il rejoint Sonia Delaunay, Albert Gleizes et Auguste Herbin qui exercera sur lui une influence déterminante. Il en démissionnera dès 1949, pour des raisons idéologiques, année au cours de laquelle il crée, avec Edgard Pillet, l'Atelier d'art abstrait de la Grande chaumière, lieu de recherche et de conférences. Il y enseignera la technologie de la peinture et ses nouveaux composants.

Au début des années cinquante, il découvre la laque industrielle et peint des éléments de carrosserie automobile emboutis qu'il nomme Antisculptures. Il n'est donc pas surprenant que la collection d'art contemporain des automobiles Renault constituée entre 1966 et 1985, s'enrichisse des œuvres de Jean Dewasne, une façon de montrer l'ancrage de l'entreprise dans son siècle et de souligner son caractère novateur. Par suite, en 1972, Jean Dewasne travaille, toujours pour Renault, à la réalisation de vingt-quatre sculptures monumentales assemblées à partir d'éléments de châssis de camions SAVIEM qui s'inscrit dans sa production d'Antisculptures. L'ensemble, terminé en 1975 fera l'objet

d'une exposition au Musée national d'art moderne la même année. De même, pour la construction du siège social du Point-du-Jour à Boulogne-Billancourt, Jean Dewasne fait intégrer sur chacun des quatre paliers du bâtiment réservé à l'informatique quatre longs panneaux muraux - de la peinture glycérophthalique sur bois - dont les dessins géométriques, déclinaisons abstraites et très graphiques de l'univers automobile, renvoient les uns aux autres.

Entre temps, il développera son goût pour les dimensions monumentales en réalisant, entre autres, une commande pour le stade de glace de Grenoble à l'occasion des Jeux Olympiques de 1968 dénommée la Longue Marche. Cette fresque de 86 m de longueur déploie des arabesques cinétiques dont les couleurs renforcent l'impression de mouvement.

Jean Dewasne apparaît ainsi comme un athlète de la peinture, un créateur qui n'a eu de cesse de vouloir montrer son savoir faire sur des surfaces de plus en plus étendues, de vouloir être le premier dans le domaine de l'art et de l'industrie. Il faut saluer la performance. ●