

Cahier "Méchain et la longueur du mètre"

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



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

Dépôt légal

3^e trimestre 2004 ISSN 0290-9057

N° CPPAP: 0106 G 80866

Tirage de ce numéro: 1600 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. 87

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 • Site internet: <http://www.aftopo.org>

■ Editorial 5**■ Info-Topo**

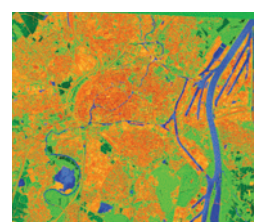
> Les informations de la profession 7

■ Manifestations

> "Quelle données topographiques pour un SIG
territorial? "aux Journées de la Topographie
2004 - Jacques LEDIG 17

> Intergeo®, salon international
de la géodésie, de la géomatique
et de la gestion du territoire
Olivier REIS 21

> Le IX^e Congrès International
des Égyptologues à Grenoble
Élise MEYER 23

■ Télédétection

> Analyse orientée-
objet pour la
détection de
bâtiments à partir
d'une image
satellitaire à très
haute résolution
spatiale

BOULAASSAL H., NEUSCH T. 25

**■ Cahier "Méchain
et la longueur du mètre"**

> Introduction du cahier "Méchain
et la longueur du mètre" Michel KASSER 30

> Pierre-François-André Méchain -
Quelques jalons
Suzanne DÉBARBAT 31

> La galerie des instruments anciens
de l'IGN Jean-Claude LEBLANC
Daniel SCHELSTRAETE 34

> Géodésie publique et géodésie privée
Pierre André Méchain et sa seconde mission
en Espagne, 1803-1804
Antonio E. TEN 37

> Le premier nivellement géodésique
de la France à partir des mesures faites
par Delambre et Méchain sur la méridienne
de Paris - Robert VINCENT 40

> Plaidoyer pour la géodésie
André FONTAINE 43

> La double triangulation de Méchain en Espagne
Simone DUMONT 45

> Les progrès des méthodes géodésiques:
instruments ou moyens de calcul?
Michel KASSER 47

> Métrologie de la Terre, systèmes de
référence: aspects historiques et modernes
Géraldine BOURDA - Nicole CAPITAIN 49

> Métrologie de fréquence dans le domaine
optique à l'Observatoire de Paris
Giovanni Daniele ROVERA 53

> Evolution de la géodésie en France
Géraldine BOURDA - Nicole CAPITAIN 55

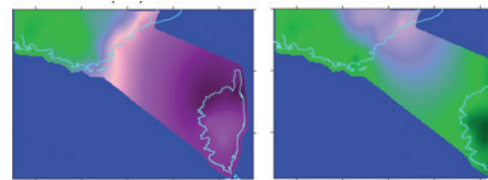
> Evolution de la géodésie en France
Françoise DUQUENNE 55

> Le Réseau GPS Permanent
Thierry DUQUESNOY 58

> Conclusion en forme d'épilogue
Suzanne DÉBARBAT 59

■ SIG

> SIG, une histoire de définitions...
Mathieu KOEHL 61

■ Géodésie

> Amélioration du champ de pesanteur
et du géoïde autour de la Corse par gravimétrie
aéroportée - H. DUQUENNE - A.V. OLESEN
R. FORSBERG - A. GIDSKEHAUG 67

■ Réglementation

> Droits de préemption en aménagement
et autres - Jean-Pierre MAILLARD 75

■ GSF

> Izay iray vatsy, iray aina - Ceux qui ont
les mêmes provisions de voyage sont unis
dans la vie - François BODIN 81

■ Art et Géométrie

> Yvette Velay: la couleur et l'écriture
Jean-Pierre MAILLARD 82

■ Livres 84

Pour la recherche de nos annonceurs
consulter la page 85.

*S'ils s'en tiennent seulement à son titre, **xyz**, les étrangers aux mathématiques, à la cartographie, à la topomatique et au GPS peuvent penser que la revue réunit des gens de lettres, en s'interrogeant toutefois sur leur dernier rang dans l'alphabet...*

*Les moins attentifs lisent plutôt "ksize" qu'**x**, **y**, **z** et cherchent dans le dictionnaire le sens du mot inconnu. Voilà ce qu'il en coûte d'abandonner les virgules d'origine séparant la voyelle des consonnes!*

Pourtant nul besoin de sourire des béotiens car ils ont aussi raison. Les scientifiques, les techniciens et les historiens auteurs d'articles publiés par la revue sont par nécessité et souvent par plaisir des hommes et des femmes d'écriture. Pourquoi pas vous?

Depuis plusieurs numéros André Bailly et Emmanuel Natchitz responsables de la publication vous y invitent. N'hésitez pas à leur répondre positivement. Une simple lettre pour le courrier des lecteurs, une information à faire partager et tous articles qui ne demandent qu'à paraître sont attendus. Ainsi vous contribuez aux échanges de connaissances et enrichirez la vie associative, vecteur de la publication. D'une certaine façon, vous défendrez aussi la langue française dont on mesure la perte d'influence notamment dans le petit monde de la FIG. Les domaines sont bien connus: cartographie, génie civil, géodésie, géomatique, histoire, hydrographie, métrologie, photogrammétrie, SIG, topographie, topométrie. Ils n'en sont pas pour autant limitatifs. A titre d'exemple la rubrique "Réglementation" ouvre un champ considérable d'investigations compte-tenu de la judiciarisation de la société.

Ne faudra-t-il pas bientôt arpenter avec un code de la topographie sous le bras? L'article de la page 75 sur "Les droits de préemption en aménagement et autres" illustre cet élargissement et devrait retenir, en particulier, l'attention des géomètres-experts fonciers.

Par ailleurs ce numéro d'XYZ rend largement compte des Journées Méchain organisées par l'AFT les 22 et 23 septembre 2004 à l'Observatoire de Paris. Vous trouverez, inséré dans la revue, le cahier spécial rapportant le contenu des conférences historiques et de celles relatives à l'actualité topographique.

Bonne lecture, et qui sait, pour l'avenir, bonne écriture.

Jean-Pierre Maillard

■ Le GéoRépertoire de Nouvelle Calédonie

Le catalogue des données géographiques calédoniennes est désormais disponible à l'adresse suivante :

<http://www.georep.nc>

S'inscrivant dans un cadre global de documentation des données spatiales, ce site Internet n'est que la partie visible d'un projet qui comporte en amont le développement d'outils spécialisés (éditeurs de métadonnées, programme d'export de projet SIG au format Web - XML - SVG) et en aval une politique de sensibilisation - formation - communication auprès des utilisateurs réguliers des technologies SIG.

Ce projet vient d'ailleurs de recevoir le 1^{er} prix du concours des applications à la conférence francophone ESRI, SIG 2004 où la revue XYZ était partenaire presse.

► **Plus d'infos sur**
<http://www.georep.nc>

■ 1979-2004 SIRAP fête ses 25 ans

Fondé en 1979, Sirap voit ses racines remontées à 1974. A cette époque l'informatique relevait de l'aventure. Son fondateur et actuel dirigeant utilise alors le premier "ordinateur" du cabinet de géomètre BEAUR de Valence pour écrire des programmes de calcul de précision pour le contrôle des ouvrage d'art de l'autoroute A7.

Convaincu de l'utilité de ces nouveaux outils, les fondateurs se sont investis dans la programmation de logiciels de topographie.

Les logiciels SIRAP se sont rapidement améliorés pour s'appliquer aux calculs de profils et de cubatures, aux remembrements et aux réseaux électriques.

Avec l'arrivée de Windows, c'est une véritable révolution qui secoue le monde informatique. Les outils

SIRAP vont passer du stade d'outils réservés aux spécialistes au stade de logiciels accessibles à tous.

Depuis sa création et au fil de son histoire, SIRAP a toujours eu la volonté d'orienter son développement dans les domaines innovants comme le SIG (EDITOP), internet (TOPONET) ou plus récemment dans le domaine du suivi et du guidage par GPS.

En 2003, lors du sommet du G8, EDITOP était l'outil central pour la transmission entre le Poste de Commandement Général et les postes avancés. Avec cette solution, les différents responsables des opérations disposaient d'une visibilité immédiate, globale et précise sur les 16 000 gendarmes, policiers et militaires dispersés sur le terrain pour assurer la sécurité des 27 chefs d'état présents.

► **Pour plus d'info: www.sirap.fr**

UNITE MOBILE DE BATHYMETRIE MULTIFAISCEAUX SURVEX

Levés bathymétriques à 100% des fonds et ouvrages immergés
Prestations à partir d'1 jour sur site



www.smf-europe.fr
mrms@mesuris.com

Bathymétrie haute résolution et Imagerie Sonar latéral simultanées

Productivité exceptionnelle avec Navigation Inertielle
1 port de plaisance ou 20 Km de Canal par jour
Bathymétrie et Imagerie simultanées de 3,5 à 16 Nœuds



MESURIS RENNES
19 Rue de la Peupleraie
35760 St GREGOIRE
Tel: 02 99 23 42 01
Fax: 02 99 68 73 36

■ Le MobileMapper transfère ses corrections DGPS par Bluetooth

Thales présente le MobileMapper™ Beacon, un module de radio-balise portable entièrement intégré.

Le MobileMapper Beacon propose des corrections différentielles fiables, en temps réel, pour les récepteurs GPS portables MobileMapper de Thales dédiés à la collecte de données SIG.

Le MobileMapper Beacon permet d'accéder aux corrections des signaux radio de type RTCM SC-104 et les envoie vers le récepteur MobileMapper CE par connexion sans fil Bluetooth. Le résultat est probant : une précision de positionnement nettement améliorée, à moins d'un mètre, sans post-traitement. Les techniques avancées de traitement du signal assurent une démodulation fiable des données DGPS émises par les radio-balises, y compris en environnement difficile. Le MobileMapper Beacon apporte la même

qualité de corrections différentielles aux récepteurs standard MobileMapper par le biais d'un câble série.

Le MobileMapper Beacon est compact et se porte facilement à la ceinture. Alimenté par 4 piles AA, il est très léger (seulement 575 gr, piles comprises) et extrêmement robuste, pour un transport sans effort et en toute sécurité.

Le MobileMapper Beacon est facile à configurer sur le MobileMapper CE. Son interface simplifiée permet de régler automatiquement ou manuellement le récepteur et de contrôler les tests de fonctionnement et de performance.

► Pour obtenir de plus amples informations sur le MobileMapper Beacon, consultez le site www.thalesnavigation.com.



Pour soumettre un article...

Vous souhaitez proposer un article pour la revue XYZ.

Pour faciliter votre démarche, nous vous adressons quelques recommandations :

- Indiquez clairement votre nom et vos coordonnées (téléphone, fax, adresse postale et électronique)
- L'ensemble des textes doit être transmis sous format informatique (WORD ou équivalent) sur disquette ou CDROM avec une copie papier (4 à 6 pages) de 5 000 caractères par page environ
- Les images et illustrations (1 ou 2 par page) doivent être séparées du texte (photos originales, fichiers numériques type JPEG) et devront être clairement identifiées et explicitées avec leurs liens au texte (n° figure, légendes, échelles, titres);
- Un résumé de l'article en français et anglais sera rédigé (10 lignes)
- Une liste de mots clés sera donnée en français et anglais
- Toutes les références externes devront être mentionnées.
- Vous pouvez déposer vos articles sur le serveur suivant : ftp://photogeo.insa-strasbourg.fr/aft_depot
- N'envoyez pas directement votre proposition par mail

Le comité de rédaction étudiera votre proposition d'article et vous contactera rapidement.

Nous tenons à vous informer que l'AFT ne pourra en aucun cas être engagé dans les opinions et théories que vous émettrez dans vos articles. Les articles parus dans XYZ ne pourront être republiés dans d'autres revues qu'avec un accord préalable du comité de rédaction.

André BAILLY
Directeur des publications

Emmanuel NATCHITZ
Directeur adjoint des publications, rédacteur en chef

■ Isidoro Sanchez SA distribue les solutions GPS de Thales en Espagne pour les applications SIG et la topographie

Thales annonce que Isidoro Sanchez SA (ISSA), l'un des distributeurs leader de matériel de topographie en Espagne, vient de conclure un accord de distribution concernant les produits SIG et les systèmes GPS pour la topographie de Thales Navigation.

Isidoro Sanchez, une division du groupe Inland, bénéficie de plus de 100 ans d'expérience dans la commercialisation de matériel de topographie.

Parmi les produits SIG de Thales figure le MobileMapper, un des meilleurs carnets de terrain GPS/SIG portables. Quant aux systèmes topographiques de Thales, ils offrent avec le ProMark 2

le meilleur rapport qualité/prix du marché et avec le système modulaire Z-Max permet aux géomètres d'accroître la rentabilité de leur investissement GPS en facilitant leurs levés GPS.

► **Contact thales navigation:**
cgeffroy@thalesnavigation.com

■ La ville de Marseille sélectionne APIC pour le remplacement de son Système d'Information Géographique

A l'issue d'un appel d'offre et d'une étude de définition compétitive, la ville de Marseille choisit le groupement APIC/EADS pour assurer le remplacement de son Système d'Information Géographique existant (Carine).

Afin de répondre de façon optimale aux besoins de la deuxième ville de France, c'est la solution Hub Géomatique qui sera déployée.

Le Hub est précisément le regroupement dans un système unique des fonctions de réception des données géographiques, de contrôle qualité, d'insertion dans une base fédérale (Oracle) et de rediffusion vers les services techniques de la Ville et tous leurs partenaires.

En outre, le Hub est un centre d'information (sur l'intranet de la Ville) où tous les fournisseurs et utilisateurs de données géographiques peuvent se renseigner sur la disponibilité et la nature précise des cartes en stock, passer commande, ou encore déposer des compléments et des mises à jour.

L'acheminement sans heurts de l'information géographique depuis ses points de création (levés, études, projets) jusqu'à ses points de consommation (aide à la décision) est bien le défi d'une nouvelle génération de SIG.

VUES AERIENNES METRIQUES

POUR TOUTES APPLICATIONS



670, Rue Jean Perrin • Z.I.
13851 AIX EN PROVENCE CEDEX 03
Téléphone : 04 42 60 05 45
Télécopie : 04 42 24 26 04
e-mail : aerial@wanadoo.fr
web : www.aerial.fr

■ Optech

A l'occasion du salon Intergeo à Stuttgart, Optech, leader mondial du lever laser 3D, a annoncé l'addition de l'ILRIS-3_gD à sa gamme de lasers sur trépied.

L'ILRIS-3_gD capitalise sur les fonctionnalités de l'ILRIS-3D en accroissant son champ de vision à 360°x360°.

Une conception modulaire et une méthode unique de collecte des données assurent la meilleure précision dans sa catégorie, ainsi qu'une utilisation très versatile. Sa résolution passe à 0,00115°, permettant de lever 1 point tous les 2 mm à 100 mètres. Il intègre une



caméra couleur d'une résolution de 6 millions de pixels permettant de générer directement des nuages de points colorisés. La poignée de manutention externe permet également de fixer des accessoires tels qu'un GPS ou un appareil photo numérique à très haute résolution. Les propriétaires d'ILRIS-3D seront heureux d'apprendre qu'Optech a conçu ce nouveau modèle dans une parfaite continuité avec sa gamme antérieure, puisque les anciens modèles peuvent être mis à jour et se voir adapter l'orientation sur 360°x360°.

Avec un domaine d'intervention allant de 3 à 1 000 mètres et un laser de classe 1 en toutes circonstances garantissant une parfaite sécurité pour les personnes alentour, l'ILRIS-3_gD offre le champ de vision le plus large, la plus longue portée, la meilleure précision et la meilleure sécurité de sa catégorie. L'ILRIS-3_gD sera disponible à partir du 1^{er} janvier 2005.

► Pour tout renseignement,
mauryinfo@magic.fr

■ NAVTEQ enrichit ses cartes avec de nouvelles caractéristiques routières

Cinq attributs supplémentaires viennent étendre la fonctionnalité des solutions de navigation.

NAVTEQ (NVT à la Bourse de New York), un des principaux fournisseurs mondiaux de données cartographiques numériques pour les systèmes de navigation et les solutions de géolocalisation, a intégré cinq nouveaux attributs dans ses cartes NAVTEQ : précision géométrique accrue, limitation de vitesse, situation de vitesse particulière, panneaux de vitesse variables et nombre de voies.

Ces caractéristiques supplémentaires permettent d'accroître la fonctionnalité des systèmes de navigation pour les automobilistes en leur fournissant davantage d'informations pratiques en ce qui concerne le réseau routier. La propriété de géométrie accrue – qui offre une précision absolue et relative, supérieure en matière de voirie – peut être intégrée aux systèmes de navigation et à la télématique des véhicules. Elle participe à l'amélioration des performances des fonctions offertes par les régulateurs de vitesse intelligents et l'éclairage avant adaptatif des véhicules. Les attributs de limitation de vitesse

précisent, quant à eux, la vitesse réelle, les limitations spéciales (en fonction généralement de l'heure, de conditions ou d'activités particulières), le type de vitesse selon des facteurs spécifiques (zone scolaire, pluie, neige, période, etc...), les panneaux indicateurs variables (sur lesquels apparaissent des messages rappelant la limitation de vitesse à respecter et qui varient suivant l'état de la route et de la circulation), ainsi que l'unité de mesure (valeur numérique donnée au choix en km/h ou en mph). Plus littéralement, le nombre de voies relevées indique, à l'exception des voies de sortie, d'accélération et de décélération, le nombre de voies constituant des portions spéciales ou des "raccordements" de chaussées.

Les attributs de limitation de vitesse et de géométrie sont également utiles au développement des systèmes avancés d'aide à la conduite (ADAS, pour Advanced Driver Assistance Systems), qui permettent d'améliorer les performances des véhicules en établissant la communication aussi bien à l'intérieur du véhicule qu'entre celui-ci et la chaussée.

► Contact : navteq.com



Agenda des manifestations

■ 25 novembre 2004 de 14 h 00 à 18 h 00 - séminaire :

HISTOIRE, COMPLEXITÉ ET PENSÉE COMPLEXE : LE GENIE DES PYRAMIDES

Par Pierre CROZAT

INSTITUT HERACLITE

42, rue de Suresnes

92380 GARCHES

E-mail :

college.heraclite@numericable.fr

■ 6 décembre 2004

Colloque européen sur les Eurocodes "Les Eurocodes concrètement : les ponts routiers"

Salle PACI - Palais des Arts

et des Congrès d'Issy

25, Avenue Victor Cresson

92130 - Issy les Moulineaux

Tél. 01 46 45 60 90

■ 8-11 février 2005

Nouvelle édition de

la "semaine des conférences de la géomatique"

Ce congrès se tiendra au palais des congrès "FIRA" à Barcelone (Espagne) autour du thème central "capteurs de haute

résolution et leurs applications"

Pour plus d'information :

[http://www.setmana-](http://www.setmana-geomatiga.org/)

[geomatiga.org/](http://www.setmana-geomatiga.org/)

■ 5, 6 et 7 avril 2005 "24^e édition

du MICAD" dans le Hall 3.2 de

Paris Expo, Porte de Versailles.

Contact : crey@birp.fr

■ 31 mai au 2 juin 2005 : lumiville

Lyon - Eurexpo

(www.lumiville.com)

■ Le 23 au 23 mai 2005

la "Geoline 2005" - Lyon

Géologie et ouvrages linéaires

<http://geoline2005.brgm.fr>

■ 14 au 16 septembre 2005 :

ISGI 2005 : International Symposium on Generalization of Information Berlin, Allemagne

<http://www.horst-kremers.de/ISGI>

Email : office@horst-kremers.de

"Quelles données topographiques pour un SIG territorial?"

aux Journées de la Topographie 2004

■ Jacques LEDIG - Professeur ENSAM à l'INSA de Strasbourg - animateur de la tribune

Les deuxièmes journées de la topographie de l'INSA de Strasbourg ont aussi été l'occasion d'une tribune ayant pour thème: "Quelles données topographiques pour un SIG territorial?". Les différents intervenants ont exposé leurs points de vue avant d'engager un échange avec le public.

C'est ainsi que se sont exprimés Mme Sylvie Lamorlette, ingénieur au Conseil Général du Bas-Rhin (CG 67), Messieurs Patrick Bezard-Felgas, Géomètre Expert à Moissac (82), président de la commission de l'Information Géographique à l'OGÉ, Marc Bonnel, ingénieur topographe à la Communauté Urbaine de Lyon, Denis Delerba, responsable du service de topographie à la mairie de Nice, animateur du groupe de travail de topographie de l'Association des Ingénieurs Territoriaux de France (AITF) et Patrick Lohte, inspecteur du cadastre à Nancy.

Le sujet de cette tribune intéresse tous les professionnels et utilisateurs de l'information géographique... et certainement aussi tous ceux qui la financent, autrement dit tout le monde!

Les Systèmes d'Information Géographiques (SIG) sont maintenant entrés dans les mœurs d'un nombre croissant de collectivités (Communes, Départements, Régions...). Ceci est bien sûr lié aux progrès techniques (vulgarisation de l'informatique, simplification relative des moyens topographiques, comme la tachéométrie électronique, le GPS, l'emploi du laser sur terre et dans les airs...) mais aussi à l'évolution des mentalités et peut-être surtout aux dif-

férentes et récentes lois concernant l'organisation administrative de notre pays. Nous pensons ici bien sûr à la décentralisation initiée en 1982 (loi Deferre), qui se poursuit actuellement et qui a eu et a pour conséquence notamment l'attribution de compétences nouvelles aux différentes collectivités. Nous ne serions pas complets si nous n'évoquions pas les regroupements de communes favorisés par les lois Chevènement et Voynet en ces fameux Etablissements Publics de Coopération Intercommunale (EPCI) comme le sont les communautés de communes, d'agglomération ou encore urbaines.

Les compétences dévolues à ces établissements conjuguées à la démultiplication des moyens tant humains que financiers qu'ils ont par rapport aux communes qu'ils conglomèrent, confèrent à ces EPCI de réels atouts pour intégrer la vaste famille des promoteurs et utilisateurs de SIG.

Les données topographiques ou géodésiques (canevas) figurent a priori parmi les incontournables de tous les SIG. Mais quelles sont-elles? Sont-elles identiques quel que soit le territoire géré, sa surface, sa complexité, sa valeur financière... ou doit-on les différencier suivant ces critères ou d'autres? Comme chaque professionnel le sait, l'évolution de la topographie et de la géodésie est allée de pair avec celle de l'informatique et de l'électronique.

Aujourd'hui, contrairement à hier, pratiquement tout est possible dans le domaine de la topographie. L'événement du GPS qui demain fonctionnera en réseau de stations permanentes sur l'ensemble du territoire, rendra l'entretien de milliers de points de canevas, tout du moins planimétriques,

inutile. Les méthodes "modernes" de saisie de données topographiques que ce soit par voie terrestre, aérienne ou, pourquoi pas par méthodes spatiales, sont autant de prises directes quasi en temps réel de toute sorte d'information géographique. Elles permettent donc de satisfaire extrêmement rapidement n'importe quel besoin en cartographie relatif à n'importe quel aménagement. Jamais nous n'avons eu autant de possibilités, autant de facilités, autant de choix dans ce domaine. C'est précisé pour cela, mais aussi pour les corollaires immuables de mise à jour et donc de fiabilité et de coût que nous devons nous interroger sur l'opportunité de stockage et d'entretien de telle ou telle donnée dans un SIG. Peut-on, doit-on sérier les données topographiques dans un SIG? Dans l'affirmative, pourquoi, comment et suivant quels critères? Dans le cas contraire, suivant quels arguments? En tous les cas, nous pouvons et devons nous interroger à propos de quelle donnée topographique pour un SIG territorial.

Ces données intégrables dans un SIG sont bien entendu fonction de ses objectifs, eux-mêmes souvent liés aux dimensions du territoire géré. Tous les intervenants semblaient en accord avec cela. Madame Lamorlette, après avoir défini les missions du CG 67 nécessitant l'outil SIG dans son domaine d'activité (assistance des communes en urbanisme) a d'ailleurs conclu son exposé par: "Le CG 67 utilise de nombreuses données topographiques en phase "projet" (création de routes, protection de zones, projets d'aménagement...), mais ne les intègre pas sous cette forme dans son système d'information". Seules des données à petite échelle sont réellement intégrées et maintenues dans leur SIG.

■ ■ ■ Monsieur Bonnel a quant à lui exprimé son regret d'absence de politique concernant le levé à grande échelle (1/200) sur la Courly. Aucun plan topographique n'est intégré en tant que tel dans le SIG. Ceux-ci ne sont effectués que dans le but de travaux plus ou moins immédiats sur la voie publique. *"Quelle données pour un SIG territorial ? – Toutes, pour peu que celles-ci soient bonnes !* a affirmé d'entrée de jeu Monsieur Bezdard en bon promoteur de la profession de Géomètre Expert ! Il a enfoncé le clou en comparant la donnée topographique au vin et le SIG à sa cave. *"Quand le vin est bon, je le stocke, quand il est mauvais, il ne m'intéresse pas"* a-t-il encore assuré en substance. La comparaison est certes plaisante – et on ne peut être à première vue que d'accord – mais est-elle vraiment pertinente ? Qu'est-ce qu'une "bonne" donnée topo ? Suivant quels critères peut-on affirmer qu'elle a sa place ou non dans un SIG ? Monsieur Bezdard a ensuite très subtilement parlé du coût des données. Il a, dans une rhétorique bien huilée, démontré qu'une donnée avait un coût, bien entendu, mais que cela ne signifiait pas qu'elle était chère. La définition de partenariats est pour lui une des clés de la réussite des SIG. On le comprend parfaitement !

Monsieur Lhote nous a parlé de la dématérialisation du plan cadastral. S'il

n'était qu'un partenaire indispensable à tout SIG, ce serait bien le cadastre ! Son plan, bien qu'il soit souvent soumis à des critiques plus ou moins fondées, présente tout de même l'avantage de recouvrir tout le territoire, de manière continue et à une échelle tout à fait convenable pour un SIG. Bien sûr, il manque le détail topographique, les altitudes, mais quel localisant pour qui sait l'utiliser avec un peu d'ingéniosité !

Selon Monsieur Delerba, deux théories s'opposent. L'une sépare le SIG (cadastre, orthophotoplan ...) avec son logiciel adapté et la topographie (plan au 1/200^e) avec son logiciel de DAO. L'autre préconise un SIG qui comprend à la fois la géomatique et la topographie. Avec sa verve et son humour, désormais bien connus et appréciés à l'INSA, cet ingénieur propose un "mode d'emploi" pour la réalisation d'un SIG. Il évoque également le travail mené de pair par l'AITF et l'OGE. Celui-ci devrait déboucher sur une norme en matière de plans topographiques.

Finalement, Monsieur Delerba conclut son intervention en insistant sur l'importance que revêt la connaissance et le potentiel de chaque donnée qu'il faudra ensuite exploiter en conséquence. *"Il faut réussir l'adéquation entre besoin, ressource, budget et perspective !*

Ce débat, suivi par de nombreux étudiants, mais aussi par des profession-

nels de la topographie et des SIG, a permis de voir l'importance que revêt le choix des données dans un SIG. *"La bonne donnée à la bonne place"*, telle pourrait être sa conclusion. Le plan topographique 1/200^e "pur et dur" est en fait un leurre dans un SIG. Cela relève, dans ce domaine particulier, d'un fantasme de perfection dont l'utilité reste à démontrer. N'oublions pas que le mieux est l'ennemi du bien ! La complexité de son détail, le nombre d'intervenants gestionnaires des objets qui le composent sur le domaine public qu'il est censé décrire, posent le problème quasi insoluble de sa mise à jour.

Or chacun sait que seules les données à jour ou tout du moins dont on maîtrise le rafraîchissement devraient avoir droit de cité dans un SIG. C'est effectivement, en ce sens, un peu comme le bon vin dans une bonne cave ! Ceci n'est de loin pas le cas pour un plan au 1/200^e et les professionnels le savent bien. C'est certainement pour cela, pour mieux maîtriser cette mise à jour, pour que la donnée topographique qui "a un coût" mais qui ne doit "pas être chère" trouve la place qu'elle mérite dans un SIG, qu'il est question de plan topographique "allégé", une ossature topographique garnie d'un détail concerté et maîtrisé en quelque sorte. Gageons que l'avenir s'inscrit dans cette perspective où partenariat est le maître mot !

Les journées de la topographie : un rendez-vous incontournable

commentés par les étudiants de 2^e année de formation
ingénieur topographe

*Pour sa seconde édition,
les journées de la Topographie
organisées par l'INSA
de Strasbourg du 22 au
24 septembre 2004
ont connu un réel succès !*

Une centaine de professionnels, une quinzaine d'entreprises et plus d'une centaine d'étudiants topographes se sont rencontrés et ont pu échanger leurs idées durant ces trois jours. Le programme de ces journées fut chargé. Les matinées étaient réservées aux soutenances des projets de fin d'études réalisées par les étudiants.

Un débat entre spécialistes du cadastre, géomètres experts et ingénieurs territoriaux fut organisé le mercredi après-midi. Il fut suivi d'une présentation de l'OGE aux premières années par le président de l'ordre M. Alain Gaudet, qui, rappelons le, est ingénieur ENSAIS. Le salon et le podium des entreprises se sont déroulés le jeudi

après-midi. Le salon a réuni les entreprises ATM3D, AZIMUT, FAYNOT, GEOMEDIA, GEOMOD, GEOTOPO, INPHO, JS INFO, Le Pont Equipement, LEICA, MAURY Informatique, MENSURA, STAR-APIC, TECHNO GIS et TOPCON, qui ont présenté leurs activités ou produits devant une assemblée de professionnels et d'étudiants attentifs.

L'objectif de ces journées est de promouvoir largement les métiers liés à la topographie. Elles se veulent aussi être l'écho des activités d'enseignement et de recherche relatives à cette discipline et ce, plus particulièrement à l'INSA de Strasbourg. L'objectif est atteint, puisque les Journées de la Topographie 2004 ont fait l'objet d'un article dans les Dernières Nouvelles d'Alsace du 24 septembre 2004 et dans les affiches d'Alsace et de Lorraine du 1^{er} octobre 1004.

Les nombreux professionnels présents ont permis aux étudiants de découvrir les différents débouchés de la profession. Cette démarche prend une envergure de plus en plus importante. En effet, plusieurs étudiants fraîchement diplômés ont obtenu une proposition d'emploi lors de ces rencontres professionnelles.

Lors de la cérémonie de clôture le vendredi après-midi, en présence des membres du Conseil Supérieur de l'Ordre des Géomètres Experts, les diplômes d'ingénieurs ont été remis aux désormais anciens étudiants ravis d'avoir participé à ce carrefour profes-



Fig. 1 : Moments d'échanges lors du salon des exposants.



Fig. 3 : Caricature d'une soutenance de PFE réalisée par un étudiant de seconde année ingénieur.



Fig. 2 : Photo de groupe de la promotion 2004, après remise des diplômes et d'un petit souvenir...

sionnel.

Dans la perspective de continuer à promouvoir ces journées dans les années futures, l'INSA Strasbourg remercie tous les participants et intervenants de ce forum devenu désormais incontournable. ●

Pour toute information supplémentaire ou pour participer aux prochaines journées 2005, contacter la filière Topographie de l'INSA de Strasbourg
24 bd de la Victoire
67084 Strasbourg Cedex.

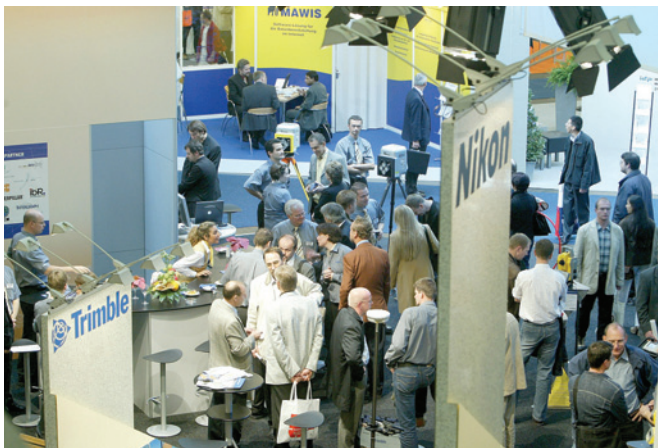
Intergeo®, salon international de la géodésie, de la géomatique et de la gestion du territoire

■ Olivier REIS

L'édition 2004 d'Intergeo® s'est tenue du 13 au 15 octobre et avait pour cadre le parc des expositions de Stuttgart, implanté sur une colline dominant la capitale du Land de Bade-Wurtemberg, haut lieu de l'industrie automobile allemande.

Fidèle à son habitude, la manifestation s'est scindée en deux volets, le congrès et l'exposition. Cette année, le congrès, conjointement organisé par l'association allemande de topographie (DVW) et l'association allemande de cartographie (DGfK) a rassemblé plus de 1700 participants qui ont pu assister à plus de soixante conférences regroupées par blocs thématiques (une vingtaine en tout, allant de GPS et Galileo à la géolocalisation en passant par les infrastructures de géodonnées ou la gestion du territoire dans le sud-est de l'Europe) au sein desquels une même question était abordée sous les angles les plus divers. L'édition 2004 a été marquée par une nouveauté, l'organisation de la première journée de l'Union européenne intitulée "Geoinformation – The European Business Dimension", dont l'allocution d'ouverture a été prononcée par M. Horst Foster, en charge du marché de l'information (dont la géomatique fait partie) au sein de la Commission européenne. L'ambition des initiateurs de cette journée est de faire prendre conscience à l'ensemble des acteurs de ce marché du fort potentiel qu'il recèle et de tenter de jeter les bases d'un marché européen unifié.

L'exposition, dont la surface est restée quasiment inchangée par



Intergeo® 2004 c'est...

- ...une exposition s'étendant sur une surface de plus de 21 000 m²
- ...répartie entre 470 exposants (dont 212 "sous-exposants" présents sur des stands de partenaires commerciaux)
- ...représentant 23 pays (Allemagne, Autriche, Belgique, Bulgarie, Canada, Chine, Espagne, Etats-Unis, France, Finlande, Hongrie, Italie, Japon, Pays-Bas, Pologne, République tchèque, Royaume-Uni, Russie, Serbie, Slovaquie, Slovénie, Suède, Suisse)
- ...et que plus de 16500 personnes ont visité du 13 au 15 octobre.

C'est aussi...

- ...un congrès rassemblant 1700 participants
- ...auxquels plus de 60 conférences consacrées à une douzaine de thèmes différents ont été proposées,
- ...dans le cadre notamment du premier jour de l'Union européenne "EU-Day"
- ...et de la 52^e journée des cartographes allemands.





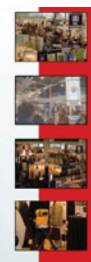
■ ■ ■ rapport à l'année passée (un peu plus de 21 000 m², soit le double de la surface occupée par l'exposition lors de l'édition de Dortmund en 1995) a attiré plus de 16 500 visiteurs durant ses trois jours d'ouverture (soit près de 2 000 de plus que l'an passé à Hambourg). Elle a regroupé 470 exposants en provenance de 23 pays. Si la plupart des visiteurs viennent traditionnellement d'Allemagne (plus de 80 %), l'internationalisation se poursuit et la présence des pays d'Europe de l'Est (Pologne, Hongrie, République tchèque, Slovaquie ou Slovénie) semble se faire plus insistante chaque année, au point que les organisateurs ont décidé de créer cette année un événement plus spécifique à ce marché au printemps (cf. encadré). D'autres visiteurs n'hésitent par ailleurs pas à parcourir de longues distances pour assister au congrès ou visiter l'exposition (comme les collègues chinois, indiens ou japonais que l'on a pu croiser au détour d'une allée).

Chez les exposants aussi, le poids du pays organisateur reste marqué mais là également, l'internationalisation se poursuit. Les acteurs principaux du marché de la topographie sont présents, généralement au travers de leur filiale allemande, mais Intergeo® leur fournit également l'occasion de rassembler des représentants et des distributeurs en provenance de l'Europe entière voire d'au-delà. Et bien souvent, la direction générale de l'entreprise fait le déplacement. Autrement dit, Intergeo® est une manifestation qui dépasse de loin son cadre national originel et constitue désormais le point de rencontre automnal traditionnel des topographes du monde entier, visiteurs ou exposants, pour lesquels ce salon est l'occasion de présenter de nouveaux produits, d'officialiser un partenariat ou une



Nouveau : Intergeo® - East

L'année 2004 a été marquée par la naissance d'une nouvelle manifestation dont la première édition s'est tenue au mois de mars à Belgrade: Intergeo® East, déclinaison du salon Intergeo® pour le sud-est de l'Europe.



Deux raisons principales ont été avancées pour justifier l'organisation d'un tel événement : l'ouverture croissante et l'expansion des marchés des pays de cette zone (sommairement délimitée par la Slovénie à l'ouest, la Turquie à l'est, la Hongrie, la Slovaquie et la Roumanie au nord, bordée par la mer Méditerranée au sud), et leur éloignement géographique, empêchant bon nombre de professionnels de la région de se rendre à Intergeo® en Allemagne pour des raisons essentiellement financières.

Devant le succès de la première édition ayant rassemblé plus de 80 exposants à Belgrade (dont près de 30 entreprises allemandes, 25 entreprises serbes et 2 entreprises américaines) et ayant attiré plus de 4 000 visiteurs, il a d'ores et déjà été décidé de renouveler l'expérience en 2005, du 7 au 9 mars à Zagreb, en Croatie. La plupart des exposants de cette année ont d'ailleurs assuré les organisateurs de leur présence à cette deuxième édition.

acquisition. Intergeo® est ainsi devenue l'une des vitrines principales de la profession.

Ce faisant, elle traduit également son évolution, désormais placée sous le signe de la mobilité, thème central de l'édition 2004 d'Intergeo®. Les applications nomades combinant un moyen de localisation ou de navigation (un récepteur GPS) aux possibilités et à la puissance des SIG poursuivent leur développement et intéressent des cercles toujours plus larges d'utilisateurs désireux de gérer leurs informations à référence spatiale de façon plus rentable et efficace. La robustesse et la convivialité des ordinateurs de terrain font ainsi l'objet de progrès constants. D'autres pistes sont également explorées, parmi lesquelles les possibilités d'une interconnexion plus poussée, au travers du réseau Internet notamment. En toile de fond enfin, n'oublions pas l'espoir que peut susciter un projet tel que Galileo dont les retombées devraient profiter à l'ensemble de la profession, tous secteurs confondus.

Le marché de la topographie semble actuellement traverser une phase de consolidation, grâce notamment au vaste éventail de ses débouchés (le GPS et la géomatique sont présents dans un nombre croissant de secteurs), ce qui laisse entrevoir un réel potentiel de développement.

Il ne nous appartient pas d'assurer la promotion de cette manifestation, ce n'est pas notre rôle, mais force est de constater que le salon Intergeo® constitue désormais un rendez-vous incontournable pour l'ensemble des acteurs du secteur topographique. Alors notez dès à présent que la prochaine édition se tiendra du 4 au 6 octobre 2005 à Dusseldorf, rendez-vous étant d'ores et déjà pris pour Munich en 2006. ●

Le IX^e Congrès International des Égyptologues à Grenoble

■ Élise MEYER

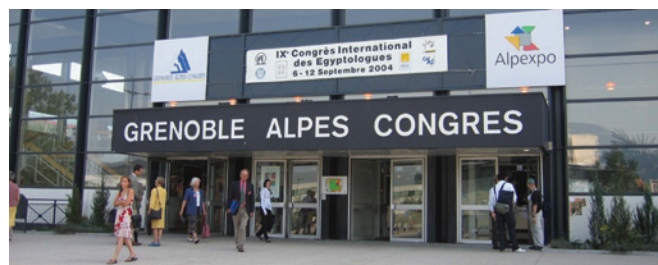
La ville de Grenoble a accueilli du 6 au 12 septembre 2004, pour la deuxième fois après 25 ans, le Congrès International des Égyptologues (qui a lieu à peu près tous les quatre ans depuis 1976).

La région dauphinoise est un peu le berceau de l'Égyptologie moderne, puisque c'est là que Jean-François Champollion s'est formé intellectuellement et qu'il y découvre sa passion pour l'Égyptologie (originaire de Figeac, dans le Lot, il s'installe à Grenoble dès 1801). Il résidait souvent dans la maison de son frère, Jacques-Joseph Champollion-Figeac, à Vif (petite ville dans les environs de Grenoble). Il y étudia la pierre de Rosette qui lui permit de découvrir le secret de l'écriture hiéroglyphique (il en avait obtenu une copie pendant la Campagne Égyptienne de Napoléon). Grâce à lui et à un certain nombre de savants français (notamment des grenoblois), *"l'Égyptologie a été relancée à un moment où les hiéroglyphes se taisent et où les pyramides étaient les vestiges d'un monde englouti"* (d'après M. Michel Destot, Député-Maire de Grenoble).

On en est loin de nos jours : l'Égyptologie est devenue une science et une invitation aux rêves. La culture pharaonique faisant partie du patrimoine universel, elle se doit être accessible à tous, et c'est ainsi que ce Congrès a accueilli autant des professionnels, enseignants et étudiants, que des amateurs "égypto-maniaques", membres de sociétés d'égyptologie ou d'associations. C'est d'ailleurs grâce à la collaboration entre l'Association pour la Conservation, la Promotion de la Propriété et des Archives des Frères Champollion et le Conseil Général de l'Isère, que ce IX^e Congrès International a pu être organisé à Grenoble.

Cette association a pour but de promouvoir et de faire connaître la maison des frères Champollion à Vif, qui a été rachetée à leurs ancêtres (dont cinq générations s'y sont succédées) en 2001 par le Conseil Départemental de l'Isère : tout a été conservé en l'état et elle est désormais destinée à devenir un musée pour la gloire posthume des Champollion, un lieu de mémoire pour tous. En effet, la Maison Champollion a été vendue avec la correspondance de l'égyptologue, sa bibliothèque, ses archives personnelles et l'empreinte de la pierre de Rosette. Cette maison est ouverte au public depuis le 5 septembre 2004 (tout a été mis en œuvre pour que les congressistes puissent la visiter) et elle le sera jusqu'au 5 mai 2005.

Ensuite, la bâtisse sera fermée pendant deux ans pour faire l'objet de travaux de mise aux normes et de rénovation. Comme tous les musées appartenant au département de l'Isère, l'accès à la Maison Champollion est gratuit. C'est un



patrimoine véritablement très intéressant à découvrir et on y apprend également beaucoup de détails sur le grand frère et protecteur de Jean-François Champollion, qui a joué un grand rôle dans l'histoire culturelle de la France du XIX^e siècle (intellectuel de renom, archéologue, journaliste, bibliothécaire, professeur d'université...). Plus de renseignements sur le www.maison-champollion.fr.

Ainsi donc, ce congrès international d'Égyptologie n'a pas été organisé par l'Association Internationale des Égyptologues (IAE). D'après Monsieur Jean Leclant, secrétaire perpétuel de l'Académie des Inscriptions et Belles-Lettres de Paris et co-président de ce Congrès, la discipline a besoin de se renouveler, de se développer et *"l'animation de l'IAE demande des efforts constants pour éviter l'engourdissement"*. La question du sens et de la nécessité d'une telle organisation internationale a été posée, sachant qu'il y a un manque d'organisations nationales qui, tout en étant chapeautées par l'IAE, pourraient organiser des congrès plus restreints et plus réguliers. Le domaine couvert par l'IAE est en effet très vaste (peut-être trop), englobant aussi bien l'histoire des différentes périodes, les religions, la céramologie, que l'évolution de la discipline actuellement (pratique de la topographie notamment). *"L'Égyptologie étant un domaine continuellement menacé par la remise en question des crédits (enseignements, expéditions...), une vigoureuse organisation internationale est à recréer"*. Il faut donc des moyens d'actions aux égyptologues, pour que la communauté égyptologique reste unie et qu'elle se donne les moyens de poursuivre l'entreprise gigantesque qu'est la découverte de cette civilisation lointaine mais proche en mémoire, au 1^{er} rang des grandes civilisations de l'humanité. Malgré tout, la présence de Monsieur Zahi Hawass, secrétaire général du Conseil Suprême des Antiquités d'Égypte (SCA) et président de ce Congrès, témoigne des liens et intérêts portés aux missions françaises en Égypte. Lui aussi a souligné le fait que les temps changent et qu'il est nécessaire de redéfinir les buts de l'IAE, en cherchant à développer des stratégies pour étendre et redéfinir la pratique de l'archéologie aujourd'hui. Il a également fortement insisté sur le fait qu'il faut absolument protéger le patrimoine égyptien, en menant des expéditions de restauration et d'étude basées sur des méthodes non destructives. Il ne se fera plus aucune fouille sans surveillance directe et étroite par des Égyptiens missionnés par le SCA. Ceci fait partie de nouvelles

■ ■ ■ réglementations qu'il tenait à signaler, pour que la préservation du passé soit un but commun à toutes les personnes qui travaillent en Égypte.

Ces phrases prononcées par le Dr Hawass dès la séance inaugurale du Congrès, laissaient présager la confrontation (via médias interposés) qui a effectivement eu lieu entre lui et Messieurs Dormion et Verd'hurt (architectes, archéologues), qui affirment avoir identifié un ensemble de circulation inconnu fermé par deux dispositifs de herse dans la Grande Pyramide de Kheops. Ils pensent que la véritable chambre du roi Kheops se trouve au cœur de ce nouvel ensemble de circulation, non découvert jusqu'à présent. En effet, d'après eux, la Chambre de Roi (que l'on connaît) n'était pas utilisable (poutres fissurées) au moment où le pharaon est mort et sa momie n'y a d'ailleurs pas été retrouvée. Ceci les a incité à chercher une autre chambre funéraire ailleurs dans la pyramide. Le problème de cette hypothèse (présentée dans le ton plus comme une découverte...) réside dans le fait que, pour la vérifier, il faudrait pouvoir accéder à ces "nouveaux couloirs", ce qui impliquerait de démonter (voire de casser) des éléments dans la pyramide. C'est là le point de départ de toute la polémique entre Z. Hawass, G. Dormion et J-Y. Verd'hurt, puisque le SCA ne veut plus laisser faire de fouilles destructives (même s'il ne s'agit que de quelques petits trous seulement). En effet, M. Hawass tient à adopter une attitude très claire et sans exception, car il reçoit tous les jours des études de personnes affirmant avoir découvert telle ou telle structure nouvelle dans la Grande Pyramide (ou ailleurs). S'il laisse une équipe fouiller librement, comment pourrait-il en restreindre une autre ? D'après M. Jean Yoyotte, membre honoraire du Collège de France, *"M. Hawass a des raisons sérieuses de se méfier d'une théorie tellement aléatoire qu'on ne peut tout de même pas se mettre à démonter la pyramide pour la vérifier."* Et, malgré le crédit donné à cette hypothèse par M. Nicolas Grimal (détenteur de la chaire d'Égyptologie au Collège de France), qui a préfacé le livre des deux architectes (*"La Chambre de Chéops"* chez Fayard), M. Hawass est resté sur ses positions, d'autant que tout le battage médiatique autour de "cette affaire" n'a pas été pour lui plaire.

Ainsi, l'exploration plus avant de ce nouveau réseau de circulation dans la Grande Pyramide devra (en tout cas pour l'instant) se faire uniquement et autant que faire se peut, à l'aide de méthodes non destructives : microgravimétrie, géoradar, photogrammétrie, etc. Les nouvelles technologies vont donc être de plus en plus utilisées en Égyptologie pour réussir à explorer le plus de structures possibles, sans rien détruire. Gageons que de plus en plus de méthodes topographiques pointues comme la photogrammétrie, la télédétection ou le relevé laser vont être à l'honneur dans tous les secteurs de l'archéologie (à grande et à petite échelle).

Avec plus de 400 résumés soumis et un millier de participants, cette réunion de spécialistes et d'amateurs s'est déroulée suivant un programme intense pendant sept jours (six sessions de conférences en même temps tous les matins et après-midi). Des séances plénières ont aussi eu lieu chaque jour, pour présenter les activités globales des missions des différents pays



travaillant en Égypte. L'utilisation de nouvelles techniques (ou plutôt de l'informatique en général) a fait l'objet d'une section de ce congrès, même si ce n'en était qu'une parmi quatorze... On peut dire que l'outil informatique n'est pas très répandu pour les travaux de terrain, excepté pour des études par télédétection ou pour des "relevés géophysiques" à l'aide de gradiomètres (images magnétiques). Pour les travaux de bureau par contre, l'informatique est de plus en plus utilisée grâce notamment à des programmes d'écriture hiéroglyphique de plus en plus performants, et à l'utilisation de la photographie numérique pour l'archivage des découvertes. Par ailleurs, un secteur qui se développe et s'avère nécessaire, est la création de bases de données, couplées à des systèmes d'information, pour la gestion des bibliothèques et musées (www.culnat.org pour la Bibliotheca Alexandrina). D'autres projets sont aussi en cours pour rendre certaines collections de musées accessibles sur Internet, avec description des pièces, explications, traductions hiéroglyphiques... (www.GlobalEgyptianMuseum.com).

Des recherches ont aussi été présentées dans le cadre de la simplification des travaux de bureaux et de la réduction du temps de relevé passé sur le terrain (souvent dans des conditions difficiles). Il s'agit d'un projet du GRCAO (Université de Montréal), qui travaille en collaboration avec le MAP-PAGE (INSA Strasbourg), pour le relevé épigraphique et architectural des temples. Ce projet montre un bon exemple de l'utilisation de la photogrammétrie en archéologie, car il s'agit de relevés basés presque uniquement sur des photographies du monument (murs, colonnes, pierres éparses). De plus, le traitement totalement informatique offre de nouvelles possibilités de publication des textes hiéroglyphiques, d'étude pour la reconstitution de parties démantelées, etc. Pour finir, une société basée à Bordeaux réalise des projets de modélisation 3D en archéologie (<http://archeo vision.cnrs.fr>). Elle crée des modèles interactifs (réalité virtuelle), en se basant sur des informations textuelles, iconographiques, ou autres, concernant le bâtiment qu'elle veut réaliser. Elle effectue aussi des acquisitions 3D par scanner laser de petits objets, ainsi que du prototypage rapide à l'aide de robots de précision.

En parallèle avec cette section intitulée "La discipline égyptologique en 2004" se tenaient des sections couvrant chacune des périodes de l'histoire égyptienne, les religions, les céramiques et l'art du feu, l'égyptomanie, etc. Riche et vaste programme pour un congrès qui a permis de dresser un bilan des dernières découvertes et de la pratique de l'Égyptologie dans le monde (avec notamment l'arrivée de nouveaux pays comme l'Amérique du Sud). ●

En parallèle avec cette section intitulée "La discipline égyptologique en 2004" se tenaient des sections couvrant chacune des périodes de l'histoire égyptienne, les religions, les céramiques et l'art du feu, l'égyptomanie, etc. Riche et vaste programme pour un congrès qui a permis de dresser un bilan des dernières découvertes et de la pratique de l'Égyptologie dans le monde (avec notamment l'arrivée de nouveaux pays comme l'Amérique du Sud). ●

Rendez-vous dans 4 ans au Caire ou en Grèce, pour les topographes amateurs d'égyptologie...

Contact

Élise MEYER

Laboratoire MAP-PAGE, INSA de Strasbourg
24 bd de la Victoire 67084 Strasbourg
meyer.elise@mail.insa-strasbourg.fr

Analyse orientée-objet pour la détection de bâtiments à partir d'une image satellitaire à très haute résolution spatiale

■ BOULAASSAL H., NEUSCH T.

L'utilisation de données à très haute résolution spatiale amène les utilisateurs à changer leurs habitudes en adoptant de nouvelles techniques de traitements. Le présent article évalue l'efficacité de l'analyse d'image orientée-objet pour la détection de bâtiments à partir d'une image à très haute résolution spatiale acquise sur la ville de Strasbourg et sa périphérie. A plus ou moins long terme, cette étude devra faciliter la détection de contours de bâtiments dans un couple d'images satellitaires en vue d'automatiser la chaîne de production de modèles tridimensionnels urbains, acquis actuellement par voie photogrammétrique. Les résultats obtenus dans cette étude sont très prometteurs. Si les contours n'ont pas pu être détectés de manière fiable à cette échelle, l'analyse orientée-objet permet tout du moins de détecter de façon semi-automatique l'existence ou non de bâtiments en zone urbaine de typologie diversifiée.

■ mots clés

analyse d'image orientée-objet, image à très haute résolution spatiale, segmentation multi-résolution, logique floue.

Données et outils

La zone d'étude est couverte par une image Quickbird ortho-rectifiée, acquise en mode panchromatique et multispectral à la date du 10 mai 2002 sur Strasbourg et sa périphérie. L'image couvre 10 km x 11 km de territoire et présente en mode panchromatique, une résolution spatiale de 61 cm et en mode multispectral, de 2,44 m. Les données ont été re-échantillonnées respectivement à 0,60 et 2,40 m.

Le logiciel d'analyse d'image eCognition, développé par la firme allemande Definiens Imaging constitue à l'heure actuelle l'un des seuls outils d'analyse orientée-objet disponibles sur le marché. Il a constitué le support essentiel pour cette étude. D'autres outils de traitements d'images et de dessin assisté par ordinateur se sont avérés nécessaires dans les opérations de pré-traitements et d'évaluation.

Méthodologie de l'extraction de bâtiments

Les classifications selon une approche orientée-objet se sont développées en parallèle au lancement des satellites à très haute résolution spatiale, vers la fin des années 1990. La méthodologie adoptée se déroule en général en trois étapes :

L'étape de segmentation : elle tient compte des paramètres spectraux et spatiaux pour subdiviser l'image en régions homogènes. Ces régions sont alors considérées comme "objets" indépendants les uns des autres.

L'étape de caractérisation des régions : elle consiste à identifier des règles de reconnaissance des régions par la recherche de leurs propriétés spectrales, topologiques et contextuelles.

Introduction et contexte du projet

L'identification des bâtiments en milieu urbain et périurbain, constitue un enjeu pour les villes, notamment pour le suivi de la croissance urbaine et des développements du marché de la construction dans les grandes agglomérations. La réponse à la pression de l'urbanisation préconise une base de données pertinente et à jour. Depuis plusieurs années, la mise à jour des plans à l'échelle urbaine est réalisée par le biais de techniques photogrammétriques, manuelles ou semi-automatiques. Avec l'avènement des images à très haute résolution spatiale, les techniques de traitements d'images visant à réaliser des spatiocartes fiables par leur géométrie et leur contenu thématique ont nécessité une remise en question complète. Une nouvelle approche d'analyse

d'image qualifiée d'"orientée-objet" a ainsi vu le jour et laisse espérer que la mise à jour des plans sera accessible par voie de télédétection spatiale dans un futur proche.

L'étude a été menée au sein de l'équipe PAGE de l'INSA de Strasbourg, spécialisée depuis plusieurs années dans la modélisation tridimensionnelle de bâtiments par technique photogrammétrique. A plus ou moins long terme, cette étude devra faciliter la détection de contours de bâtiments dans un couple d'images satellitaires et ainsi automatiser l'étape initiale dans la chaîne de production de modèles tridimensionnels urbains qui est réalisée pour l'instant par stéréo-restitution sur un couple de clichés. Cet article présente quelques résultats caractéristiques et les limites à l'emploi d'images à très haute résolution spatiale dans une optique de détection de contours de bâtiments urbains.

■ ■ ■ **L'étape de classification :** elle utilise les règles de reconnaissance des régions pour leur attribuer un degré d'appartenance à une classe et ensuite récupérer les classes thématiques souhaitées.

■ Segmentation ou création d'objets d'image

Contrairement aux classifications conventionnelles, les classifications suivant une approche orientée-objet emploient pour unité de base non plus le pixel, mais l'"objet". Un "objet" ou une "région" représente dans ce contexte un ensemble particulier (agrégation) de pixels adjacents et homogènes, le critère d'homogénéité étant préalablement défini selon une propriété possédant une mesure de similarité (Bonn et Rochon, 1992).

L'outil d'analyse d'image utilisé effectue une segmentation multirésolution (et multi-échelle), considérée comme une technique de fusion de régions. Le principe de croissance de région qui consiste en une procédure de fusion itérative agréant progressivement des pixels ou des régions. Cette fusion est réalisée de manière à minimiser l'hétérogénéité de l'objet résultant (Baatz & Schäpe, 2000).

Le critère d'hétérogénéité prend en compte la couleur et la forme de l'objet dans des proportions définies par l'opérateur. Ainsi, en choisissant différentes valeurs pour le "seuil", on obtient un réseau hiérarchique d'objets qui représente les informations de l'image à différentes résolutions. Chaque échelle de segmentation constitue un niveau

	Bandes spectrales introduites	Paramètre "ECHELLE"	Paramètre "COULEUR"	Paramètre "COMPACTITE"
Niveau 1	Panchromatique filtrée	15	0.6	0.3
Niveau 2	Proche infrarouge et panchromatique	30	0.8	0.5
Niveau 3	Proche infrarouge	50	0.8	0.5
Niveau 4	Proche infrarouge	100	0.8	0.5

Tableau 1 : Paramètres de segmentation employés dans chaque niveau

d'abstraction de l'image. Ce réseau hiérarchique est défini topologiquement, c'est-à-dire d'une part le contour d'un objet supérieur coïncide avec les contours de ses sous-objets et d'autre part chaque objet connaît son contexte, c'est à dire, ses voisins, ses sous-objets (objets du niveau inférieur) et ses super-objets (objets d'un niveau supérieur). La figure 1 illustre le réseau hiérarchique et ses niveaux.

La première tâche consiste à définir les paramètres optimaux – d'un point de vue échelle de segmentation et critères d'hétérogénéité – répondant favorablement à la problématique de détection de bâtiments (tableau 1). La figure 2 présente une portion d'image Quickbird ayant subi deux niveaux de segmentation.

■ Classification basée sur la logique floue

Dans la perspective conceptuelle, les objets disponibles peuvent être caractérisés et distingués par leurs propriétés intrinsèques (spectrales, de forme, de texture), topologiques (rapports géométriques entre objets) et/ou contextuelles (rapports sémantiques entre objets) (Benz, 2003). Ainsi, chaque

classe d'objet est décrite selon les connaissances de ses propriétés spectrales, topologiques et sémantiques. Les critères disponibles pour décrire chaque classes d'objet génèrent donc un espace de critères à n dimensions. D'autre part, la classification se base sur le principe de la logique floue. Dans la logique classique, les variables gérées sont booléennes, ce qui signifie qu'elles ne prennent que deux valeurs (soit 0, soit 1). La logique floue, quant à elle, a pour but de raisonner à partir de connaissances imparfaites qui opposent résistance à la logique classique (Hofmann, 2001). Une des caractéristiques du raisonnement humain est qu'il est basé sur des données imprécises, incomplètes ou incertaines. Pour cela, la logique floue se propose de remplacer les variables booléennes par des variables floues (valeurs possibles entre 0 et 1).

Ainsi, lorsque l'objet rencontré par le classificateur dispose par exemple d'une réponse spectrale moyenne située dans un intervalle prédéfini, il sera affecté d'un degré d'appartenance à la classe la plus probable situé entre 0 (non appartenance) et 1 (appartenance). Entre les deux valeurs, le degré d'appartenance est calculé selon une fonction non nécessairement linéaire.

Extraction des surfaces bâties

Il était à prévoir qu'une classification aboutissant à l'extraction directe des surfaces bâties serait délicate. Ceci nous a amené à envisager une classification préalable mettant en oeuvre une procédure éliminatoire, basée sur le masquage des classes d'objets non désirées. En effet, il est apparu judicieux de commencer à classer les classes d'objets les plus aisées à identifier, c'est-à-dire pouvant être discriminées par très peu de règles. Ainsi les classes telles que la "végétation" et l'"eau" ont pu être écartées par l'introduction d'un critère de discrimination basé sur l'in-

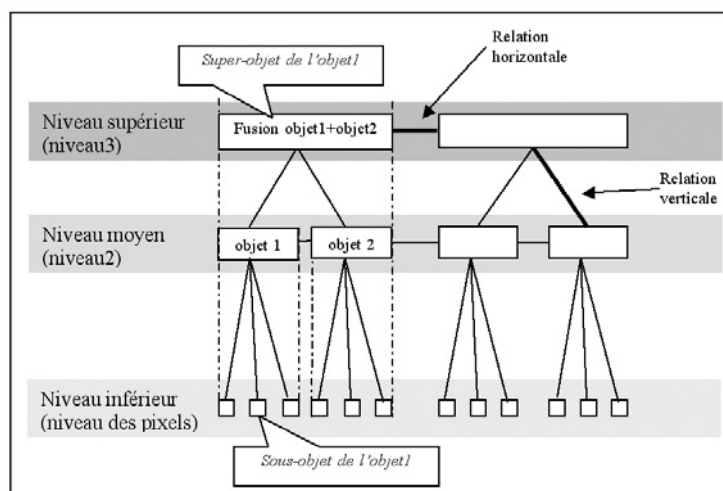


Figure 1 : Illustration du réseau hiérarchique des objets d'image (Hofmann, 2001, modifié).

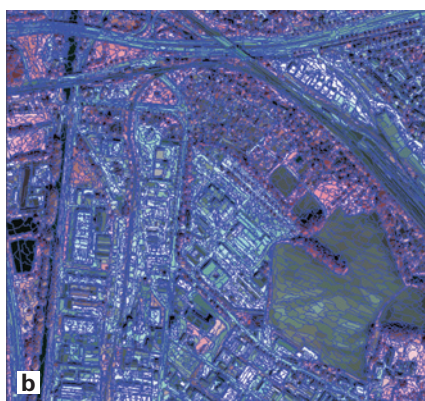
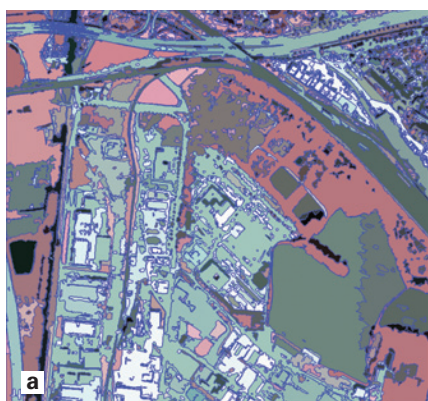


Figure 2 : Exemples de niveaux de segmentations a) Niveau 1 ; b) Niveau 4

dex de végétation (Boulaassal, 2004). La figure 3 présente cette classification préliminaire.

Les bâtiments recherchés appartiennent à la classe de surfaces bâties, par conséquent, une évaluation de cette classe s'avère utile. L'évaluation d'une classification basée sur la logique floue peut se faire par des paramètres statistiques issus de la différence entre deux degrés d'appartenance de l'objet à une classe. Ainsi, le plus grand degré et le second degré d'appartenance sont comparés (Benz et al., 2003), et présentés dans le tableau 2.

Ce tableau montre que les objets constituant la classe de surfaces bâties sont attribués à cette classe avec une moyenne de 0.963 ± 0.036 , soit un degré d'appartenance de 96 % selon les critères choisis, avec ± 3.6 % d'incertitude. Même si ce contrôle n'est pas rigoureusement indépendant des critères d'appartenance choisis, on peut considérer que la classe de surfaces bâties est définie de manière satisfaisante.

Détection des bâtiments

Une fois les surfaces bâties délimitées, nous pouvons nous concentrer sur les bâtiments qui s'y trouvent. La zone d'étude contient divers types de tissus urbains caractérisés notamment par différentes toitures. Des règles iden-

tiques ne conviennent donc pas à l'ensemble de la zone pour l'extraction automatique des toits de bâtiments.

C'est pourquoi une sectorisation a été effectuée selon la densité urbaine et la nature des toits. Ainsi chaque secteur urbain a été analysé séparément, le temps de définir les critères de discrimination adéquats. Le secteur de l'urbain peu dense a été choisi dans un secteur d'habitat collectif et l'urbain dense dans un secteur proche de l'hypercentre de Strasbourg. Deux exemples illustrant les résultats obtenus dans des tissus urbains différents sont présentés dans la figure 4.

• Evaluation Qualitative

L'évaluation qualitative des résultats obtenus est présentée dans le tableau 3. Ce tableau rassemble également les critères qui ont été déterminants dans la qualité de détection automatique de bâtiments pour les secteurs urbains principaux.

Par conséquent, la qualité de détection dépend de trois caractéristiques essentielles caractérisant les bâtiments, à savoir: la densité urbaine, la taille du bâtiment (en terme d'emprise au sol) et la réponse spectrale de son toit.

Il ressort également de cette évaluation qualitative que:

- L'augmentation de densité urbaine amoindrit la qualité de la détection.

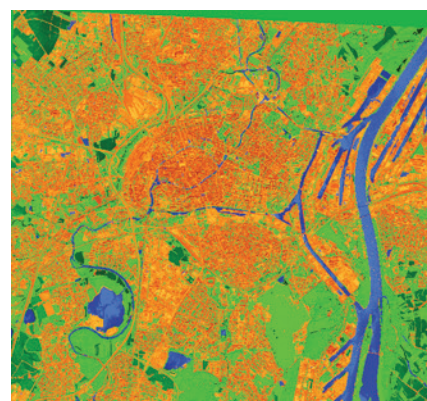


Figure 3 : Classes d'occupation du sol détectées dans la classification préliminaire

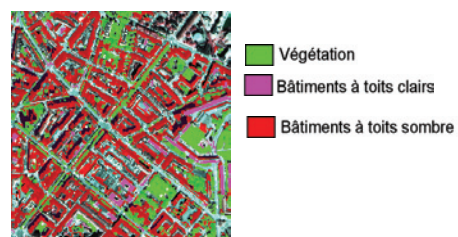
- Plus les bâtiments sont imposants, meilleure sera leur détection.
- Les couvertures claires sont détectables plus aisément que les toitures sombres.

Les deux premières remarques amènent à penser que la résolution spatiale est un critère d'influence déterminant dans la qualité de la détection de bâtiments.

La troisième remarque pourrait vraisemblablement être améliorée par l'emploi de capteurs à plus haute résolution spectrale. Mais cette supposition reste à vérifier étant donné qu'une plus



a) urbain peu dense (habitat collectif)



b) urbain dense

Figure 4 : Détection de bâtiments dans deux tissus urbains différents

Classe thématique	Nombre d'objets	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
Végétation	553122	0.995	0.051	0	1
Ombre	10702	0.933	0.214	0	1
Eau	80799	0.952	0.011	0.025	1
Parcelle cultivée	16093	0.971	0.028	0.003	1
Surfaces bâties	645966	0.963	0.036	0	1

Tableau 2 : Evaluation de la classification préliminaire

Secteur	Caractéristiques	Qualité de détection	Caractéristique dominante pour la détection
Urbain très dense (hypercentre)	Très dense – Toits sombres	Mauvaise	Densité urbaine
urbain dense	Dense – Toits sombres	Moyenne	
Urbain peu dense (habitat collectif)	Peu dense – Grande taille (immeubles) – Toits sombres	Bonne	Taille de bâtiments (en surfaces)
Urbain peu dense (habitat individuel)	Peu dense – Petite taille Toits sombres	Moyenne	
Zone industrielle	Toits sombres	Bonne	la réponse spectrale de la substance des toits
	Toits brillants		

Tableau 3 : Evaluation qualitative de la détection de bâtiments

	Bâtiments détectés	Bâtiments existants	% de détection
Secteur industriel	61	82	74
Secteur urbain très dense (hypercentre)	Blocs de bâtiments		92
Secteur urbain dense	99	112	88
Secteur urbain peu dense (habitat collectif)	42	50	84
Secteur peu dense (habitat individuel)	71	88	80
Secteur mixte	67	98	68

Tableau 4 : Evaluation quantitative de la détection de bâtiments

■ ■ ■ grande dimension spectrale et spatiale engendre de nouveaux problèmes de discrimination en raison d'un espace de critères (spectraux et spatiaux) élargi.

• Evaluation quantitative

De manière à quantifier la précision des résultats de détection de bâtiments, le nombre de bâtiments détectés par notre méthode a été comparé au nombre de bâtiments existants et ce, secteur par secteur. Un taux de détection a ainsi pu être établi (tableau 4). La moyenne générale de détection est de 81 %. Ce résultat est tout à fait satisfaisant, si l'on rappelle que cette détection se base uniquement sur des règles de reconnaissances (et nullement sur des zones échantillons à l'instar d'une classification supervisée).

Conclusion et perspectives

Les résultats obtenus à travers cette étude sont satisfaisants et soulignent l'influence des critères de taille, de densité et de couverture des bâtiments dans la qualité de leur détection.

Si la géométrie de contour du bâtiment reste peu fiable, la détection automatique de la présence ou de l'absence de bâti est rendue possible. Le pas réalisé

est d'importance. En effet, les règles d'appartenance créées dans cette étude pourront être réutilisées avec très peu d'adaptations sur des données équivalentes. Ainsi, sans aucune intervention supervisée, elles permettront de détecter l'existence de bâtiments urbains et d'alimenter les études tant appréciées de détection de changements par télédétection, en milieu urbain. Enfin, avec l'évolution permanente des technologies d'acquisitions (meilleures résolutions spatiales et spectrales des capteurs de télédétection), la méthodologie mise en place dans ce travail pourra être affinée pour espérer aboutir, à plus ou moins long terme, à la production automatique de contours de bâtiments. Sur la base d'un couple stéréoscopique d'images satellitaires, il sera alors envisageable de produire automatiquement des modèles tridimensionnels urbains avec une précision approchant à grande vitesse celle fournie par les techniques conventionnelles de la photogrammétrie aérienne. ●

Bibliographie

Baatz & Schäpe, A., 2000 : *Multiresolution Segmentation - an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation,*

In: Strobl, J. and Blaschke, T. (eds): *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII*, Wichmann Verlag.

Benz, U.C., Hofmann, P. Willhauck, G., Lingenfelder, I., Heynen, M, 2003 : *Multi-resolution, object fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information.* ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 58 p. 239-258.

Bonn F. & Rochon G., 1992 : *Précis de télédétection*, Vol. n° 1: Principes et méthodes, Québec, PUQ/AUPELF, 477 p.

Boulaassal, H., 2004 : *Apport de l'analyse orientée-objet à la détection de bâtiments, sur la base d'une image à très haute résolution spatiale*, Mémoire de troisième cycle présenté pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Topographie, dans le cadre d'une collaboration entre IAV-Hassan II (Maroc) et INSA de Strasbourg (France).

Hofmann, P., 2001 : *Detecting Informal settlements from IKONOS image data, using methods of object oriented image analysis - an example from cape town (South Africa).* Remote Sensing of Urban Areas/ Regensburger Geographische Schriften, Heft 35. Regensburg. ISBN 3-88246-222-1.

ABSTRACT

Main objective of this article is to evaluate the potential of an object oriented image analysis for building detection, based on very high spatial resolution images acquired on Strasbourg. The study has been done in the PAGE team of INSA Strasbourg, specialized since several years in three-dimensional building modeling using photogrammetric techniques. In the long or short term, this study should provide a detection of building contours with a couple of satellite images and thus to automate the initial step in the chain of urban three-dimensional model production. The results obtained in this study are very promising. Even if no reliable contours can be detected at this scale, the object oriented analysis allows a semi-automatic detection of the existence of buildings in different types of urban areas.

Cahier "Méchain et la longueur du mètre"



Colloque organisé par l'Observatoire de Paris
le 22 et 23 septembre 2004
en collaboration avec l'Institut Géographique National
l'Association Française de Topographie
et la participation du Bureau des Longitudes



Introduction du cahier “Méchain et la longueur du mètre”

■ Michel KASSER

Méchain (1744-1804) est, avec Delambre, un des grands noms de la géodésie française. Dans une coopération qui, en raison des événements du temps, a duré plusieurs années, ils ont conjointement été chargés de la mesure d'un arc de méridien s'étendant, d'une mer à l'autre, de Dunkerque à Barcelone.

Ce Méridien s'étendant au long du Méridien de Paris, fixé le 21 juin 1667, est celui qui a servi de fondement au système métrique décimal, décidé dès après la Révolution française, en choisissant de retenir comme étalon fondamental la longueur équivalente à la dix-millionième partie du quart du méridien terrestre.

De ce mètre est issu le kilogramme correspondant, sous certaines conditions, à la masse d'un décimètre cube d'eau. Même le franc et les précédentes monnaies multiples et sous-multiples avaient alors des dimensions et une masse issues du mètre et du kilogramme.

Rapidement adopté au niveau de plusieurs pays, 15 ou 20 ans après sa mise en place en 1799, le système métrique décimal a dû attendre 40 années avant de s'imposer en France. Il présentait pourtant de multiples avantages. Si bien qu'après la Convention du Mètre de 1875, le système métrique deviendra, encore près d'un siècle plus tard, le système international d'unités (le SI) en 1960. A notre époque il y a peu de pays à ne pas avoir reconnu la supériorité d'un tel système dont la principale qualité est d'être un système décimal.

L'année 2004 marquant le bicentenaire de la mort en Espagne de Méchain, le 20 septembre 1804, méritait bien de voir organiser un colloque “Méchain et la longueur du Mètre”. Ce colloque a été organisé, par collaboration entre l'Observatoire de Paris, l'Institut Géographique National et l'Association française de Topographie. Le Bureau des Longitudes a tenu à s'associer à cette manifestation.

A l'Observatoire de Paris, où il est venu habiter dès 1783, Méchain s'est employé à la publication de la Connaissance des temps, étant responsable des volumes correspondants aux années 1788 à 1794. Cette éphéméride étant publiée, à l'époque, deux années en avance, Méchain interrompt cette tâche en 1792 quand il part pour Barcelone afin de prendre en charge les opérations devant le mener jusqu'à Rodez. A son retour en 1798, après différentes péripéties, tant en Espagne qu'en Italie et nommé – dans l'intervalle – à l'organisme créé en 1795 sous le



Bibliothèque de l'Observatoire de Paris.

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.

nom de Bureau des Longitudes, il est chargé à partir de 1800, de la délégation pour ce bureau qui nomme un “Capitaine concierge” (sic : expression de Delambre) de l'Observatoire de Paris. Mais en 1803, il repart en Espagne afin de prolonger la Méridienne de France, de part et d'autre du parallèle de 45°, jusqu'au Baléares. Sa position, à la tête de l'Observatoire de Paris, lui est conservée jusqu'à son décès en 1804.

L'Institut Géographique National est depuis 1940, l'organisme chargé de la géodésie et de la cartographie française, prenant alors le relais du dépôt de la Guerre. Depuis quelques décennies, il oriente de plus en plus ses activités vers l'établissement, l'entretien et la mise à disposition des bases de données géographiques nationales de référence, tout en restant le pivot de la Géodésie française et un acteur important de la géodésie mondiale. De son côté, Méchain a débuté sa carrière de géo-

désien au Service Cartographique de la Marine (situé à Versailles, puis à Paris) ce qui lui a valu de faire quelques campagnes en mer, le long des côtes françaises puis d'être aux côtés de Legendre et de Cassini IV dans l'opération géodésique de raccordement des méridiens de Paris et de Greenwich en 1787. Cassini IV avait de qui tenir, étant fils de Cassini III auquel est due la première carte scientifique à l'échelle d'un pays de grande taille.

Tout les trois se trouvèrent donc parfaitement bien adaptés à la mesure nouvelle de la Méridienne de France; Cassini IV et Legendre s'étant récusés, Méchain, demeuré seul fut associé à Delambre, élève comme lui de Lalande qui paraît avoir été à l'origine de leur choix pour cette opération.

L'Association Française de Topographie a bien voulu se charger des aspects logistiques de l'organisation. Ses membres appartiennent à de nombreux domaines qui s'apparentent à la géodésie, aux mesures sur le terrain, aux relevés topométriques, trois domaines qui ont fait partie des travaux de Méchain au cours d'une carrière de plus de 40 années au service de la science.

En s'associant à ce colloque, le **Bureau des Longitudes** a souhaité honorer un de ses premiers membres, nommé dès la création de 1795. Par son Règlement le Bureau des Longitudes est chargé de l'édition des éphémérides françaises, établies de nos jours sous sa responsabilité scientifique.

Le colloque "Méchain et la longueur du mètre" se devait, non seulement de mettre en valeur les travaux de Méchain, mais aussi de faire connaître certains des aspects des tâches accom-

plies par ses successeurs dans différents domaines de ses activités. Il convenait aussi de traiter des recherches de notre époque qui, d'une façon ou d'une autre, sont issues de ces travaux, que ce soit la mesure de la Terre, la genèse du système métrique, la mise en œuvre d'opérations de triangulation. Les travaux actuels, même basés sur le GPS ou sur quantités d'autres méthodes spatiales extrêmement performantes (télémétrie laser sur satellites, interférométrie radio-astronomique, DORIS...), sont directement héritiers de cette période particulièrement active et brillante de l'histoire de la Géodésie.

C'est pourquoi après des conférences à caractère historique, le 22 septembre 2004, après-midi, la journée du 23 septembre a vu la présentation de communications traitant, tour à tour, de sujets modernes et d'aspects historiques. Au total ce sont onze exposés qui ont détaillé l'ensemble des thèmes relevant – à un titre ou à un autre – des travaux de Méchain.

Pour terminer il convient de formuler le vœu que ceux qui n'ont pu assister aux rencontres des 22 et 23 septembre 2004 éprouvent du plaisir à la lecture des pages qui suivent et, qui sait, aient peut-être quelque regret de leur absence... ●

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

Pierre-François-André Méchain - Quelques jalons

La vie de Méchain et ses activités sont données en ordre chronologique.

■ Suzanne DÉBARBAT

1744 août 16 Naissance à Laon du jeune Méchain qui entre, adolescent, à l'Ecole des Ponts et Chaussées à Paris et qui ne pourra y achever ses études pour raisons financières.

1770 (vers) Rencontre avec Lalande (1732-1807), alors professeur au Collège de France, qui deviendra un de ses protecteurs. Ce dernier lui demande de revoir les épreuves de la deuxième édition de son *Astronomie*.

1771 janvier 28 et octobre 9 Méchain découvre sa première puis sa deuxième comète. Au total il en découvrira 11 dont 7 seront, plus tard, homologuées par l'Union Astronomique Internationale.

1772 Lalande obtient pour Méchain un poste à Versailles, au Service cartographique du Dépôt de la Marine. A ce titre il participe à deux campagnes de mer, dans La Manche, pour une description des côtes de France.

1777 Méchain épouse Thérèse Marjou. Ils auront une fille et deux fils.

1781 Méchain fournit à Laplace des données d'observations de l'objet nouvellement découvert (mars), par Herschel à Bath, objet qui se révélera être une planète (Uranus).

1782 Son premier article de caractère astronomique, publié par l'Académie Royale des sciences, lui vaut un Prix de cette Académie. Il y est nommé astronome adjoint, puis en 1785 il en est associé et, en 1795, membre résident. Il observe au Collège de France et à l'Observatoire de la Marine, alors situé à l'Hôtel de Clugny, comme il était désigné à l'époque, où "règne" Messier (1730-1817).

1787 Avec Cassini IV (1748-1845) et Legendre (1752-1833), accompagnés de Piazzini (1746-1817), Méchain participe au raccordement des méridiens de Paris et de Greenwich. Pour la

première fois un cercle de Borda (1733-1799) du constructeur Lenoir (1744-1832) est utilisé, dans une opération franco-britannique de caractère géodésique.

1790-1791-1792 Avec Cassini IV et Borda, Méchain entreprend l'étude de l'emploi du cercle répétiteur aux observations astronomiques de latitude.

1790 L'Académie des sciences est chargée des opérations devant conduire à la longueur du Mètre, étalon d'un nouveau système des poids et mesures de caractère décimal.

1792 Cassini IV et Legendre s'étant récusés pour assurer les mesures de la Méridienne de France, Méchain et Delambre (1749-1822) en sont chargés. Le 25 juin Méchain part pour Barcelone. Le 13 septembre, avec Tranchot, qui s'est illustré dans la Carte de Corse, Méchain commence les mesures. Le 29 septembre il est à Montjouy.

1793 avril 2 Méchain travaille à une possible prolongation de la Méridienne et, le 23 septembre avec Tranchot, il se propose d'assurer le raccordement avec les stations françaises.

1794 En raison des événements franco-espagnols, Méchain est tenu de demeurer à Barcelone; en fin d'année et en désespoir de cause il obtient des passeports pour l'Italie.

1795 juin 25 Création du Bureau des Longitudes le 7 messidor an III.

1795 juillet 31 Méchain est à Marseille, à Vendres au début de septembre, puis à Carcassonne. Il fixe une base et la raccorde à ses triangles principaux. Il y prolonge son séjour en dépit d'une visite de Mme Méchain venue l'inciter à rentrer à Paris.

1798 Méchain est de retour. S'étant récusé pour faire partie de l'expédition d'Egypte, il y est remplacé par son fils Jérôme-Isaac, âgé de vingt ans puisque né en 1778. Le nom de Méchain, gravé à l'intérieur d'un temple d'Egypte, est celui de ce fils. Méchain s'emploie à une mise en ordre des instruments acquis par le Bureau des longitudes pour l'Observatoire de Paris, et il en discute avec le Baron de Zach.

1799 (printemps) Les Commissaires étrangers, réunis à Paris pour finaliser les opérations de la Méridienne de France et établir la longueur du Mètre définitif, la fixent à 3 pieds 11.296 lignes de la "Toise du Pérou".

1800 Zach (Fr. von) publie une biographie de Méchain dans sa *Monatliche Correspondenz der Erde-und-Himmels-Kunde*, Gotha, juillet, p. 96-117.

1802 septembre 17 Les Consuls approuvent le projet de prolonger la Méridienne de Delambre et Méchain qui s'arrête à Barcelone.

1803 avril 26 Méchain quitte Paris pour Barcelone en vue de la prolongation vers les Baléares. Le 5 mai il arrive à Barcelone.

1804 janvier 8 Méchain embarque pour se rendre à Ivice. Le 8 février il arrive à Palma de Majorque.

1804 août 29 Dernière lettre connue de Méchain à Delambre.

1804 septembre 11 Dernières mesures de Méchain, malade, au Pic d'Espadan. Le 13 septembre il est conduit en la maison



Bibliothèque de l'Observatoire de Paris.

Portrait de Méchain placé en frontispice de la biographie que fait paraître Zach en 1800. Ce portrait, de profil, paraît être le seul qui ait été fait du vivant de Méchain. Les autres auraient été exécutés à partir de celui-ci et, d'ailleurs, il semble que tous les portraits existants le représentent sous ce profil ou sous son inverse. Celui que possède l'Observatoire de Paris est une copie offerte, en 1882, par Achille Moisson (1816-1885), Premier président de la Cour d'Appel de Riom, quatrième enfant de Jean-Louis Moisson et de Rose Méchain (1783-1850). A. Moisson avait fait exécuter ce portrait à partir de celui qu'il possédait de son grand-père.

du Baron de la Puebla Tornesa à Castellon de la Plana.

1804 septembre 20 A 5 heures et quart, Méchain meurt chez le Baron de la Puebla où son collaborateur Desauche l'a accompagné. Son fils Augustin (1786-1860) est profondément affecté.

1804 septembre 25 Méchain est enterré au "nouveau cimetière" de Castellon de la Plana

1804 octobre 12 Le Bureau des longitudes est informé du décès de Méchain. ●

Références

Mètre et Système métrique. "Journée", de cet intitulé, dont les Actes ont été publiés en coopération Observatoire de Paris/Instituto de Estudios Documentales e Historico sobre la Ciencia de l'Universitat de Valencia-C.S.I.C., Débarbat S. et Ten A. responsables d'édition, 1993.

Medir el Metro. Ten A., Instituto de Estudios Documentales e Historico sobre la Ciencia de l'Universitat de Valencia-C.S.I.C., 1993.

Méchain géodésien. Débarbat S., Revue XYZ 100 de l'Association Française de Topographie, p. 63-70, 2004.

Archives de l'Académie des sciences, dossier Méchain.

Contact

Suzanne DÉBARBAT

Observatoire de Paris – SYRTE/UMR 8630

Bureau des longitudes – mail : Suzanne.Debarbat@obspm.fr

La galerie des instruments anciens de l'IGN

■ Jean-Claude LEBLANC et Daniel SCHELSTRAETE (Ingénieurs IGN) - Daniel MENET (Photographe de l'IGN)

"Ses instruments représentent le patrimoine de l'histoire cartographique et instrumentale française de 1750 à 1950". Un bref rappel historique permet de comprendre leurs provenances.

Période historique liée à la galerie

■ **L'Académie**, créée en 1666, elle réalise les premières mesures géodésiques: 1^{er} arc de méridien, 1^{er} canevas géométrique du territoire, 1^{re} carte générale appelée "carte de l'Observatoire" ou "carte de l'Académie" puis "carte de Cassini".



Extrait d'une "carte de Cassini" (1683 à 1815)

■ **Le dépôt de la guerre** créé en 1688, par Louvois:

- A sa création il porte le nom de "Dépôt des archives de la Guerre" destiné à l'archivage des cartes et plans.



Extrait de la carte des chasses du Roi (1704 à 1807)

- Louis XV fait établir les cartes des campagnes militaires et des places fortes, puis, vers 1765 la "carte des Chasses du Roi".
- A partir de 1817, la "Commission Laplace" lui confie les activités géodésiques et cartographiques avec le lancement vers 1820-1830 de la "Carte d'Etat-Major" puis à partir de 1860-1870, la cartographie dans "les colonies".



Les travaux liés à la carte d'Etat Major ont duré de 1818 à 1881 pour 267 feuilles



Les feuilles de 51 villes de France à 1/20 000 ont été réalisées durant le XIXe siècle

■ **Le service géographique de l'armée** créé en 1887 par le Général Perrier, a regroupé les cartes générales du dépôt de la Guerre et les plans aux grandes échelles du Génie Militaire.

■ **Le service du nivellement** créé en 1884 deviendra en 1891 "le service du nivellement général de la France", rattaché au ministère des Travaux Publics, en relation avec le chemin de fer.

■ **L'Institut Géographique National** créé en juin 1940, reprend les fonctions du SGA et le nivellement en France.

La création de la galerie

Au fil de l'histoire, les instruments étaient entreposés sur 4 sites dont a hérité l'IGN: Hôtel des Invalides, 140 rue de Grenelle, rue La Boétie, rue Gay-Lussac.

En 1957, le Général Hurault, chef du Laboratoire d'optique du SGA puis fondateur de l'IGN, a créé la galerie pour regrouper tous les instruments anciens dans un même lieu prévu à cet effet, dans le sous-sol du bâtiment de la 5^e Direction (Matériels) de l'IGN à St-Mandé.

Accessibilité et évolution de la galerie

La galerie n'est pas un musée ouvert au public (sous-sol et accès difficile). Des petits groupes peuvent cependant la visiter après accord du Service de la Logistique de l'IGN, et des appareils sont prêtés lors d'expositions à thème cartographique.

Tous les instruments sont photographiés depuis 2000. Les clichés sont consultables en interne à l'IGN mais il n'est pas encore prévu de les diffuser sur le site Internet de l'IGN.

Aujourd'hui, l'IGN conserve des instruments témoins lorsqu'il renouvelle son parc du fait de l'évolution, et un dépôt complémentaire a été constitué dans la base de matériel de l'IGN à Villefranche sur Cher.

Contenu de la galerie

Environ 650 instruments sont exposés dans 14 vitrines, classées en 6 grands thèmes : Astronomie de position, Géodésie, Lunettes d'observation, Topométrie et levers, Nivellement, Dessin et report

L'Ingénieur Géographe RICHARME, chargé de la sélection et de la présentation a écrit dans ses mémoires : *"je les trouvais très en désordre, et je mis deux ans pour les ranger, les étudier, enfin les faire astiquer et cataloguer"*. Il a dû terminer vers 1960. Devant le grand nombre d'appareils, il n'a présenté qu'un modèle par type, ce qui fait que tous les instruments sont uniques.

Les appareils de cette galerie permettent de suivre l'évolution technologique de deux siècles avec par exemple :

- **La disparition des échelles transversales**, remplacées par les verniers (avant 1800).
- **L'évolution quart de cercle** : graphomètre (vers 1750-1800) – cercle hydrographique ou cercle entier (vers 1790) – cercle répéteur (vers 1790-1830) – grands cercles azimutaux (vers 1870 et vers 1940), lunette méridienne de Brunner (vers 1900).

- **Les perfectionnements optiques** : alidades à pinnules sans optique – premières lunettes avec seulement 2 lentilles (avant 1800) – découverte du verre "flint-glass" utilisé en France vers 1820, qui permet de fabriquer des oculaires plus puissants – premiers réticules obtenus par photogravure (vers 1880) – nouvelle génération des théodolites : les T2 et T3 conçus par H. Wild (vers 1920-1930).
- Apparition vers 1850 des appareils auto-réducteurs (idée de PORRO). Tachéomètres de Moinot, Sanguet, Goulier, etc.
- L'évolution de "l'éclimètre-boussole" entre 1800 et 1880.
- L'évolution de la "règle à éclimètre" depuis le Colonel Goulier (vers 1880) jusqu'à "l'alidade holométrique modèle 1940"
- Le nivellement : niveau à "cuvette" de Lenoir; niveau "de Chézy" (nivelle montée sur la lunette); niveau "d'Egault" (nivelle montée sur le support de lunette ce qui permet de tourner la lunette); niveau "Bourdaloüë", niveau fabriqué par "Barthélemy" pour le NG et le SGA.
- **Les mesures des longueurs** : les étalons de 4 mètres utilisés pour la mesure des bases avant 1900 ont disparu; il reste un étalon du mètre, section en X, construit vers 1865, ainsi que plusieurs règles en maillechort; il y a aussi des jeux de fils en invar de 24 mètres.

Le tableau ci-après montre la diversité des instrument contenus dans la galerie

Astronomie

INSTRUMENT	REFER.	CONSTRUCTEUR	DATE	COMMENTAIRES
Astrolabe	01 A.2.06	Arsenius	1575	Le plus ancien et prestigieux instrument fabriqué dans les ateliers d'Arsenius; il est estimé vers 1575, avant l'introduction du calendrier grégorien (1582).
Astrolabe "Claude Driancourt"	02 A.2.08	Jobin	1910	Visée de l'étoile à 30°, un seul pointé. Un prisme renvoie la visée de la lunette sur un miroir ou liquide horizontal qui permet de viser des étoiles rigoureusement lors de leur passage dans une direction faisant un angle de 30° avec la verticale.
Cercle méridien	03 A.2.15	Gambey	1820	Pour observations méridiennes. Avant 1800, les traits étaient directement gravés sur le limbe; vers 1810, Gambey grave les traits sur un disque en argent porté dans le limbe.
Lunette méridienne	04 A.1.02	Brunner	1900	Permettait de déterminer la latitude par mesure de hauteur et la longitude avec l'heure de passage d'étoiles dans le plan méridien. Du fait du poids de la lunette, il fallait faire une correction de déformation de lunette.



Astrolabe



Astrolabe "Claude Driancourt"



Cercle méridien



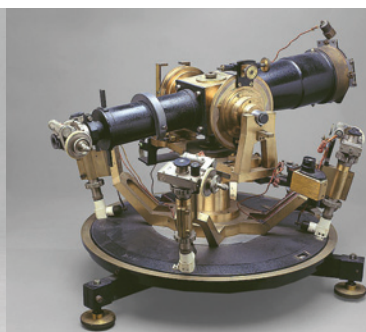
Lunette méridienne

Géodésie : instruments à axe principal vertical et secondaire horizontal

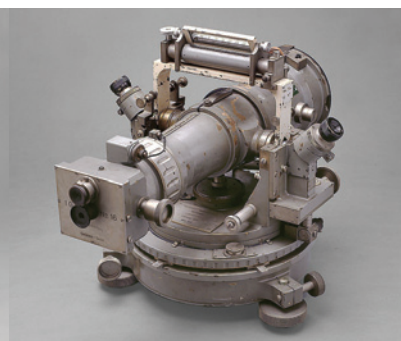
INSTRUMENT	REFER.	CONSTRUCTEUR	DATE	COMMENTAIRES
Théodolite	05 H.1.06	Gambey	1820	Mesure directe d'angles horizontaux et de distances zénithales.
Cercles azimutaux	06 C.1.01	Brunner	1870	Pour visées lointaines, modifié vers 1925 pour travail de nuit.
	07 E.1.04	Chasselon	1940-45	Abandonné vers 1950 au profit des théodolites.



Théodolite



Cercle azimutal "type GI Perrier"



Cercle azimutal "type IGN"

Géodésie : Instruments visant dans le plan contenant les points visés

INSTRUMENT	REFER.	CONSTRUCTEUR	DATE	COMMENTAIRES
Cercles répéteurs "de Borda"	09 H.1.10	Lenoir	1790	Cercles utilisés par Delambre et Méchain
	10 H.1.09	Lennel ?	1785 ?	Cercle répéteur en degrés, surchargé en grades, en 1791
Cercle hydrographique "de Borda"	11 B.3.03	Hurlimann, Ponthus et Terrode	1860 ?	Appareil tenu à la main pour viser dans la direction de la lunette et d'un autre point grâce à un miroir échancre



Cercle répéteur "de Borda"



Cercle hydrographique "de Borda"

Cartographie des XVIII^e et XIX^e siècle

INSTRUMENT	REFER.	CONSTRUCTEUR	DATE	COMMENTAIRES
Graphomètre	12 I.2.07	Langlois	1760 ?	Instrument typique de la "Carte de Cassini"
	13 I.2.10	Ferrat	1810	Instrument toujours utilisé au XIX ^e siècle



Graphomètres à lunettes et échelles transversales



Graphomètre à pinnules et 2 verniers

Levers aux grandes échelles

INSTRUMENT	REFER.	CONSTRUCTEUR	DATE	COMMENTAIRES
Alidade nivelatrice à perpendicule	14 M.3.01	"Diebolt et Fahlmers à Strasbourg"	1780 ?	Perfectionnement des 1 ^{res} alidades (nivelatrices ou non) en métal
Eclimètre boussole	15 I.1.09	Jecker	1810	Pour les levés sur le terrain de la carte "d'Etat-Major"
Règle à éclimètre "type Goulier"	17 L.3.01	Tavernier et Gravet	1880	Pour grandes échelles ; évoluée en éclimètre "Puissant" pour petites échelles
Tachéomètre "type Sanguet"	18 F.3.06	Sanguet	1900	Instrument mesurant angles et distances par basculement de la lunette par rapport à son reglet verticale et une mire ayant des graduations d'un rapport 100.



Alidade nivelatrice à perpendicule (fil à plomb)



Eclimètre boussole



Règle à éclimètre "type Goulier"



Tachéomètre "type Sanguet"

Nivellement

INSTRUMENT	REFER.	CONSTRUCTEUR	DATE	COMMENTAIRES
Niveau "de Chézy"	19 K.3.06	Lenoir ?	1780 ?	Niveau de Chézy transformé en "niveau d'Egault"
Niveau "d'Egault"	20 K.3.03	Jecker	1810	Niveau monté sur 2 vis calantes et 2 lames de ressort
Niveau "Bourdalouë"	21 J.4.05	Gravet	1860	Niveau munie d'une poignée isolée pour permettre le retournement de la lunette sans l'échauffer
Niveau de précision	22 J.3.04	Berthélemy	1900	Utilisé pour le NGF et par le SGA



Niveau "de Chézy"



Niveau "d'Egault"



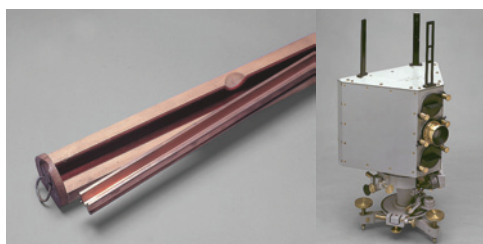
Niveau "Bourdalouë"



Niveau de précision

Instruments divers

INSTRUMENT	REFER.	CONSTRUCTEUR	DATE	COMMENTAIRES
Règle en "X"	23 B.1.03	?	1880	"Etalon" secondaire du mètre étalon
Photo-théodolite	24 F.1.07	Brosset	1890	Pour accélérer la triangulation en montagne. 1 ^{re} utilisation de la photographie, avec des objectifs pouvant occuper 3 hauteurs pour les visées montantes, horizontales et descendantes



Règle en "X"

Photo-théodolite

Géodésie publique et géodésie privée

Pierre André Méchain et sa seconde mission en Espagne, 1803-1804

■ Antonio E. TEN Université de Valence (Espagne) - CSIC.

L'histoire géodésique du système métrique décimal, rappelée ici à grands traits, est bien connue: le 19 mars 1791, l'Académie des sciences propose de fonder le nouveau mètre sur le quart du méridien, donc sur des mesures géodésiques. Le projet approuvé, deux astronomes, Jean Baptiste Delambre et Pierre André Méchain, mesurent, entre 1792 et 1798, l'arc du méridien de Paris depuis Dunkerque jusqu'à Barcelone. Le mètre définitif est arrêté, par la commission internationale réunie à Paris en 1799, à 443.296 lignes de la "toise du Pérou". Mais il est aussi bien connu que ce n'est pas la fin des travaux géodésiques autour du mètre. Le 31 août 1802, le Bureau des longitudes décide de continuer les mesures de la méridienne de France jusqu'aux îles Baléares, en Espagne. Pourquoi?

Les raisons scientifiques sont bien établies dans un rapport, écrit de la main de Méchain et conservé aux Archives nationales de Paris, que le Bureau des longitudes soumet aux Consuls de la République. Ce sont des raisons géodésiques. La prolongation permettrait d'avoir un arc partagé à peu près en deux moitiés par le parallèle 45° et, suivant un théorème de Delambre, cela épargnerait la nécessité d'utiliser la valeur de l'aplatissement de la Terre, fondé, dans les calculs du mètre, sur les mesures faites au Pérou 60 ans auparavant et dont l'exactitude était douteuse. On voulait donner, en quelque sorte, plus d'exactitude à la mesure bien que personne ait proposé de changer la mesure arrêtée trois ans plus tôt.

Le premier consul, Napoléon, approuve le projet le 17 septembre 1802. Il convenait donc de retourner en Espagne et d'ajouter divers triangles géodésiques à la chaîne déjà mesurée jusqu'à Barcelone; l'un d'eux, au moins, serait un grand triangle sur la mer, le plus grand jamais mesuré. Sur sa demande, Pierre Méchain est chargé des opérations. Le 26 avril 1803 l'astronome, accompagné de son fils Augustin, de l'ingénieur Dezauche, du diplomate Le Chevalier et de son domestique Chauvet, quitte Paris pour Barcelone. Méchain ne réussit pas à terminer son travail. Accablé de malheurs, il succombe du paludisme à Castellón de la Plana, au nord de Valence, le 20 septembre 1804. Le travail sera terminé par

Biot et Arago entre 1806 et 1808. D'autres travaux continueront la mesure du méridien de Paris jusqu'aux îles du nord de l'Écosse et, à la fin du XIX^e siècle, jusqu'en Algérie. Jusqu'ici tout est plus ou moins bien connu des historiens et des géodésiens.

Mais derrière cette histoire il y avait des détails cachés. Il n'est pas question ici des opinions de Delambre concernant la prétendue erreur commise par Méchain en 1792 dans la détermination de la latitude de Montjouy, erreur dont les mesures modernes ont dévoilé l'inexistence¹, bien que des ouvrages récents continuent à y trouver la véritable raison de ce dernier voyage. Une grande partie de ces détails cachés qui, ici, nous concernent, les plus intéressants du point de vue géodésique sans aucun doute, sont contenus dans la riche, et presque totalement inédite, correspondance de Méchain pendant ce deuxième voyage, notamment dans la correspondance avec Delambre conservée aux Archives de l'Observatoire de Paris.

Le seul chercheur qui eut ces lettres en main jusqu'à la fin du XX^e siècle fut Guillaume Bigourdan qui, en 1900, publia un article fondé sur sa lecture². Ces lettres ne furent pas répertoriées dans le catalogue des manuscrits de l'Observatoire de Paris, fait de la main de Bigourdan, disparurent pendant presque un siècle et ne furent retrouvées pour la recherche que par les services de l'Observatoire de Paris et l'auteur de cet article en 1985.

Qu'apportent les lettres de l'époque à l'histoire officielle des opérations géodésiques autour du mètre? Déjà Bigourdan découvre là des détails importants pour l'histoire de la géodésie. Mais Bigourdan fait une lecture partielle. Seuls certains détails le concernent. Il y a un monde d'informations qui lui échappe. Les problèmes de Méchain avec les autorités, avec le temps, avec l'orographie et avec ses collaborateurs, ses doutes constants, dessinent une image beaucoup plus complexe des opérations que tout ce qu'on avait jamais raconté. Du point de vue géodésique, elles ouvrent une fenêtre privilégiée sur le travail d'un géodésien. C'est jusqu'à six projets différents de jonction des Baléares avec le continent, avec les raisons qui le portèrent à les proposer, que nous allons trouver sous l'histoire officielle.

(1) Polit I. (1931) La latitude de Montjuich determinada por Méchain. Anales de la asociación española para el progreso de las ciencias, 3 y 4, 43-48.

(2) Bigourdan, G. (1900). La prolongation de la méridienne de Paris, de Barcelone aux Baléares, d'après les correspondances inédites de Méchain, de Biot et d'Arago. Bulletin astronomique, XVII, 348-368; 390-400; 467-480.

La seconde expédition de Méchain à la lumière de sa correspondance avec Delambre

Méchain arrive à Barcelone le 5 mai 1803 avec l'espoir de se rendre directement à Majorque grâce au brigantin, promis par le Gouvernement espagnol, sous le commandement de l'officier Pascual Enrile³. Faute du brigantin à son arrivée, il commence à parcourir les montagnes au sud de Barcelone pour préparer les stations. Datée à Montserrat, Méchain écrit une lettre à Delambre le 30 vendémiaire an XII (23 octobre 1803). C'est la première lettre que ce dernier reçoit à Paris.

Il s'agit d'une très longue lettre, en réponse à une autre de Delambre, perdue, datée du 16 thermidor an XI. Après quelques mots affectueux, la lettre commence par une discussion des détails de la publication de la Base du système métrique. Le plus important, sans doute, dans cette lettre du 23 octobre 1803, c'est qu'elle permet de connaître les premières idées de Méchain sur la prolongation. Le grand triangle sur la mer aurait ses sommets au Puig de la Morella, au sud de Barcelone, Mola-cime de Montsià, à l'extrémité sud de Catalogne, et Silla-Torrellas (le Puig major d'aujourd'hui) à Majorque.

Mais la mesure dut lui sembler déjà, dès le début, un travail plus complexe et long qu'on le pensait à Paris. Les six mois de travail prévus se révélaient une durée trop courte. Méchain soumet au Bureau des Longitudes la possibilité qu'un autre astronome vienne le remplacer dans ce travail.

Cette idée surprenante se renforce beaucoup dans une autre lettre du 5 brumaire an XII (28 octobre 1803), datée de la butte de Matas, sur le Mont Alegre. Méchain, affirme, qu'il est prêt à retourner directement à Paris sans "le plus léger regret". C'est l'avis de Laplace qui décidera, affirme Méchain, et il l'attend. Mais il ne peut pas savoir que les lettres qu'il envoie à Delambre ne suivent pas vers le Bureau des Longitudes.

La troisième lettre, écrite depuis Barcelone le 7 décembre nous apprend un changement de plan : Il envisage d'aller directement à Ivice, plus au sud, pour tenter d'y appuyer son grand triangle. Faute de renseignements précis, il a dessiné de nouveaux plans. Toujours depuis Barcelone, empêché d'aller à Ivice, il écrit une autre lettre à Delambre, datée du 17 décembre. Pour la première fois il ouvre la possibilité de continuer la chaîne continentale vers le sud. La jonction par Ivice, moins éloignée du continent, devrait être plus assurée que la mesure du grand triangle sur Majorque, dont les difficultés semblaient accrues. La réponse était à Ivice.

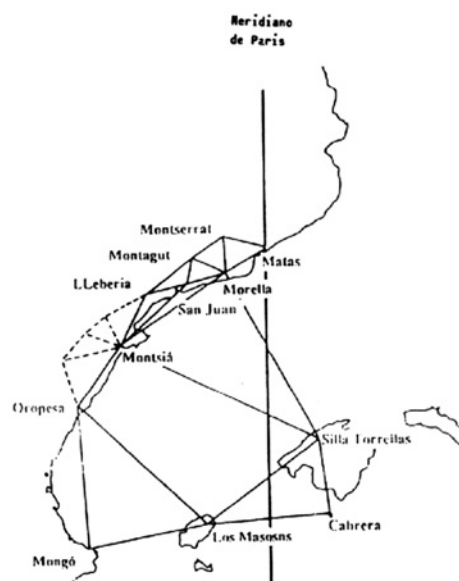
Le 8 janvier 1804, prêt pour embarquer finalement vers Ivice, Méchain écrit sa cinquième lettre à Delambre. C'est un résumé. Deux possibilités sont ouvertes : la jonction nord, Catalogne- Majorque, et le sud Valence-Ivice, avec une troisième plus douteuse : joindre aussi Ivice à la Catalogne. Trois triangles sur la mer !

Datée d'Ivice le 25 de janvier 1804, la sixième lettre est un trésor de détails humains. Mais il s'agit de la géodésie. Après avoir parcouru les montagnes de l'île, la conclusion s'impose :

Elles n'ont pas une hauteur suffisante. On ne peut pas lier Ivice à la Catalogne. Par contre, on voit parfaitement les montagnes de Valence. La jonction sud est parfaitement possible. Avant de reconnaître les montagnes de Majorque, les deux projets possibles semblent bien établis : jonction Catalogne-Majorque, avec triangulation interne des îles et mesure d'une base à Majorque, ou prolongation de la chaîne continentale vers le sud de Valence, jonction avec Ivice et, si nécessaire, triangulation des îles, étant donné que la chaîne dévierait beaucoup vers l'ouest du Méridien de Paris.

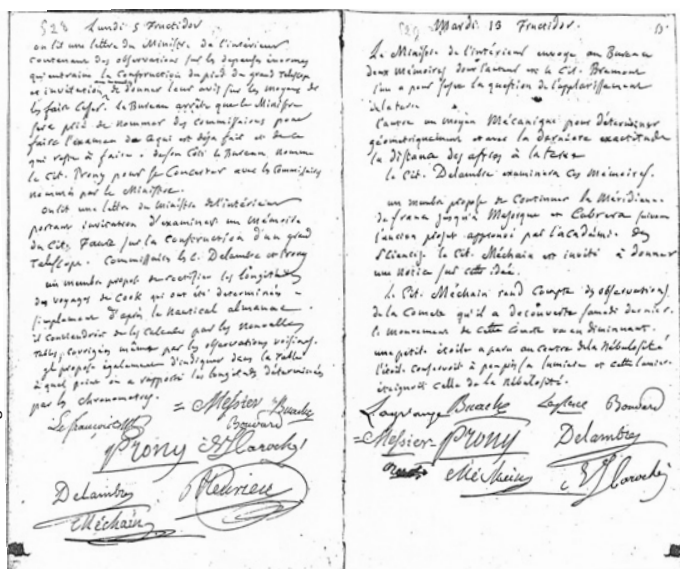
De Palma, le 16 pluviôse an XII (8 février 1804) Méchain écrit une lettre à son épouse, à laquelle il ajoute une feuille destinée évidemment à Delambre. La feuille, écrite avant d'avoir reconnu les montagnes, revient sur les jonctions possibles. La préférence revient à la jonction nord mais Méchain dessine un grand projet avec toutes les possibilités : le grand triangle du nord, Morella-Montsia-SillaTorrellas, pourrait être complété d'un autre dont le succès soit assuré, le triangle Montsia-Desierto de las Palmas-SillaTorrellas, pour appuyer sur lui un triangle avec ses sommets au Desierto, à SillaTorrellas et à Los Masons, qui permettrait de relier Ivice à la chaîne. Le réseau pourrait se compléter par un triangle s'appuyant sur Cabrera ou, si besoin était, un autre triangle sur la mer pour relier Los Masons aux montagnes au sud de Valence, Cullera ou le Montgó. Un projet bien ambitieux tracé avant de reconnaître les montagnes de Majorque. Mais ce n'est pas tout ! Méchain, toujours incertain sur la mesure de grands triangles sur la mer, arrive même à proposer de renoncer aux îles ! Les triangles pourraient simplement descendre vers le sud tout au long des côtes de Valence, et projeter leurs côtés sur la méridienne, malgré la grande déviation de la chaîne vers l'ouest. L'idée constitue une complète révolution en ce qui concerne tous les plans tracés antérieurement.

Mais le temps passe. Sans nouvelles du Bureau, après tant d'hésitations, fatigué, Méchain se décide pour le plus court chemin : la jonction nord. On mesurerait après un triangle sur Ivice et Cabrera et une base de vérification. Le temps, fin de l'hiver, était



Projet de Méchain pour rejoindre Majorque. In "Medir el Metro" de A. Ten.

(3) Ten, Antonio E. (1986). Medir el metro. Valencia, IEDHC.



Page 53 du volume I des procès verbaux du Bureau des longitudes. On trouve ici la proposition de recommencer les opérations en Espagne.

favorable à la mesure du grand triangle sur la mer. Pour commencer les mesures, il envoie ses collaborateurs allumer des feux sur les sommets de Morella et Montsia.

C'est à ce moment, le 13 mars 1804, qu'il lui arrive de Paris une lettre de Delambre, la seule qui semble conservée, datée du 25 février. La lettre est démolissante. Delambre, malade pendant plusieurs mois, n'a lu au Bureau les lettres, avec les projets, doutes et demandes de Méchain, qu'à la fin de février. Après délibération, Le Bureau des longitudes décide que la meilleure option est le sud ! Méchain devrait aussi mesurer une nouvelle base sur les côtes de Valence, non de vérification mais équivalente aux deux autres déjà mesurées à Melun et à Perpignan. Très affaibli, Méchain n'ose pas discuter. Dans sa réponse à Delambre, datée de Palme de Majorque le 6 avril, il accepte les ordres, après être monté finalement au Puig Major pour s'assurer que ses plans de mesurer le seul triangle Morella-Montsia-Silla Torrellas, rejeté par le Bureau, étaient parfaitement faisables et que, sauf des impondérables dans la mesure sur la mer, cela était beaucoup plus simple que d'entreprendre ceux qu'on lui demandait d'exécuter. Méchain quitte les îles vers Valence, où il arrive à la fin d'avril 1804 où il n'était pas attendu. En attendant les permis, l'été, avec les brumes sur la mer, s'approche...

La lettre suivante qui parvient à Delambre est un extrait, de la main de M^{me} Méchain dans une lettre datée de Vinaroz, près du Montsia, le 23 juin 1804. Obligé de laisser les mesures sur la mer pour octobre ou novembre, ou même février ou mars de 1805, Méchain compte employer ce temps à la mesure de la base et à achever les travaux de la chaîne continentale. Méchain doit annoncer cet énorme retard à son épouse. Une année perdue et encore une autre année de travail ! Mais Méchain lui cache son état de désespoir. Deux longues lettres cependant, adressées à un ami de Perpignan, M. Jaubert, (Cullera 2 juillet), et à un collaborateur espagnol, le Baron de la Puebla Tornesa, (Puig, 9 août), permettent de connaître ce que la lettre du 23 juin, ne pouvait pas raconter.

Cette lettre à Jaubert, à un confident, est impressionnante. On écoute un Méchain complètement démoli : "[...] sans désirer la mort, je suis loin de la craindre [...]"; "[...] Cette malheureuse commission dont le succès est si éloigné [...] sera plus que probablement ma perte [...]"; l'astronome est à la limite de ses forces. La lettre au Baron de la Puebla Tornesa, de son côté, passe en revue ses malheurs avec certains des collaborateurs espagnols. Maladies, abandons, erreurs... il est presque seul !

Finalement, la lettre à Delambre, datée du Puig le 29 août, la dernière qu'il lui écrira, est une sorte de résumé de toutes les difficultés que Méchain a exprimées depuis son arrivée à Valence. Déjà à la limite de ses forces, toujours mesurant sur les montagnes, Méchain a une seule demande au Bureau : qu'on le remplace ! Il a à peine de forces pour continuer à affirmer que la solution nord aurait été plus facile et rapide, et pour expliquer les décisions qu'il continue à prendre. Le panorama de futur qu'il dessine est affreux.

La mort

La fin est proche. Au Puig, Méchain dut être atteint du paludisme. Les cahiers de mesure le montrent au travail le 2 septembre dans le pic d'Espanan, à l'ouest de Castellón. La maladie se déclenche. Dix jours après, Il est descendu de la montagne et le jeudi 13, nous le trouvons à Castellón, au manoir du Baron de la Puebla. Les extraits du journal de son aide Dezauche, heureusement conservés⁴, permettent de suivre ses derniers jours. Entre ses bras l'astronome expire à 5 heures 20 minutes du jeudi 20 septembre 1804.

Les funérailles de Méchain furent un événement à Castellon. Y assistèrent les premières autorités civiles et militaires, accompagnées des aides espagnols qu'il eut et de la noblesse de la ville. Le 25 septembre il fut enterré dans le "cimetière neuf" de Castellón, dans un cercueil de bois qui contenait à son tour un cercueil de plomb. Dezauche avait pris cette précaution en vue de son possible transport à France. Mais le destin voulait que ses ossements reposassent pour toujours en terre espagnole. Dans la guerre contre la France qui éclata en 1808, son cercueil fut déterré, le plomb fondu pour faire des balles contre les Français et ses ossements perdus dans une fosse commune d'un cimetière qui n'existe plus.

Loin de l'histoire officielle, l'ensemble des lettres échangées avec Delambre, complétées par quelques autres documents d'archives, nous a permis de comprendre l'esprit de Méchain au milieu de ses travaux, ceux d'un géodésien dans le travail sur le terrain. Il s'agit là d'une des occasions rares que l'histoire nous a permis d'apprécier sur des doutes, des projets constamment en changement, des difficultés, des erreurs... Mais aucun résumé ne peut arriver à transmettre toute la charge dramatique que distille les lettres elles-mêmes. C'est là le grand mérite de la correspondance qui, prochainement, doit être publiée par la Municipalité de Barcelone et l'Observatoire de Paris en commémoration du bicentenaire de la mort de Méchain. ●

(4) Anonyme (1891). La dernière mission de l'astronome Méchain (1804). Revue rétrospective, XV, 145-168.

Le premier nivellement géodésique de la France à partir des mesures faites par Delambre et Méchain sur la méridienne de Paris

■ Robert VINCENT

Si la méconnaissance de la forme de la France avait été levée dès le XVIII^e siècle par les travaux des Cassini, une ignorance analogue régnait encore pour les altitudes, au moment de la Révolution, bien que les déterminations barométriques en aient donné une première approximation.

Delambre et Méchain, lors de leurs travaux observés de 1792 à 1798, sur la méridienne de Paris, ont mesuré simultanément les angles des triangles et les angles zénithaux des visées. Les altitudes des sommets de la chaîne furent ainsi déterminées avec une exactitude inégalée jusqu'alors. En 1817, il fut décidé d'établir une nouvelle carte de France à l'échelle de 1/80 000, dite carte de l'Etat-Major, dotée de cotes d'altitude, avantage considérable sur sa devancière, la carte de Cassini, avec une figuration du relief. Pour mener à bien cette entreprise, sur le modèle de la méridienne de Paris de Delambre et Méchain, un ensemble de chaînes méridiennes et parallèles, avec une géodésie complémentaire primordiale, va constituer le canevas observé de 1818 à 1850, afin de servir d'ossature aux levers. Par cette même méthode, la hauteur du Mont-Blanc fut déterminée d'une façon précise en 1828-29.

■ mots clés

nivellement géodésique,
altitudes sur la carte de France
du XIX^e siècle,
altitude du Mont-Blanc

La forme exacte de la France avait été révélée au XVIII^e siècle par les travaux de la célèbre carte des Cassini. Mais cette carte ne comportait pas d'indications altimétriques. Une ignorance régnait encore pour les altitudes au moment de la Révolution, bien que les déterminations barométriques en aient donné une première approximation. Les premiers nivellements géométriques de l'abbé Picard, exécutés au XVII^e siècle afin d'étudier la possibilité d'amener les eaux à Versailles, pour connaître les altitudes relatives de la Loire à Briare et de la Seine à Paris, étaient restés sans suite.

Delambre et Méchain, lors de leurs travaux observés de 1792 à 1798, sur la méridienne de l'Observatoire de Paris entre Dunkerque et Barcelone pour déterminer la longueur de l'arc de méridien, ont mesuré simultanément les angles des triangles et les angles zénithaux des visées.

L'appareil utilisé est un cercle répétiteur conçu par Borda. Il ne comporte qu'un seul cercle gradué, mais celui-ci peut être basculé. Il peut ainsi être mis

- dans le plan passant par le point de station et les deux points visés, pour mesurer les angles plans,
- dans le plan vertical méridien pour observer la hauteur des étoiles. Cette disposition était essentielle pour la mesure des distances zénithales (angle vertical que fait une visée avec le zénith) et a été utilisée pour déterminer des latitudes astronomiques en 7 stations dites astronomiques de la chaîne méridienne, afin d'étudier la variation de la courbure terrestre.
- dans le plan vertical d'un point visé pour en mesurer l'angle zénithal. De telles mesures des "distances zénithales", entre les sommets des triangles d'une chaîne géodésique avaient deux buts : le principal est de permettre de rabattre sur le plan horizontal par le calcul, les angles plans mesurés en une station dans le plan des deux points visés, et aussi de permettre d'en déduire, puisque les distances aux points visés sont

déterminées, les dénivelées et de calculer ainsi de proche en proche les altitudes. En particulier, la connaissance des altitudes des bases géodésiques de Melun et de Salces était nécessaire pour leur réduction au niveau de la mer.

Le nivellement géodésique de la méridienne

Entre les sommets de la chaîne, les mesures des angles zénithaux entre deux stations sont presque toujours réciproques. Par contre elles ne peuvent être simultanées faute d'un deuxième instrument. Elles sont exécutées aux heures médianes de la journée, lorsque la réfraction de l'air reprend chaque jour à peu près la même valeur, bien qu'en contrepartie les images soient alors soumises à une agitation préjudiciable à la commodité du pointé. Ces mesures réciproques permettent de tenir compte expérimentalement du "niveau apparent", somme des effets de la sphéricité et de la réfraction atmosphérique.

Voici ce que disait Delambre, à propos de ces mesures d'angles zénithaux : "Ces observations de hauteurs n'étaient pour nous, que des objets très secondaires; elles ne devaient nous servir qu'à réduire nos bases au niveau de la mer, et nous les connaissons avec plus d'exactitude qu'il n'en faut pour cet objet. Si nous avions été chargés de faire un nivellement très exact, nous aurions pris d'autres précautions: nous aurions divisé les intervalles; nous aurions tâché que les observations réciproques des deux signaux eussent été simultanées et faites vers le milieu du jour et par beau temps; mais ces précautions eussent coûté trop de temps, de dépenses et de peines, et, malgré tant de soins, l'incertitude des réfractions est telle, que nous aurions pu bien difficilement répondre de deux pieds au lieu de dix ou de douze, dont on est en droit de dire que nos élévations au-dessus des deux mers peuvent être en erreur."

Tout est dit et bien dit dans le style de l'époque. La précision des altitudes obtenues est ainsi estimée par Delambre à 3 ou 4 mètres, et il est bien conscient que pour obtenir mieux, il eut fallu passer par une triangulation à plus petits côtés. C'est bien là l'inconvénient du nivellement d'un réseau géodésique, où le premier ordre est le moins précis !

La somme algébrique des dénivelées réciproques moyennes des trois côtés d'un triangle, théoriquement nulle, donne une bonne idée de la précision des opérations. Sur la chaîne méridienne de l'Observatoire de Paris, ces fermetures sont en moyenne de 3 mètres, ce qui laisse augurer une précision de la moyenne des dénivelées réciproques entre deux sommets de 1,80 m. Cela est faible en regard des imprécisions inhérentes aux mesures d'angles zénithaux sur des distances souvent longues des côtés géodésiques (de 20 à 40 km).

Comme on le sait, Delambre observa la partie Nord de l'arc, de Dunkerque à Rodez et Méchain la partie sud de Rodez à Perpignan et Barcelone. Delambre se référa au niveau moyen de la mer du Nord à Dunkerque et de proche en proche, détermina ainsi l'altitude du sommet du Clocher de la cathédrale de Rodez : 362,73 toises (706,98 m). Méchain fit de même à partir du niveau de la Méditerranée près de Perpignan et trouva 362,26 toises (706,06 m). Cette différence de 0,47 toise (0,92 m) est très honorable, et même heureuse, compte tenu des précisions annoncées ci-dessus.

La carte de France dite de l'État-Major et ses altitudes

En 1817, il fut décidé d'établir une nouvelle carte de France à l'échelle de 1/80 000, un peu plus grande que celle dite de Cassini qui venait d'être achevée (à l'échelle d'une ligne pour 100 toises, c'est-à-dire au 1/86 400). Cette carte des Ingénieurs-Géographes dite "Carte de l'État-major", sera dotée de cotes d'altitude, avantage considérable sur sa devancière, et elle comportera un figuré du relief.

Pour mener à bien cette entreprise, sur le modèle de la méridienne de Paris de Delambre et Méchain, un ensemble de chaînes méridiennes (dites de Dunkerque, Sedan, Bayeux) et parallèles (dites d'Amiens, de Paris, Bourges, parallèle moyen ou de Clermont, Rodez et chaîne des Pyrénées et chaîne méditerranéenne), avec la géodésie complémentaire primordiale, va constituer le canevas de la géodésie primordiale française. Il sera observé de 1818 à 1850, pour servir d'ossature aux levés de la nouvelle carte.

Pour définir l'altitude du Panthéon à Paris, choisi comme point fondamental de ce nivellement géodésique de la France, en 1820-1821, les distances zénithales réciproques et simultanées,

ont été mesurées sur la partie ouest de la chaîne du parallèle de Paris, entre Brest, Cancale et Paris, sous la direction du Colonel Bonne. Ces mesures ont été exécutées au moyen de deux cercles répéteurs construits l'un par Bellet, l'autre par Richer. Elles se réfèrent au niveau moyen de la mer à Brest et à Cancale (rocher du Herpin), et forment une polygonale empruntant certains côtés de la chaîne. Ces mesures ont eu un succès considérable, et ont donné pour la hauteur du Panthéon au-dessus du niveau moyen de l'Océan : 143,84 mètres pour le sommet de la lanterne, soit 60,54 mètres pour le pavage intérieur de l'édifice. L'erreur moyenne, celle dont la probabilité d'être dépassée est de 1/2, a été estimée à 9 centimètres. Cette donnée, point fondamental les altitudes, a permis de recalculer les altitudes de la méridienne de Paris de Delambre et Méchain, puis d'arrêter les altitudes de l'ensemble du canevas primordial. Ainsi, toutes les altitudes portées sur cette carte, ont été déterminées à partir des altitudes géodésiques des points du canevas primordial.

À Bourges, sur la face Est du pilier intérieur Sud-est de la tour Nord de la cathédrale, point de la méridienne, un trait à 3,50 mètres au-dessus du dallage fait office de repère d'altitude géodésique et est daté de 1818. Sa cote compensée est de 159,360 m. Elle a servi de point origine des altitudes pour Paul-Adrien Bourdalouë lorsqu'il entreprit son "Nivellement du Département du Cher" en 1850, nivellement géométrique de précision au niveau à lunette, avec des portées courtes entre appareil et mires limitées à 125 mètres. Quelques années plus tard, quand ce même Bourdalouë fit son "Nivellement Général de la France" par la même méthode de nivellement géométrique de précision, en se référant au niveau moyen de la Méditerranée à Marseille, et après avoir compensé son réseau en 1862, il constata à Bourges que les altitudes de son nivellement de 1850 étaient trop élevées de 2,487 mètres. C'est dire aussi que les altitudes géodésiques issue des mesures zénithales de la chaîne méridienne de Delambre et Méchain étaient trop élevées de cette quantité. Cela donne une indication sur la précision des altitudes géodésiques.

Il suffit aujourd'hui de comparer les altitudes portées sur la carte du XIX^e siècle avec les altitudes de la carte moderne issues du nivellement géométrique, pour constater la précision du nivellement géodésique. Cet écart est bien de 2 à 3 mètres dans les environs de Bourges.



Le repère du nivellement géodésique de la cathédrale de Bourges



La polygonale du nivellement géodésique à visées réciproques et simultanées entre Cancale et Paris

■ ■ ■ **L'altitude du Mont-Blanc:** À la fin du XVIII^e siècle, une "compétition" apparue pour savoir quel était du Mont-Rose ou du Mont-Blanc, le sommet le plus élevé des Alpes. Faute de pouvoir y amener des instruments géodésiques pour une grandiose visée zénithale – le Mont Blanc venait d'être gravi pour la première fois le 8 août 1786 – il a bien fallu déterminer leur altitude indépendamment l'un de l'autre et par l'intersection de visées venant de stations bien moins élevées. Pour ce faire, en 1803-1804, une triangulation de la Savoie, rattachée récemment à la France sous le nom de département du Mont-Blanc, fut entreprise en s'appuyant sur la chaîne "parallèle" de la triangulation de Cassini, à 180 000 toises au sud du parallèle de Paris. Le sommet du Mont-Blanc fut intersecté depuis deux stations, par deux visées formant entre elles un angle de 55 grades: l'une de 44 km depuis Le Môle (alt 1 866 m), sommet dominant la vallée de l'Arve, à 5 km au Nord-Est de Bonneville, et l'autre de 35 km depuis Le Mont Chervin (alt 2 414 m), sommet de la partie Sud de la chaîne des Aravis, à 5 km au Nord d'Ugine. Les altitudes se référaient à la hauteur du lac de Genève, connue elle-même par des observations barométriques. Les deux visées sur le Mont-Blanc ne furent évidemment pas réciproques, le sommet n'ayant pas été stationné.



L'enchaînement des triangles ayant permis de déterminer l'altitude du Mont-Blanc

Une nouveau calcul de ces triangles de Savoie fut entrepris 25 ans plus tard (1827-1829) en partant cette fois, des nouvelles chaînes parallèles. Pour connaître précisément les longueurs des visées, les deux stations ont été reliées aux deux sommets du "Parallèle Moyen" de Clermont: Le Granier, à 12 km au Sud de Chambéry, et Le Colombier (sommet Sud dit Le Cuerme) à 4 km au Nord de Culoz, par une triangulation avec un point intermédiaire: Le Salève (grand Piton), à 12 km au Sud de Genève.

Pour les altitudes, le niveau des eaux moyennes du lac de Genève à la sortie du Rhône, fut arrêté à l'altitude 374,80 mètres:

- par le nivellement géodésique du "Parallèle de Bourges" (1818-1824) depuis l'île de Noirmoutier jusqu'à la frontière suisse, au sommet de La Dole (repère sol) à 1 680,85 m, en accord à Bourges avec les altitudes des points de la Méridienne de Dunkerque,
- par la détermination géométrique de la hauteur de la Dole au dessus du lac de Genève, obtenue en 1812, par le Génie suisse.

La correction de réfraction fut déterminée par l'étude des visées zénithales réciproques entre les points de ce canevas. Le nivellement du Salève fut rattaché par une station intermédiaire située à l'Observatoire de Genève, au niveau des eaux moyennes du lac de Genève

L'altitude du Mont-Blanc fut trouvée à:

- 4 812,42 mètres par la visée depuis Le Môle (dist zénith 95,76 grades)
 - 4 809,36 mètres par la visée depuis le Mont Chervin (dist zén 95,93 gr)
- et fut ainsi arrêtée à la moyenne de 4 810,89 mètres.

On peut mentionner qu'en 1821-1823, à l'occasion de la mesure d'un arc de parallèle exécuté en Piémont et en Savoie, par des officiers et astronomes piémontais et autrichiens, l'altitude du Mont-Blanc fut déterminée par Carlini et Plana, par de longues visées zénithales directes du Colombier (51 km) et du Granier (82 km). L'altitude trouvée alors de 4 802 mètres fut reconnue trop faible par suite d'une sous-estimation des altitudes du Colombier et du Granier.

Les livres de géographie du XIX^e siècle portèrent donc cette altitude de 4 810 mètres. Plus tard, des mesures géodésiques plus fines et rattachées aux repères du Nivellement Général de la France, nivellement géométrique de précision, lui affectèrent l'altitude de 4 807

mètres. Aujourd'hui, la carte IGN édition 2002 porte à nouveau l'altitude 4 810 mètres déterminée par GPS.

La détermination des altitudes des sommets des Pyrénées fut l'objet de travaux géodésiques remarquables de 1825 à 1829. Le lecteur se reportera à l'article de Raymond D'Hollander paru dans XYZ n° 98. ●

Bibliographie

Nouvelle Description géométrique de la France par L. Puissant (volume I: 1832 - volume II: 1840)

Mesurer la Terre, 300 ans de Géodésie française, par Jean-Jacques Levallois (Chapitre v) (édition AFT 1988)

Revue XYZ n° 68 (3^e trim 1996): Biographie

de Paul-Adrien Bourdalouë, par Robert Vincent

Revue XYZ n° 98 (1^{er} trimestre 2004): Les premières déterminations d'altitudes des sommets des Pyrénées, par Raymond D'Hollander.

ABSTRACT

While the ignorance of the outline of France had come to an end as early as the eighteenth century thanks to the work of the Cassinis, the same lack of knowledge still prevailed, at the time of the french Revolution, for altitudes, although barometer measures already gave a first approximation. Delambre and Mechain, during their surveys, studied from 1792 to 1798, on the Paris meridian, simultaneously measured the triangle angles and the zenithal angles of shots. The altitudes of the survey marks of the chains were thus determined with a accuracy unequalled till then. In 1817, a new map of France was planned on the scale of 1/80000 and called "carte de l'État Major", showing altitude marks, which was a substantial advantage compared to its predecessor, Cassini's map, which pictured the relief. To achieve this task, on the example of the Paris meridian by Delambre and Mechain, a set of meridian and parallel chains, along with a complementary geodesy of prime importance, was to form the framework observed from 1818 to 1850, in order to serve as a basis for the surveys. Thanks to the same method, the height of the Mont-Blanc was precisely determined in 1828-1829.

Plaidoyer pour la géodésie

■ André FONTAINE

En rendant hommage à Méchain, on rend hommage à un homme, à ses collègues et à toute une époque où la détermination de la forme et des dimensions de la Terre restait un problème scientifique même si les travaux des "Cassini" en avaient déjà donné une application cartographique. Cette fin du XVIII^e siècle est une charnière: la nouvelle observation de la méridienne de France en vue de l'obtention d'une référence universelle pour l'unité de longueur est sans doute la dernière mission à but avant tout scientifique.

Le passage de la science à la technique s'est ensuite opéré en douceur et on est resté fidèle à la méthode de Delambre et Méchain, en oubliant presque de la justifier plus en détail. Je reprendrai donc l'exposé du principe du calcul de la méridienne, puis j'évoquerai la justification et l'intérêt de la géodésie, enfin nous verrons les conséquences de l'abandon actuel de cette méthode.

La commission "Borda, Lagrange, Laplace, Monge, Condorcet" avait fixé l'objectif: *"..Nous proposons donc de mesurer immédiatement un arc de méridien depuis Dunkerque jusqu'à Barcelone ce qui comprend un peu plus de 9° 1/2... A ces avantages se joint celui d'avoir les deux points extrêmes au niveau de la mer..."*¹. Il s'agit bien d'un arc de méridien de la surface équipotentielle proche du niveau de la mer, on dirait aujourd'hui du géoïde. A cette époque, les altitudes précises n'existaient pas, d'où le principe des mesures:

si on suppose que la surface équipotentielle de la Terre est rigoureusement un ellipsoïde de révolution, quelle que soit l'altitude des stations, la mesure d'un angle horizontal sera égale à la valeur de l'angle à la surface de cet ellipsoïde,

à ces mesures d'angles horizontaux, il suffit d'ajouter une ou plusieurs bases proches du niveau de la mer et on obtiendra la mesure rigoureuse d'un arc de méridien par observation d'une chaîne de triangles.

C'est ce que firent Delambre et Méchain avec le bonheur et les difficultés qu'on connaît. C'est ce que feront les géodésiens jusqu'à l'apparition des mesures sur satellite.

Pourtant, on sut rapidement que la Terre n'était pas rigoureusement un ellipsoïde de révolution et Delambre lui-même écrivait, dès 1804, *"..Le système des irrégularités locales*



Bibliothèque de l'Observatoire de Paris.

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.

*explique tout, et par conséquent n'explique rien; il rend tout possible mais il rend tout incertain..."*². Malgré ce pessimisme, la méthode de la géodésie est définitivement fixée:

les mesures sur la surface topographique sont corrigées pour obtenir les valeurs qu'elles auraient eues si elles avaient été effectuées sur le géoïde, ces mesures corrigées sont reportées sur un ellipsoïde de révolution.

Les instruments s'adaptent avec l'emploi du théodolite, la mesure des altitudes se généralise et la méthode donne satisfaction. Pourquoi ce succès? Delambre a raison: les irrégularités du géoïde n'autorisent plus l'hypothèse que la verticale en tout point de station se confond avec la normale à un ellipsoïde de révolution. Il y a ce qu'on appelle des déviations de la verticale. Mais sa méthode est plus exacte qu'il semble le croire.

(1) J.-J. Levallois - Mesurer la Terre (page 61)

(2) J.-J. Levallois - Mesurer la Terre (page 81)

En effet, si on considère qu'en un point de station on détermine les azimuts d'un point visé en tournant autour de deux verticales, différentes mais proches l'une l'autre, on montre que l'écart entre ces deux azimuts est donné par la formule :

$$dA = dM \sin L - \operatorname{tg} s (\cos A \cos L dM - \sin A dL)$$

M et L longitude et latitude du point de station

dM et dL écarts des deux verticales exprimés en écarts de longitude et latitude

s et A site et azimut du point visé

L'écart d'azimut d'une direction dû à un écart des verticales dépend de deux termes : le premier est indépendant du point visé, le deuxième, en raison du facteur $\operatorname{tg} s$, reste très petit et indissociable des erreurs d'observation dans le cas de stations assez éloignées et situées sur les points hauts. L'angle horizontal entre deux directions peut donc être reporté sans correction sur le géoïde et rien n'est changé dans le calcul de la Méridienne tel qu'il fut fait par Delambre et Méchain.

Il faut aussi dire un mot des longueurs sur le géoïde car elles sont aussi touchées par ses irrégularités ; pour le calcul de la correction en fonction de l'altitude, on suppose que ces irrégularités sont faibles et, dans la zone de travail, on prend une surface régulière approchée (sphère ou ellipsoïde de révolution). Ces conditions sont réalisées en géodésie où on se borne à des cotés qui n'excèdent pas quelques dizaines de kilomètres.

On a donc pu adopter la méthode de Delambre et Méchain, mise au point au XVIII^e siècle sur l'hypothèse fautive que le géoïde était rigoureusement une surface mathématique, car, malgré les irrégularités du géoïde, on construit un modèle sur lequel la position d'un point n'est pas liée à celle du point associé sur la surface topographique mais sur lequel sont, par définition, conservés les angles horizontaux et les longueurs sur le géoïde. Ce sont ces deux dernières qualités qui ont assuré le succès de la géodésie qui, remarquons le, fait, à partir d'observations sur la surface topographique, des calculs précis sur un modèle, alors qu'on ne connaît ni la forme du géoïde ni sa position exacte par rapport à cette surface topographique. On procède par report des mesures sur le modèle.

Lorsque les mesures à partir des satellites donnèrent les coordonnées cartésiennes dans l'espace des points de la surface topographique, ce fut un grand progrès scientifique. Naturellement, il était normal d'essayer d'utiliser les coordonnées nouvelles très précises de la surface topographique pour tester la validité de la Nouvelle Triangulation de la France.

Mais, tout calcul pour passer de ces coordonnées cartésiennes aux coordonnées obtenues précédemment par la géodésie ne seront toujours que des recettes plus ou moins justes, puisqu'on sait que, en géodésie, on ne connaît pas la position mathématique sur la surface topographique du point dont le modèle donne les coordonnées. Voilà pourquoi, depuis des années, je m'insurge contre certaines idées reçues :

- non, la méthode de la géodésie traditionnelle n'est pas moins précise que les méthodes satellitaires : les résultats sont plus imprécis parce que les mesures étaient plus imprécises,
- les comparaisons générales des coordonnées de la NTF avec les coordonnées nouvelles résultent de recettes qui faussent les résultats, il faut le dire.

Puisqu'on commémore le deuxième bicentenaire de la mort de Méchain, je souhaite qu'on s'inspire de la ténacité et de la rigueur scientifique des savants de cette époque qui se sont attachés malgré les difficultés à fournir les résultats les meilleurs possibles avec les moyens dont ils disposaient. La première rigueur scientifique, c'est de parler clairement. Linné a fort justement écrit : *"La première étape de la science consiste à distinguer une chose d'une autre. Cela permet de connaître leurs traits particuliers ; mais pour que ce savoir puisse être fixé et demeurer permanent, des noms doivent être attribués et retenus."*

Chacun distingue bien les caractères particuliers des coordonnées calculées par la géodésie et de celles obtenues par projection de la surface topographique sur un ellipsoïde de révolution. Il serait donc scientifique de réunir quelques spécialistes pour attribuer des noms différents à ces deux types de coordonnées.

J'ai à maintes reprises proposé d'appeler les unes géodésiques et les autres géométriques, puisque l'étymologie de ces deux adjectifs indique qu'il s'agit de questions terrestres. D'autres propositions peuvent être formulées, les questions de vocabulaire n'ont qu'un objectif : désigner par des mots différents appropriés les choses différentes.

L'emploi de recettes pour comparer les nouvelles coordonnées aux anciennes n'est pas en soi très répréhensible : on fait ce qu'on peut. Mais en l'occurrence, il est facile de faire mieux. L'impossibilité de recettes exactes vient de la nature différente des coordonnées à comparer ; il suffit donc de calculer des coordonnées de même type. Les observations de la NTF ne permettent pas d'obtenir des coordonnées cartésiennes dans l'espace. Mais, les observations GPS peuvent facilement être traitées par la méthode de la géodésie pour obtenir des coordonnées du type de celles de la NTF. Les moyens de calcul sont tels actuellement que la compensation géodésique des observations GPS, par exemple du réseau de 1^{er} ordre, est une tâche sans commune mesure avec la somme des calculs exécutés par Delambre et Méchain. On disposerait alors de deux systèmes géodésiques de même nature dont on sait qu'ils sont facilement comparables par la méthode préconisée par Monsieur Dufour.

Pourquoi employer des recettes alors qu'on peut utiliser une méthode plus rigoureuse ?

Le meilleur hommage à rendre aux savants français, qui ont ouvert la voie du développement de la géodésie, serait que les "Journées Méchain" aboutissent à une approche scientifique des problèmes créés par le changement de méthode de calcul des coordonnées de points à la surface de la Terre. ●

- les angles en Espagne (Fig. 1) et il commence les observations astronomiques. Il a le projet d'étendre les triangles jusqu'à l'île de Cabrera au sud de Majorque, pour avoir un arc de 12° depuis la latitude 39° jusqu'à 51° d'où milieu à 45°.

Interruption du travail : Après l'exécution du roi Louis XVI, la guerre est déclarée entre la France et l'Espagne et Méchain est empêché de repasser les Pyrénées. Il étudie des triangles pour aller dans les îles, mais il a un accident qui l'immobilise deux mois. Chaix continue ce travail. Finalement, Méchain décide de partir lorsqu'il obtient un passeport, en 1794, pour se rendre en Italie. Il passe à Livourne puis Gênes d'où il gagne Marseille et enfin Perpignan en 1795.

Le retour en France 1795-96

■ Les difficultés qui retardent Méchain

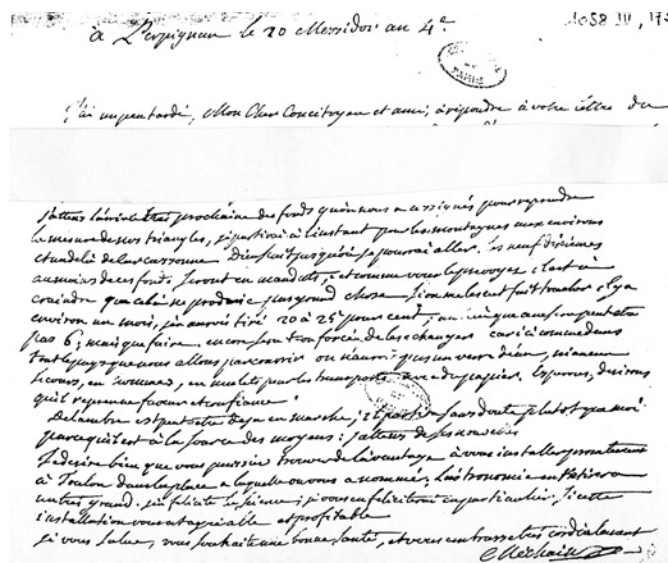
Récit de Lalande dans *Histoire de l'Astronomie pour 1795* (d'après des lettres de Méchain) : "Le C. en Méchain, après avoir été, pour ainsi dire, prisonnier en Espagne et en Italie, revint enfin du côté de Perpignan, pour continuer les triangles qu'il avait faits depuis Barcelone : mais les difficultés le désolaient. Il nous écrivait, le 8 brumaire, du pic Bugarach, où l'on ne gravit qu'au risque de la vie. Il avait porté une tente pour y coucher : mais le pic a tout au plus l'étendue nécessaire pour les étais du signal ; il n'y a rien au-dessous que des précipices [...] Cependant il n'y a pas d'autre endroit où l'on puisse avoir un signal qui corresponde à quatre triangles principaux, et d'où l'on puisse voir six signaux différents. Il était donc obligé d'y gravir tous les jours..."

Autres difficultés, d'après Méchain, lettre à Flaugergues, de Perpignan le 20 Messidor an IV ou 8 juillet 1796 : "J'attends l'arrivée très prochaine de fonds qu'on nous a assignés pour reprendre la mesure de nos triangles. Je partirai à l'instant pour les montagnes aux environs et au delà de Carcassonne. Dieu sait jusqu'où je pourrai aller, les neuf dixièmes au moins de ces fonds seront en mandats ; et comme vous le prévoyez il est à craindre que cela ne produise pas grand chose. Si on me les eut fait toucher il y a environ un mois, j'en aurais tiré 20 à 25 pour cent ; au lieu que ce ne peut être pas 6 ; mais que faire. Encore sera-t-on forcé de les échanger car ici comme dans tout le pays que nous allons parcourir on n'aurait pas un verre d'eau, ni aucun secours, en hommes, en mulets pour les transports avec du papier..."

Deuxième expédition 1803-1804

■ Les premières opérations en Catalogne

Méchain est parti le 26 avril 1803 pour l'Espagne, pour continuer la méridienne jusqu'à la latitude 39° (îles Baléares). Il est accompagné de M. le Chevalier, Augustin Méchain son fils cadet, Dezauche fils. De plus, Chaix s'est joint à lui. Lalande, secrétaire du Bureau des longitudes, a sans doute été chargé des préparatifs, car il écrit dans son *Histoire de l'Astronomie pour 1803* : "Je lui ai remis un excellent cercle de 19 pouces, fait par M. Lenoir ; on y a ajouté des lunettes à grande ouver-



Extrait de la lettre de Méchain du 20 Messidor an IV. Archives de l'Observatoire de Paris.

ture ; il y a douze grands réverbères, et il est en état de mesurer ses triangles sur Majorque et Ibiza, quoiqu'à 93 milles de distance de la côte de Catalogne, dans les mois de janvier, février, mars qui sont les plus favorables à ces observations ; en attendant il a formé six triangles subsidiaires entre Barcelone et Tortose, comme on le voit en détail dans le Moniteur du 15 novembre. [...] il était le 27 octobre, au plus élevé des pics du Montserrat, pour son dernier triangle. Le 13 novembre, tout était fini. [...] Enfin, le 8 janvier, il est parti pour Ibiza, où il va commencer..."

■ Fin de l'expédition, mort de Méchain

A la fin de l'été 1804, Méchain est atteint du paludisme mais il continue son travail sur la montagne. Lorsqu'il descend à Castellon de la Plana, il est trop tard et il meurt le 20 septembre 1804. ●

Références

Les lettres de Méchain à Flaugergues sont dans les Archives de l'Observatoire de Paris, ms 1058 III.

Honoré Flaugergues (1755-1830), astronome et juge de paix à Viviers (Ardèche), a été nommé associé non résidant de l'Institut national en 1796.

ABSTRACT

Having in charge the measurements of the Méridienne de France from Barcelona to Rodez, Méchain left Paris in June 1792. His work is quickly made in Spain. But his return to France is delayed by the war. The works began again in 1795 and will be only achieved in 1798. The proposal to enlarge the measures up to Baleares Islands is decided in 1802. Méchain departed in 1803 : he died in 1804, on september 20, his work being not completed. The events are presented in using letters written by Méchain.

Les progrès des méthodes géodésiques : instruments ou moyens de calcul ?

■ Michel KASSER

Un retour en arrière est intéressant à mener en matière de Géodésie, afin d'identifier comment se sont manifestés les progrès de cette science. Tout d'abord on peut recenser les raisons qui ont pu exister pour que des évolutions se produisent. Ensuite, on voit aisément que les progrès ont été extrêmement irréguliers, et qu'entre quelques innovations majeures se sont généralement écoulées de très longues périodes où les évolutions ont été soit pratiquement indiscernables, soit du domaine du détail. Et enfin dans cette discipline la place des calculs est d'importance majeure, les grands scientifiques de ce domaine ayant été, d'abord, d'excellents calculateurs, et de ce fait ont beaucoup contribué aux progrès des mathématiques.

La Géodésie, pourquoi ?

L'ensemble Géodésie, Topographie et Astronomie a longtemps utilisé un capital de compétences assez voisines, et donc a reposé sur les mêmes personnalités scientifiques. Les attentes des différentes sociétés vis-à-vis de la Géodésie, et donc les moteurs de ses progrès, ont pratiquement toujours été issus des applications suivantes : les cadastres, le génie civil, et les besoins militaires.

L'activité cadastrale, c'est-à-dire l'enregistrement des différentes natures de droits sur le sol, est la base d'une bonne coexistence au sein de toute société. La "paix foncière", obtenue lorsque chacun peut connaître ses droits et ceux des autres, et les accepte, a toujours été la base première de la paix sociale. Et bien évidemment, de tels enregistrements ne se font pas sans un ensemble de mesures géométriques locales (c'est l'étymologie même du mot qui le rappelle), qui elles-mêmes exigent des éléments de géodésie. Un excellent exemple est donné par l'activité annuelle des géomètres dans l'ancienne Égypte, qui après chaque crue du Nil, étaient chargés d'établir de nouveau les limites de chaque parcelle, les limites de l'année précédente étant devenues invisibles sous les couches de limon déposées durant l'inondation. On retrouve également cette activité dans toutes les redistributions de terres, issues par exemple des activités de colonisation. C'est ainsi que les centuriations romaines (terres distribuées aux anciens combattants) sont encore bien visibles dans certaines zones du paysage de Provence.

Le domaine du génie civil (pour de grands ouvrages) a aussi eu de fortes exigences vers la géodésie, et certains ouvrages hydrauliques ont représenté de véritables prouesses compte tenu des instruments disponibles, et ils sont bien connus (p. ex. tunnel d'adduction d'eau percé à Samos par Eupalinos de

Mégare, pont du Gard...). Et les grands ouvrages ont été essentiellement des manifestations issues du pouvoir, militaire ou civil.

Enfin les besoins militaires ont été eux-mêmes un moteur devenu de plus en plus puissant au fil des siècles, pour faire évoluer ce domaine scientifique. C'est ainsi que Napoléon I^{er}, pourtant à l'origine du système cadastral français moderne, en a fortement retardé le démarrage en mobilisant toutes les capacités françaises disponibles en géodésie et en cartographie pour l'assister dans les guerres du début du XIX^e siècle. Et le GPS actuel, si nécessaire à nos travaux modernes, est un dispositif purement militaire...

Un superbe exemple des interactions entre le pouvoir et la Géodésie a été donné par la France au XVII^e siècle, lors de la création de l'Académie des sciences : parmi les tâches les plus importantes confiées aux nouveaux académiciens, on trouve la mission de faire venir de l'eau en quantité au château de Versailles. Les premiers grands travaux de nivellement sont issus de cette mission ! On note donc que la Géodésie est depuis longtemps un des outils techniques du pouvoir politique, et ne peut pas bien se comprendre en dehors de cette analyse.

Les évolutions technologiques

Les grandes évolutions de la Géodésie sont toutes liées à la disponibilité de nouvelles technologies, dont subitement une personnalité s'est aperçue qu'elles permettaient de profondes améliorations. De ce fait, ces évolutions se sont traduites par de grands à-coups, entre lesquels les évolutions ont soit été inexistantes, soit simplement à la marge par de petites trouvailles permettant une amélioration de l'ergonomie, du coût ou de la rapidité du travail. Au cours des trois derniers millénaires, qui seuls nous ont laissé des traces d'activités en matière de géodésie, nous pouvons identifier des phases majeures dans les évolutions technologiques : Le travail du métal de l'école d'Alexandrie (II^e et I^{er} siècles av. JC), le travail du verre (Pays-Bas, Venise) à la fin du XV^e et début du XVI^e siècle, puis développements mondiaux de l'électronique au XX^e siècle.

L'école d'Alexandrie (II^e et I^{er} siècles av. JC) a vu des développements extraordinaires dans le travail du métal, et dans la connaissance des lois de la mécanique. Le premier vrai théodolite, appelé "dioptré", apparaît à cette époque, conçu par Héron d'Alexandrie. La finesse du travail



Le "dioptré", de Héron d'Alexandrie, reconstitution exposée au Congrès de la FIG à Athènes, mai 2004.

© M. Kasser

du bronze permet des graduations angulaires d'une précision suffisante (la limitation de précision est due au pointé dans l'alidade à pinnules et à l'œil humain, soit de l'ordre de 1 milliradian environ). Beaucoup d'autres instruments sont créés à cette époque, sphère armillaire, compteurs de tours de roue pour mesurer des distances...

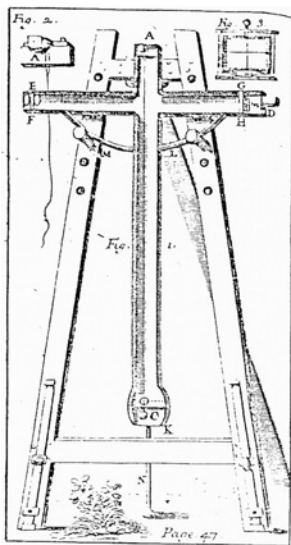
Travail du verre : C'est au XV^e que, simultanément, ont été obtenues des coulées de verre ayant une bonne homogénéité d'indice et quasiment pas de défauts, et que les techniques de polissage de surfaces sphériques ont permis d'atteindre des qualités satisfaisantes. Les premières lentilles étaient évidemment destinées à aider la vue (il y avait certainement à cette époque autant de personnes ayant une mauvaise vue que maintenant), et assez rapidement a été conçue la lunette d'approche, sans doute vers 1590, avec des applications militaires et nautiques évidentes. Deux scientifiques de tout premier plan marquent cette étape majeure, Galilée qui vers 1603 développe une grande lunette pour mieux observer le ciel et comprendre les lois de l'Astronomie et qui est bien connu (lunette = collecte d'un flux lumineux beaucoup plus important, amélioration considérable du pouvoir séparateur de l'œil). Ensuite et beaucoup moins bien connu, l'abbé Picard, quelques dizaines d'années plus tard, construit une variante de lunette avec un réticule, ce qui permet de pointer une direction avec une précision bien meilleure qu'avec les pinnules employées jusque là. En très peu de temps, c'est d'un facteur de plusieurs dizaines que s'améliore la précision des mesures, en astronomie comme en géodésie.

On ne détaillera pas les progrès récents qui sont apparus avec l'électronique au milieu du XX^e siècle, avec le tube à vide puis les semi-conducteurs, en grande partie à cause de la Deuxième Guerre mondiale. C'est là qu'est le troisième choc technologique évident, qui entre 1960 et 2000 a fait gagner un facteur d'au moins 1000 dans la précision de la géodésie.

Mais entre ces périodes, que s'est-il passé ? En fait, assez peu de choses, des progrès réguliers dans la facture des instruments qui a permis d'en réduire les coûts et la facilité d'emploi. J.-J. Levallois, reprenant en 1984 les mesures effectuées par Picard pour sa mesure du méridien de Paris trois siècles auparavant, a montré que la précision de ses mesures était sensiblement égale à celle des

mesures effectuées pour la triangulation française encore employées au milieu du XX^e siècle. Ce sont les progrès des calculs qui seuls avaient fait la différence. Des constatations presque équivalentes sont d'ailleurs possibles avec le nivellement sur cette même période de trois siècles.

Le niveau de précision de Picard (extrait de son *Traité du Nivellement*, Paris, 1684). Dans le coin supérieur droit, le dessin présente le réticule, invention majeure exposée à cette occasion.



La place historique des calculs dans la Géodésie

La Géodésie a toujours exigé des calculs numériques considérables, et l'exemple précédent sur les calculs de Picard montre clairement que tant que les calculs se sont fait à la main, ils ont représenté une véritable limitation. D'ailleurs, les personnalités scientifiques de ce secteur ont toutes été, à la base, d'excellents calculateurs. Et plusieurs d'entre elles ont fait faire de gros progrès aux mathématiques, en grande partie pour permettre de traiter de façon plus efficace ces calculs : Maupertuis au milieu du XVIII^e siècle pour la mesure de l'aplatissement terrestre, plus tard Legendre pour la triangulation de la Méridienne de France de Méchain et Delambre, Choleski au début du XX^e pour la géodésie de Tunisie. Cet obstacle n'a disparu que depuis l'avènement des ordinateurs, et de nombreux choix techniques faits autrefois ne reposaient que sur un objectif lié aux calculs, soit pour retrouver plus facilement une faute (de lecture, de retranscription...), soit pour avoir des calculs plus faciles à effectuer. Un exemple évident peut être trouvé dans le choix d'une hiérarchisation en ordres successifs des triangulations, procédé utilisé systématiquement autrefois, alors qu'aujourd'hui on n'hésiterait plus devant un calcul en bloc par moindres carrés de toute la triangulation française : ces ordres successifs ont été rendus nécessaires à l'époque pour que les calculs soient raisonnablement faciles à effectuer. A titre d'illustration, on peut rappeler que dans les années 1960 à l'IGN, la compensation d'un bloc de dix points triangulés, effectuée à la main, prenait plusieurs mois de travail à l'opérateur, ce qui donnait un calendrier fort simple : en été, on observe, en hiver, on calcule...

Conclusion : la Géodésie et ses limites physiques

Les évolutions très rapides des dernières décennies ont conduit à une amélioration extraordinaire de la Géodésie, mais nous nous interrogeons volontiers maintenant sur la possibilité de poursuivre cette évolution. La référence mondiale a une précision de l'ordre de 1 cm. La précision du millimètre sur des coordonnées est sans doute atteignable en terme de technologie de mesures et de calculs. Mais a-t-elle un vrai sens physique à la surface de la Terre, où rien n'est réellement rigide, et où les effets thermiques, les battements de nappes phréatiques, les effets barométriques... induisent des effets perturbateurs très larges ? Le point soulevé ici n'est pas de prédire l'avenir, mais trois siècles après Méchain, il n'est pas certain que la précision de positionnement à l'échelle de la Terre ait encore de gros progrès en vue. Les progrès se feront donc sur la base de concepts nouveaux : une connaissance approfondie du champ de pesanteur terrestre, par exemple ? ●

ABSTRACT

The progress of the geodesic methods since the antiquity did not happen in a regular way. One may note a few rare major technological ruptures permitting every time the set up of a new measure process, followed by innumerable small improvements to the margin in the decades or the centuries that have followed. Otherwise, the major importance of the mastery of numeric calculations, obviously more and more forgotten today, is to be put in parallel with the instrumental improvements.

Métrologie de la Terre, systèmes de référence : aspects historiques et modernes

■ Géraldine BOURDA - Nicole CAPITAINÉ

Dans la première partie de cet exposé, on évoque les campagnes d'observations géodésiques et astronomiques des XVII^e et XVIII^e siècles liées au méridien de Paris, ainsi que les progrès scientifiques majeurs qu'elles ont apportés. Dans la deuxième partie, on présente le prolongement actuel de tels travaux par les déterminations relatives aux systèmes de référence, à l'orientation de la Terre dans l'espace et au champ de gravité terrestre à l'aide des méthodes modernes d'astrométrie et de géodésie spatiale.

■ MOTS CLES

Systèmes de référence, méridien, rotation terrestre, champ de gravité, géodésie spatiale.

Aspects historiques

Les campagnes d'observations géodésiques et astronomiques des XVII^e et XVIII^e siècles ont apporté des progrès scientifiques majeurs relatifs à la "métrologie" de la Terre. Le méridien de Paris, axe de symétrie du bâtiment de l'Observatoire de Paris construit en 1667, a été tout naturellement choisi comme méridien origine de cet ensemble de mesures.

■ Mesure de la "taille de la Terre" par Picard au XVII^e siècle

Au XVII^e siècle, les opérations de mesure de méridien par l'Académie Royale des Sciences ont eu deux objectifs : une meilleure cartographie de la France et la détermination de la "taille" de la Terre que l'on supposait sphérique.

La mesure d'un arc de méridien consiste à déterminer la distance terrestre qu'il faut parcourir le long du méridien pour que la latitude augmente de l'amplitude de cet arc. L'abbé Picard fut l'initiateur d'une méthode de mesure basée sur une triangulation géodésique rigoureuse. La mesure de méridien qu'il effectue entre Sourdon (près d'Amiens) et Malvoisine (au Sud de Paris) utilise de nouveaux instruments mis au point par lui-même et de nouvelles horloges à pendule de Huygens. Son ouvrage "La mesure de la Terre" donne, en 1671, une valeur du degré de méridien qui fournit la première mesure précise du rayon de la Terre. Cette mesure, associée à une campagne de

détermination de longitudes astronomiques par rapport au méridien de Paris permit la réalisation de la première Carte de France rapportée à ce méridien rectifiant de façon sensible les côtes de France. Le prolongement des mesures de l'arc de Picard par J.-D. Cassini, la Hire et Cassini II jusqu'aux Pyrénées, puis jusqu'à Dunkerque, fournit, en 1720, la première "Méridienne de France".

■ Mesure de la "forme" de la Terre au XVIII^e siècle

Au milieu du XVIII^e siècle les mesures de méridien ont eu pour principal objectif la mesure de la "forme" de la Terre, c'est à dire de son aplatissement.

En effet, les prévisions théoriques de Newton et Huygens, ainsi que les observations de Richer de la longueur du pendule battant la seconde à l'équateur prévoyaient un aplatissement de la Terre aux pôles. Or, Cassini II en comparant les mesures d'arc de méridien au nord et au sud de la Méridienne de France concluait dans "De la grandeur et de la figure de la Terre", en 1720, à un allongement de la Terre aux pôles. Un long débat commence alors au sein de l'Académie Royale des Sciences qui décide, pour trancher, l'organisation de campagnes de mesures d'arcs de méridien en Laponie (1736-1737) et au Pérou (1735-1745). Ces missions, ainsi que la réalisation, en 1740, de "La Méridienne vérifiée" par de nouvelles mesures plus précises de Lacaille, Cassini III et Maraldi II, ont définitivement permis de conclure à l'aplatissement de la Terre aux pôles et ont fourni une valeur réaliste de ce paramètre.

■ Mesure du "mètre", dix-millionième partie du quart du méridien terrestre

A l'époque de la Révolution Française, les nouvelles opérations de mesure de méridien ont pour objectif la définition d'une nouvelle unité de longueur, le mètre.

En effet, à la suite des cahiers de doléances envoyés aux assemblées, l'Assemblée nationale ordonne par le décret du 8 mai 1790, la réforme des mesures en France, puis adopte, par le décret du 30 mars 1791, suivant le choix de l'Académie des Sciences, la grandeur du méridien terrestre comme base du nouveau système décimal de mesures. Les académiciens Delambre et Méchain sont chargés des nouvelles mesures d'arc du méridien de Paris, entre Dunkerque et Barcelone ; ils mènent ces opérations, de 1792 à 1798, avec une très grande rigueur scientifique et en utilisant une instrumenta-

■ ■ ■ tion entièrement nouvelle. En 1793, puis 1795, la Convention adopte le système métrique et confie sa réalisation à des commissions successives, impliquant l'Académie des Sciences, puis l'Institut et le Bureau des longitudes dès leur création en 1795. La loi du 10 décembre 1799, sanctionne définitivement le système métrique des poids et mesures et définit le mètre comme "la dix millionième partie de l'arc de méridien terrestre, compris entre le pôle Nord et l'équateur". La longueur du mètre "définitif" est fixée par le résultat des mesures de Delambre et Méchain en référence à la toise du Pérou.

■ Evolution des références relatives à la forme de la Terre et au positionnement

Le méridien de Paris a été le premier méridien fondamental pour une cartographie précise à l'échelle d'un pays aussi étendu que la France. Toutefois, c'est le méridien de Greenwich qui a été adopté en 1884 comme méridien international par la conférence internationale de Washington fixant le système des fuseaux horaires. Actuellement, les techniques modernes d'observation permettent la construction de systèmes de référence terrestres avec une précision centimétrique à l'échelle globale. L'ITRS, système de référence terrestre adopté au niveau international, est réalisé par le "Service international de la rotation de la Terre et des systèmes de référence" (IERS), auquel participent l'Observatoire de Paris, et l'Institut Géographique National (IGN). Dans ce système, le méridien origine, déterminé statistiquement par le traitement de l'ensemble de mesures d'une centaine de stations, se trouve à environ 100 mètres du méridien de Greenwich.

Par ailleurs, la première approximation d'une Terre sphérique, au XVII^e siècle, exigeait la détermination d'un seul paramètre, le rayon de la Terre. La deuxième approximation d'une Terre sphéroïdale, au XVIII^e comme au XIX^e siècle, exigeait la détermination de deux paramètres: le rayon équatorial et l'aplatissement de l'ellipsoïde. Les méthodes actuelles de géodésie spatiale permettent une détermination globale de la forme réelle de la Terre (ou géoïde) exigeant plusieurs milliers de paramètres. Le Groupe de Recherches en Géodésie spatiale (GRGS), auquel appartiennent l'Observatoire de Paris, le Bureau des longitudes,

l'IGN et des équipes du CNES, est actuellement l'un des fournisseurs du géoïde terrestre le plus précis.

Aspects modernes

Les systèmes de référence terrestre (ITRS, International Terrestrial Reference System) et céleste (ICRS, International Celestial Reference System) sont des notions théoriques dont les représentations pratiques sont les repères terrestre (ITRF, International Terrestrial Reference Frame) et céleste (ICRF, International Celestial Reference Frame). Le repère céleste est caractérisé par les coordonnées d'un ensemble de quasars (quasi-stellar objects), objets extragalactiques très lointains dont les directions peuvent être considérées comme fixes dans l'espace. Le repère terrestre est représenté par un ensemble de positions et vitesses de stations situées sur la croûte terrestre.

■ Détermination des systèmes de référence et de la rotation terrestre

L'orientation du système terrestre par rapport au système céleste est fonction de la rotation terrestre dont l'observation est coordonnée au niveau mondial par l'IERS à partir des mesures obtenues par différentes techniques de géodésie spatiale. La connaissance de la rotation de la Terre est indispensable pour traiter les observations astrométriques ou positionner les satellites artificiels autour de la Terre. Cette rotation est étudiée sous trois aspects: (1) les variations de la vitesse de rotation, (2) le mouvement de l'axe de rotation dans l'espace (appelée précession et nutation) et (3) le mouvement de l'axe de rotation dans la Terre (appelé mouvement du pôle). Pour cela on utilise les cinq paramètres d'orientation terrestre (EOP, Earth Orientation Parameters), comprenant: (1) l'angle de rotation (directement lié à UT1), ou bien l'écart (noté LOD) de la longueur du jour par rapport à la valeur nominale de 86400 secondes (Figure 1), (2) les écarts dpsi et deps (respectivement en longitude et en obliquité) entre modèles de précession-nutation et observations (Figure 2), et (3) les composantes équatoriales x_p et y_p du mouvement du pôle de rotation dans la Terre (Figure 3). Ces

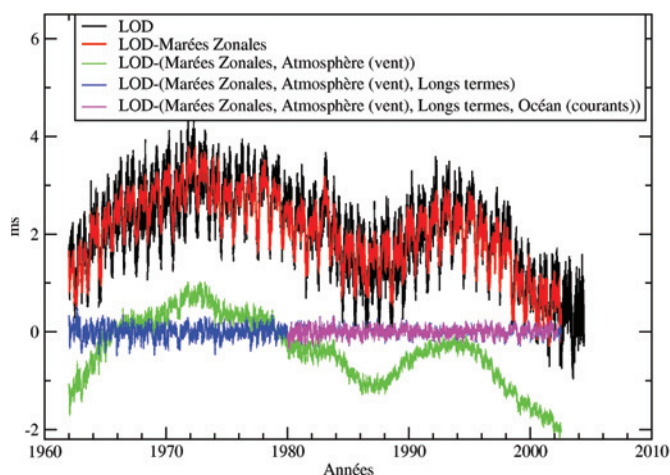


Figure 1 : longueur du jour (source IERS).

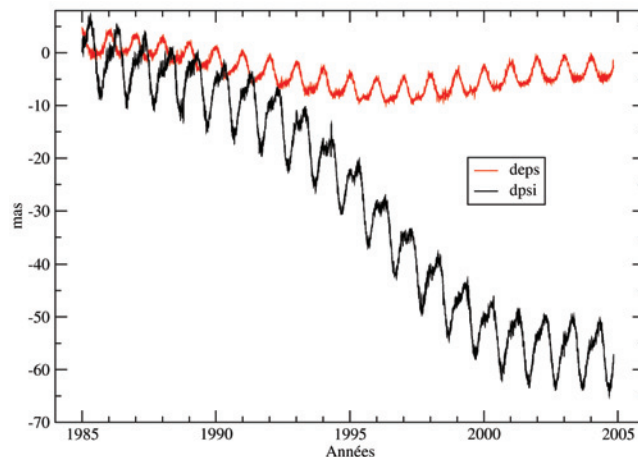


Figure 2 : écarts dpsi et deps au pôle céleste, par rapport au modèle IAU 1980 (source IERS).

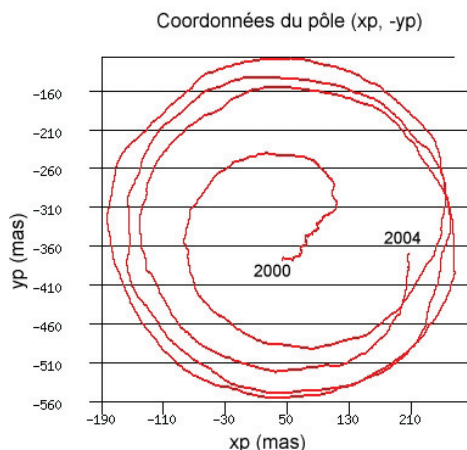


Figure 3 : mouvement du pôle (ou polhodie) entre 2000 et 2004 (source IERS).

paramètres sont déterminés par l'IERS grâce aux observations de géodésie spatiale. La télémétrie laser sur satellite (respectivement sur la Lune) consiste en l'envoi d'une impulsion laser depuis une station terrestre, qui est réfléchi vers cette station par des réflecteurs sur le satellite (respectivement sur la Lune). Le système GPS (Global Positioning System) est une constellation de 24 satellites en orbite autour de la Terre, qui envoient des signaux dans le domaine radio. Le système DORIS (Détermination d'orbites et de Radiopositionnement Intégrés par Satellite) consiste en un ensemble de balises terrestres émettant des signaux sur deux fréquences dans le domaine radio vers des satellites équipés de récepteurs. Enfin, le système VLBI (Very Long Baseline Interferometry) utilise un ensemble d'antennes radio-astronomiques terrestres qui reçoivent les signaux de quasars, le même signal reçu en deux antennes distantes de plusieurs milliers de kilomètres étant ensuite corrélé (Figure 4). Les mesures ainsi obtenues par ces différentes techniques contribuent à la réalisation des systèmes de réfé-

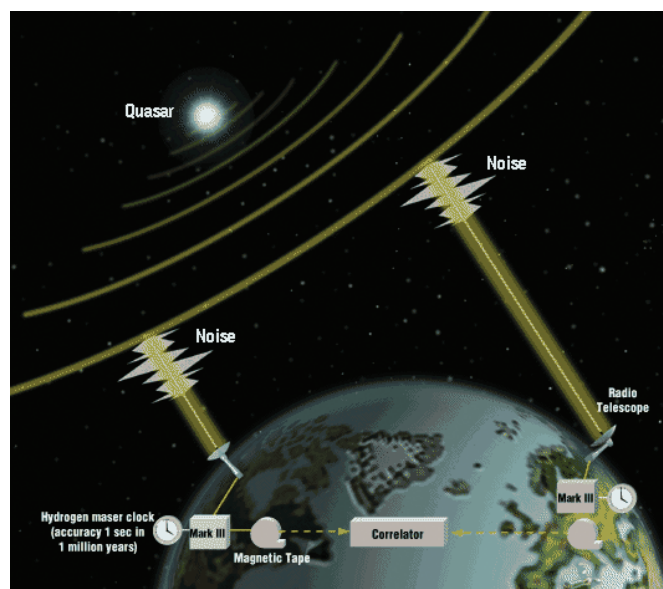


Figure 4 : méthode de détermination de l'orientation terrestre par le VLBI (source IVS).

rence terrestres et célestes et à la détermination des EOP ; les observations satellitaires sont particulièrement adaptées à la détermination du repère terrestre et du mouvement du pôle, tandis que les observations VLBI permettent de déterminer avec une très grande précision le repère céleste ICRF et les variations en vitesse et direction de l'axe de rotation de la Terre par rapport à ce repère. Le modèle de précession-nutation UAI 2000, déduit du VLBI et adopté par l'UAI en 2000, a une précision meilleure que 0.001".

■ Détermination du géoïde

L'étude de la forme de la Terre correspond de nos jours à l'étude du "géoïde". Le géoïde terrestre (Figure 5) est une surface équipotentielle du champ de pesanteur (somme du champ de gravité de la Terre et de l'accélération due à la rotation terrestre), coïncidant avec le niveau moyen des mers et se prolongeant sous les continents ; en d'autres termes, la force de pesanteur est partout normale au géoïde. La détermination du géoïde utilise les techniques de géodésie satellitaire par télémétrie laser et systèmes GPS ou DORIS. Plus précisément, la comparaison de ces observations avec une modélisation de l'orbite des satellites artificiels prenant en compte l'ensemble des forces agissant sur les satellites permet d'ajuster les paramètres du modèle.

■ Champ de gravité terrestre statique et variable: mesures et modélisations

Le champ de gravité terrestre caractérise la répartition des masses à l'intérieur de la Terre. La force de gravité dérive du potentiel de gravité que l'on modélise sur la sphère terrestre suivant la base des harmoniques sphériques. Il est donc déterminé par un ensemble de coefficients, appelés coefficients de Stokes, dépendant d'un degré et d'un ordre. Le coefficient de degré 2 et d'ordre 0 (C_{20}) caractérise l'aplatissement terrestre. Ce sont ces coefficients que l'on cherche à déterminer grâce aux techniques de géodésie spatiale, afin d'obtenir le champ de gravité terrestre.

La méthode de télémétrie laser sur satellite permet d'obtenir les variations temporelles de certains coefficients harmoniques sphériques, grâce à la détermination de la précession du nœud ascendant de l'orbite du satellite. Cependant, l'accélération ainsi induite du nœud dépend d'une combinaison linéaire des variations des coefficients de Stokes qui ne peuvent être décorrélées que par l'utilisation de satellites ayant des orbites de caractéristiques variées. Une nouvelle possibilité de détermination du champ de gravité variable est basée sur l'utilisation des données de la mission GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment), lancée en mars 2002 (Figure 6). Deux satellites sont sur la même orbite basse (~ 400 km) afin de mieux mesurer les coefficients du champ de gravité et sont équipés d'accéléromètres embarqués mesurant avec précision et en temps réel les forces surfaciques (dus par exemple au frottement atmosphérique). De plus, une mesure inter-satellite de grande précision (10 μ m) nous permet d'obtenir la variation de distance entre les satellites co-orbitaux, et ainsi de déduire les variations de masses (i.e. de gravité) sous-jacentes.

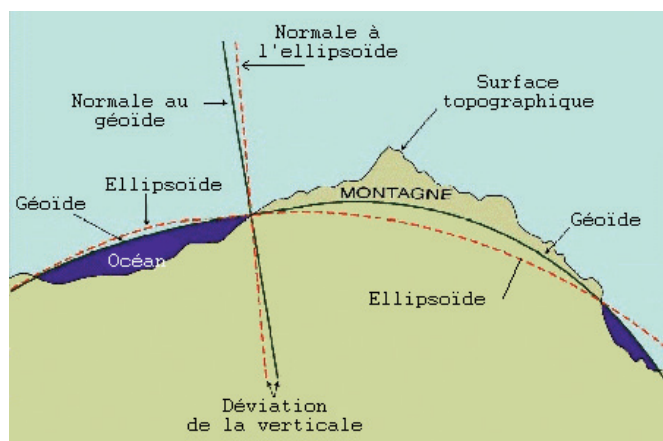


Figure 5 : géoïde terrestre (source SHOM).

■ Détermination de l'aplatissement terrestre

La Terre étant un corps déformable en rotation, elle comporte un bourrelet équatorial dû à la force centrifuge, correspondant à un aplatissement aux pôles. Cet aplatissement a tendance à diminuer, autrement dit la Terre tend à être moins aplatie, ce qui s'explique par le rebond post-glaciaire, réaction a posteriori de la Terre (anélastique) à un effet de surcharge dû à une calotte glaciaire polaire qui a diminué depuis la période glaciaire. Ceci montre l'intérêt de mesurer les variations de cet aplatissement grâce aux mesures astrométriques ou bien de géodésie spatiale. La détermination astrométrique par VLBI de la précession terrestre engendrée par le couple exercé par la Lune, le Soleil (et dans une moindre mesure les planètes)

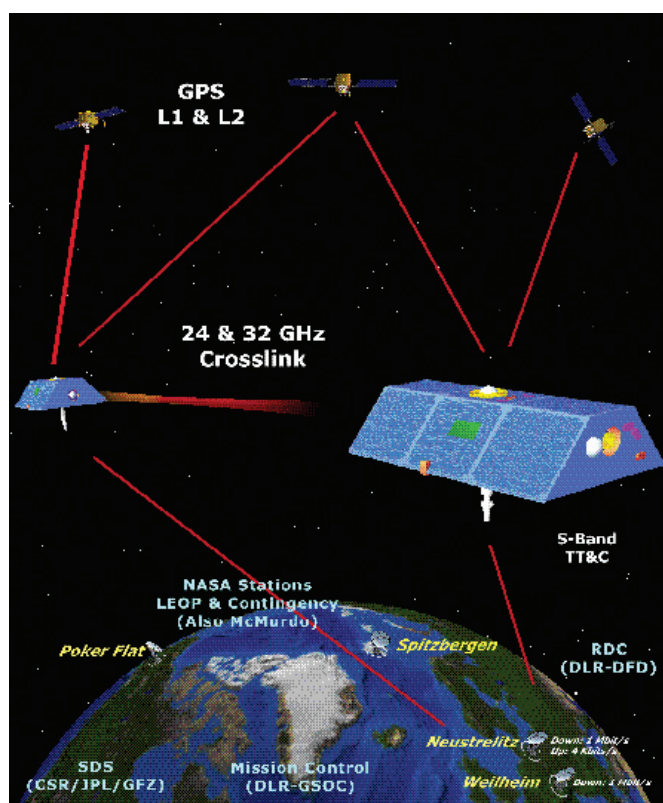


Figure 6 : configuration de vol des deux satellites de la mission GRACE (source GFZ).

sur le bourrelet équatorial, est directement liée au paramètre $H = (C-A)/C$ d'ellipticité dynamique de la Terre (A et C étant les moments d'inertie respectivement équatorial et polaire). D'autre part, les mesures par géodésie spatiale du champ de gravité terrestre donnent les coefficients harmoniques sphériques du potentiel gravitationnel, dont celui de degré 2 et d'ordre 0, $J_2 = -C_{20}$, qui est relié (i) à l'aplatissement dynamique H par la relation : $C/(MR_e^2) = J_2/H$ (M et R_e étant respectivement la masse et le rayon équatorial terrestres) et (ii) à l'aplatissement géométrique ($f = (R_e - R_p)/R_p$; R_p étant le rayon polaire terrestre) par la relation $J_2 = (2/3) f - (1/3)m$, m étant le rapport de la force centrifuge à la force de gravité, à l'équateur. Les valeurs admises actuellement sont telles que : $H = 0.0032737949 = 1/305.455910$, correspondant au modèle IAU 2000 de précession, $1/f = 298.25642 \pm 0.00001$ (IAG 1999) et $(dJ_2/dt)/J_2 = -2.7774 \times 10^{-6}$, valeurs déduites de la géodésie spatiale.

Conclusion

Dans la continuité des travaux menés depuis le 17^e siècle, les techniques actuelles de géodésie spatiale contribuent, avec la technique VLBI, à la détermination des systèmes de référence et à celle de la forme réelle de la Terre. Une grande avancée scientifique a été faite ces dernières années dans ce domaine, d'une part grâce au modèle de précession-nutation de précision meilleure que $0.001''$ fourni par le VLBI et d'autre part, grâce à la détermination précise du champ de gravité statique et variable par la géodésie spatiale, concourant ainsi à une meilleure détermination de l'aplatissement de la Terre. Les missions actuelles telles que GRACE, ainsi que les missions futures telles que GOCE, devraient mener à des résolutions spatiale et temporelle encore meilleure des modèles géophysiques, notamment au niveau des océans. ●

Contacts

Géraldine BOURDA, Nicole CAPITAINÉ,
Observatoire de Paris, SYRTE/UMR 8630
61, avenue de l'Observatoire, 75014 Paris
Tél. : 0140512211 - Fax : 0140512291
Email : Geraldine.Bourda@obspm.fr

ABSTRACT

Key-words: Reference systems, meridian, Earth rotation, gravity field, space geodesy.

In the first part of this presentation, we recall the geodetic and astrometric campaigns which were organized during the 17th and 18th centuries associated with Paris meridian, as well as the major scientific progresses they induced. In the second part, we discuss the current development in this field, especially for the determination of reference systems, Earth's orientation, and Earth's gravity field, thanks to modern astrometric and space geodetic techniques.

Métrologie de fréquence dans le domaine optique à l'Observatoire de Paris

■ Giovanni Daniele ROVERA

A l'occasion du bicentenaire de la mort de Pierre Méchain, qui est parmi les pères du mètre, un juste hommage me conduit à présenter les dernières techniques qui ont été développées pour la réalisation pratique du mètre moderne. Cette partie technique, qui s'éloigne beaucoup des thèmes habituels de la revue, sera précédée d'une introduction historique expliquant le rôle que les astronomes de l'Observatoire de Paris ont joué, et continuent à jouer, dans la définition et la réalisation du mètre. L'interprétation de l'histoire n'est peut-être pas très rigoureuse, car mon domaine d'activité est la réalisation d'expériences physiques et je manque d'expérience dans la manipulation des données historiques.

Adater de la Conférence Générale des Poids et des Mesures de 1983, le mètre est défini comme la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une fraction précise de seconde. La raison de ce dernier changement, comme pour les changements précédents d'unité, provient du fait que, dans la limite du possible, les unités doivent être basées sur des quantités universellement accessibles qui donnent les meilleures garanties de stabilité et de reproductibilité. Or, si cette formulation convient bien si l'on considère des distances astronomiques pour lesquelles le temps de parcours est mesurable en secondes ou en années, elle n'est pas du tout pratique pour des distances à échelle humaine comme l'est le mètre. Pour la réalisation pratique de l'unité de longueur nous sommes donc obligés de considérer la nature ondulatoire de la lumière. En effet, si l'on prend en considération une radiation monochromatique, la distance entre deux fronts d'onde successifs est parcourue (dans le vide) exactement en une période de l'oscillation de la radiation. En pratique l'on peut matérialiser la position des fronts d'onde successifs avec un interféromètre, et donc réaliser une règle avec des traits espacés exactement d'une longueur d'onde. Nous arrivons donc à la formule qui est le départ de notre histoire: $\lambda = c/v$. (1)
La longueur d'onde λ d'une radiation électromagnétique est le rapport entre la vitesse de la lumière c et sa fréquence v .

L'histoire

■ Quelques dates à propos de la vitesse de la lumière c

- 1676 Olaf Roemer met en évidence pour la première fois la vitesse de la lumière, à l'Observatoire de Paris, utilisant les satellites de Jupiter [1].

- 1728 James Bradley améliore le résultat utilisant une autre technique basée sur l'aberration de la lumière provenant de l'étoile Gamma Draconis.
- 1799 Naissance du mètre et du système métrique moderne.
- 1842 Christian Doppler découvre l'effet Doppler sur le son. Peu après Fizeau découvre, indépendamment, le même effet sur la lumière et explique correctement le phénomène.
- 1849 Hippolyte Louis Fizeau mesure pour la première fois la vitesse de la lumière avec une expérience de physique sur une base de 8 km entre Paris et Suresnes.
- 1862 Léon Foucault perfectionne la mesure et la réussite en laboratoire, dans la grande salle de l'Observatoire de Paris.
- 1892 Michelson et Benoît mesurent la longueur d'onde de la raie rouge du cadmium au Bureau International des Poids et Mesures à Sèvres.

■ Quelques dates à propos de la métrologie moderne

- 1740 Lacaille mesure la Méridienne de France et synchronise, avec des signaux optiques, deux horloges entre Sète et Aix-en-Provence pour la mesure de la longitude.
- 1790 Décision de l'Assemblée Nationale de mettre en place un système d'unité basé sur le système décimal.
- 1791 Méchain et Delambre sont chargés d'améliorer la mesure de la Méridienne de France, de Dunkerque à Barcelone, afin de définir le mètre.
- 1799 Réalisation du Mètre des Archives, représentant la longueur de la dix-millionième partie du quart du méridien terrestre. Réalisation du Kilogramme des Archives, représentant la masse d'un décimètre cube d'eau.
- 1872 Décision de fabriquer une série de mètres prototypes.
- 1875 Signature de la Convention du mètre.
- 1889 Les prototypes internationaux du mètre et du kilogramme sont déposés au BIPM, les autres sont distribués aux états membres de la Convention du mètre.
- 1952 Création du Comité Consultatif pour la Définition du Mètre (CCDM) pour étudier la possibilité de redéfinir le mètre.
- 1960 Nouvelle définition du mètre fondée sur la longueur d'onde dans le vide d'une transition de l'atome de krypton 86 émise par une lampe spectrale.
- 1960 Th. Maiman réalise le premier laser pulsé.
- 1960 Ali Javan réalise le premier laser HeNe continu à 3,39 μm .
- 1969 Naissance du Bureau National de Métrologie BNM.
- 1972 Première mesure absolue de la fréquence d'un laser HeNe stabilisé sur méthane à 3,39 μm au NBS (USA), aujourd'hui NIST, avec une chaîne de multiplication la reliant à l'horloge à césium qui définit la seconde.
- 1975 La CGPM recommande pour la vitesse de la lumière dans le vide une valeur résultant des mesures de longueur d'onde et de fréquence du rayonnement d'un même laser.
- 1976 Naissance du Laboratoire Primaire du Temps et des Fréquences à l'Observatoire de Paris, aujourd'hui BNM-SYRTE (Systèmes de Référence Temps Espace).

- ■ ■ - 1983 Nouvelle définition du mètre fondée sur la valeur de la constante fondamentale $c = 299792458$ m/s.

Finalement on revient à la case de départ, c'est-à-dire que désormais l'équation (1) est utilisée pour la réalisation pratique de l'unité de longueur. Pour la traçabilité des mesures aux unités fondamentales, les cales étalon qui sont utilisées comme étalon de transfert dans la métrologie dimensionnelle doivent être mesurées avec un interféromètre piloté par un laser. La fréquence de ce laser doit, à son tour, être mesurée directement ou indirectement par une chaîne de multiplication de fréquence qui la relie à la définition de la seconde. Les chaînes de multiplication classiques, comme celle du NBS et celle qui a été utilisée à l'Observatoire de Paris jusqu'à la fin des années 90, étaient des dispositifs très lourds en moyens matériels et humains et s'appuyaient sur des techniques très diverses, optiques et électroniques, à mettre en œuvre simultanément [2].

La technique moderne

L'introduction d'une technique révolutionnaire depuis le tout début des années 2000 a permis la démocratisation de ce type de mesures. Elle est basée sur l'utilisation d'un peigne de fréquence constitué de raies spectrales dont l'écart est asservi sur l'étalon primaire de fréquence à césium. Ce peigne est équivalent à une règle qui permet de mesurer l'écart entre deux fréquences en comptant le nombre non entier de traits qui les sépare. L'idée n'est pas nouvelle car, depuis l'année 1980, des mesures d'écart entre fréquences optiques ont été réalisées avec des peignes issus de lasers picosecondes ou des modulateurs de fréquence à très fort indice. Mais ces systèmes avaient une bande passante trop limitée pour mesurer directement une fréquence optique. Le pas décisif a été franchi grâce au développement conjoint et indépendant d'une part de lasers femtosecondes mode-bloqués à taux de répétition élevé et d'autre part de fibres dites à cristaux photoniques permettant d'élargir le spectre du rayonnement issu de ces lasers femtosecondes sur plus d'une octave [3]. Pour comprendre le fonctionnement du système de mesure femtoseconde et des techniques utilisées, on fait référence à la figure 1. La sortie du laser est un train d'impulsions, séparés d'un temps T qui est l'inverse de la fréquence de

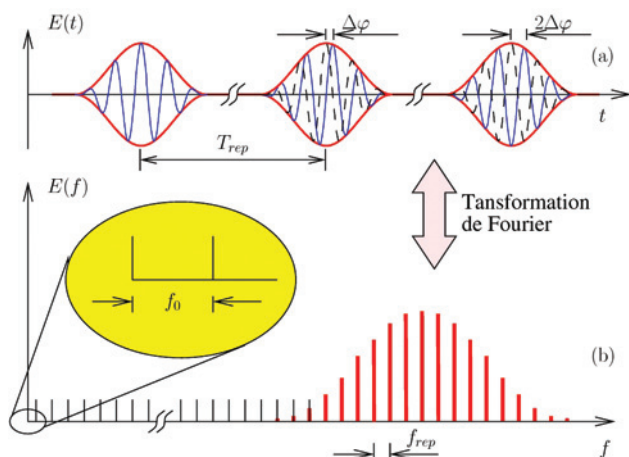


Figure 1: Train d'impulsions émis par un laser mode-bloqué (a) et spectre correspondant (b).

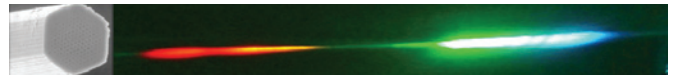


Figure 2: Spectre de la lumière à la sortie d'une fibre à cristaux photoniques, visible sur la gauche de la figure.

répétition f_{rep} . Dans la figure a été mis en évidence le fait que deux impulsions successives ne sont pas tout à fait identiques car f_{rep} n'est pas forcément une sous-harmonique de la fréquence centrale du laser ν_L .

Il en résulte un déphasage de la porteuse dans l'enveloppe de $\Delta\varphi$ entre chaque impulsion. Une analyse spectrale du signal en sortie du laser (autrement dit sa transformée de Fourier), fait apparaître un peigne de fréquence dont les dents sont espacées de la fréquence de répétition des impulsions f_{rep} . On peut montrer que le déphasage $\Delta\varphi$ induit un décalage de l'extrapolation du peigne à l'origine de $f_0 = \Delta\varphi / (2\pi T)$ appelé communément offset du peigne. Ainsi, la fréquence de la $n^{\text{ème}}$ raie du peigne s'écrit: $f_n = f_0 + n \times f_{\text{rep}}$. Cette relation simple qui relie deux radio-fréquences f_0 et f_{rep} à une fréquence optique f_n est à la base des mesures de fréquence optique. Dans le cas pratique la mesure de f_{rep} est très simple, par contre la mesure de f_0 qui n'a pas d'existence physique est un peu plus compliquée, mais réalisable par une technique dite de l'auto-référence [4]. Cette technique peut être mise en œuvre lorsque le peigne de fréquence s'étend sur plus d'une octave, comme celui présenté en figure 2 à côté de la fibre optique à cristaux photoniques qui est utilisée pour le produire. Lorsque la fréquence de chaque dent du peigne est déterminée, afin de mesurer la fréquence d'une radiation laser, il suffit de mesurer la fréquence du battement qui se produit sur une photodiode entre la radiation inconnue et la raie la plus proche du peigne. Pour avoir plus de détails et une présentation des premiers résultats obtenus voir [5]. ●

Contact

Giovanni Daniele ROVERA - BNM-SYRTE, UMR 8630
Observatoire de Paris - 61, av. de l'Observatoire, Paris France
daniele.rovera@obspm.fr

Références

- [1] J. Vrin ed., 1978.
- [2] G. D. Rovera and O. Acef, IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 48, no. 2, pp. 571-573, 1999.
- [3] T. A. Birks, al., Optics Letters, vol. 22, no. 13, pp. 961-963, 1997.
- [4] S. A. Diddams, al., Phys. Rev. Lett., vol. 84, pp. 5102-5105, May 2000.
- [5] G. D. Rovera, al., Meas. Sci. Technol., vol. 13, pp. 918-922, 2002.

ABSTRACT

The first part of this contribution summarizes the history of frequency measurements at the Observatoire de Paris. In fact the activity in this field has started several centuries ago with the discovery of the speed of light by Olaf Roemer. The second part describes the new technique based on a femtosecond laser. With this technique it is possible to perform routine measurements on wavelengths ranging from 1200 nm to 500 nm (250-600THz).

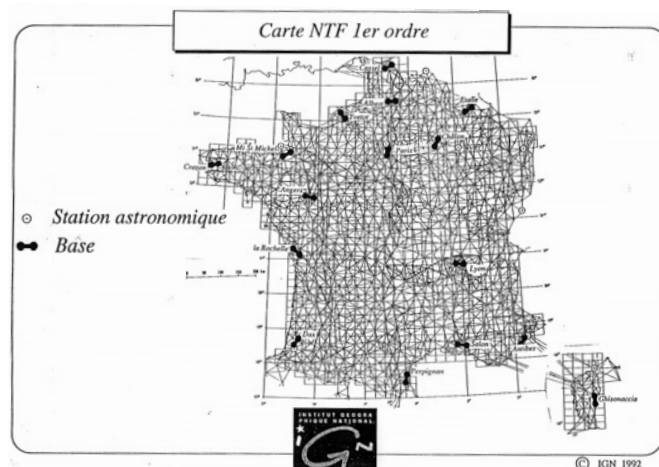
Evolution de la géodésie en France

■ **Françoise DUQUENNE** Chef du service de la géodésie et du nivellement IGN

La Nouvelle triangulation Française:

La NTF est le réseau Géodésique Français établi entre 1898 et 1991 et qui a été le réseau National officiel jusqu'en 2000. Ce réseau a été observé par ordre successifs. C'est un réseau bi-dimensionnel, les coordonnées des points sont soit la longitude et la latitude sur l'ellipsoïde Clarke1880IGN, soit les coordonnées planes en projection Lambert I, II, III, IV.

Structure	Densité	Nombre	Précision
Réseau Principal	1 ^{er} ordre	30 km	800
	2 ^e ordre	10 km	5000
	3 ^e et 4 ^e ordres	3 km	60000
			10 ⁻⁵
Réseau complémentaire	5 ^e ordre		20000
			divers



La croix du Panthéon est le point fondamental c'est à dire que les coordonnées issues de l'astronomie ont été prises comme coordonnées géodésiques. La conséquence est qu'en ce lieu la normale à l'ellipsoïde et la verticale sont confondues. A partir de ce point d'autres points sont déterminés par triangulation. Tous les trois cents kilomètres un points Laplace est déterminé et consiste à réorienter le réseau par astronomie et mettre à l'échelle par mesure de longueur au fil invar. Les observations de triangulation se font par ordre: le 2^e ordre s'appuie sur le 1^{er}, le 3^e et 4^e sur les ordres supérieurs. Jusqu'en 1960 les mesures sont uniquement des angles, à partir des années 1970 des mesures de distances sont incluses de plus en plus systématiquement pour simplifier les schémas d'observations. Les calculs sont opérés soit sur l'ellipsoïde, soit en projection. Au début les calculs de compensations et en particulier le 1^{er} ordre comporte de petits blocs avec peu de points mais à la fin des blocs d'environ 1000 points sont compensés. Les ordres inférieurs s'appuient sur les ordres supérieurs qui sont fixés. Pour calculer sur l'ellipsoïde ou sur le plan il faut réduire les observations à l'ellipsoïde et (éventuellement) à la projection.

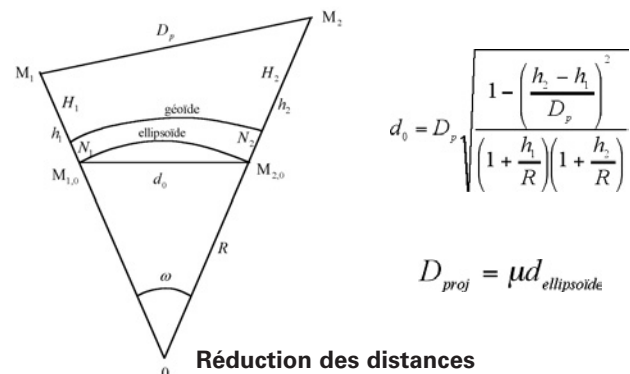
Sur les angles horizontaux une correction est due à la déviation de la verticale: l'axe du théodolite est vertical, et il faut le ramener sur la normale par la relation entre les azimuts géodésique Az_g (normale) et astronomique Az_a (verticale) en fonction des composantes de la déviation de la verticale (η, ξ) et de la distance zénithale de la visée (Dz).

$$Az_g - Az_a = -\eta \tan \varphi + (\eta \cos Az - \xi \sin Az) \cot Dz$$

Pour un angle on fait la différence entre les deux directions, on voit que le premier terme qui est indépendant de la direction va s'éliminer et que le deuxième terme s'annule pour une visée presque horizontale. Cette correction n'a donc pas été faite dans la NTF, car il était impossible de connaître la déviation de la verticale sur tous les points, mais cela ne pose problème qu'en montagne.

Une autre correction intervient sur les angles lorsqu'on projette sur le plan, c'est le dV qui permet de tenir compte de la courbure de l'image de la géodésique: cette correction a bien été appliquée pour la NTF.

Enfin, à partir des années 70, les mesures de distances ont été réduites: au niveau zéro, puis à l'ellipsoïde, puis au plan. Pour la réduction au niveau zéro on a utilisé l'altitude et non la hauteur au dessus de l'ellipsoïde provoquant au maximum une erreur de 2.10^{-6} .



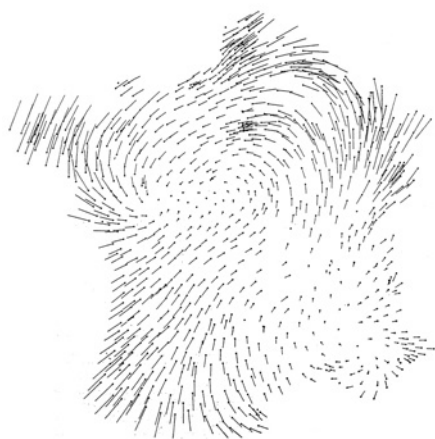
La dernière mission de triangulation a lieu en 1991 dans les Landes. L'établissement de la NTF aura mis un peu moins de cent ans.

Dans les dernières missions de plus en plus de mesures de distances sont pratiquées et mettent en évidence des problèmes de mises à l'échelle du réseau NTF.

Un nouveau réseau le RGF

En parallèle des mesures de géodésie spatiale sont pratiquées depuis les années 80 et mettent en évidence les problèmes à la fois d'orientation et mise à l'échelle.

La NTF qui était tout à fait satisfaisante lorsqu'on faisait des mesures classiques à courte distance devenait insuffisante pour les techniques nouvelles en particulier GPS. En observant



Déformations de la NTF par rapport à RGF93



entre Marseille et Brest avec GPS, on pouvait trouver un écart de 5 m avec la NTF. Le RGF (Réseau Géodésique Français) est donc créé sous recommandation du CNIG.

Il est composé de trois réseaux

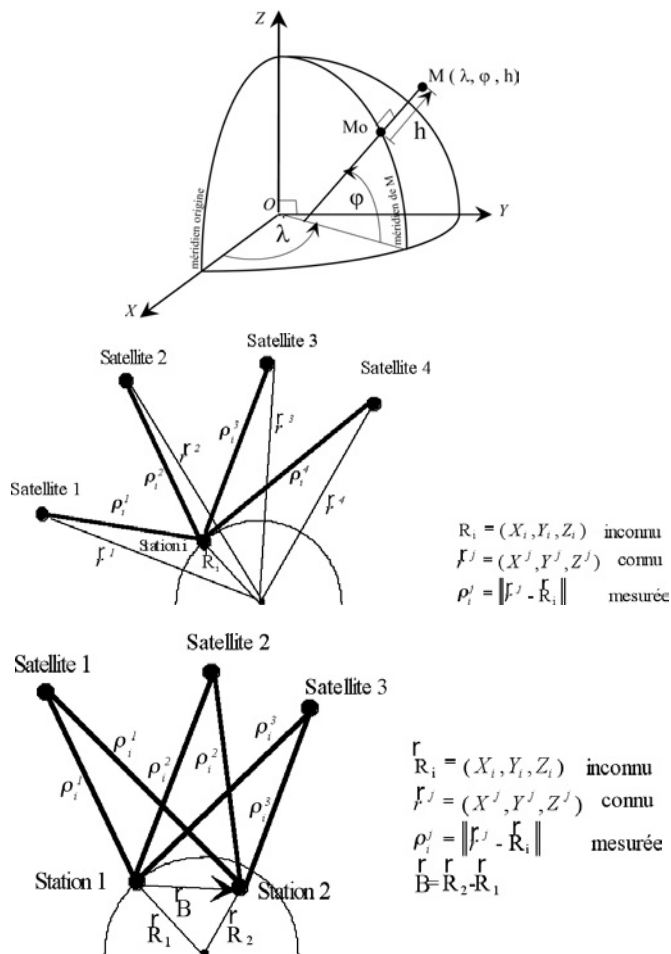
- RRF: Réseau de Référence Français (24 points) géodésie spatiale: VLBI, Laser, GPS (1989-1993)
- RBF: Réseau de Base Français (environ 1000 points GPS)(1994-1996)
- RDF: Réseau de Détail Français: points de la NTF qui ont été convertis en RGF par transformation (grille).

Les éléments de définitions:

- système géodésique: RGF93 (densification en France du système Européen ETRS89)
- ellipsoïde GRS80
- projection Lambert 93

Les observations GPS permettent de positionner un point sur terre dans un repère géocentrique:

- en absolu par l'intermédiaire des positions de satellites dans ce repère
- en différentiel en se rattachant à des points connus dans le référentiel. Les coordonnées sont tridimensionnelles: X, Y, Z ou λ, φ, h .



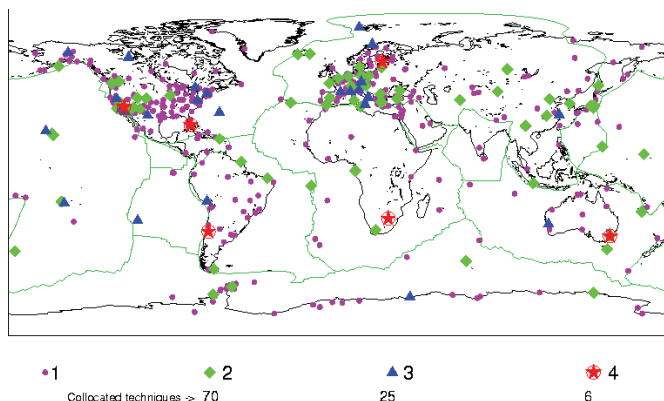
Evolution des objectifs de la Géodésie

La triangulation a permis de définir la forme de la Terre et d'en déterminer les dimensions par mesures géométriques. Au début de la géodésie spatiale de nouveaux ellipsoïdes ont été définis à partir du champ de pesanteur: GRS67, GRS80, WGS66, WGS72, WGS84...

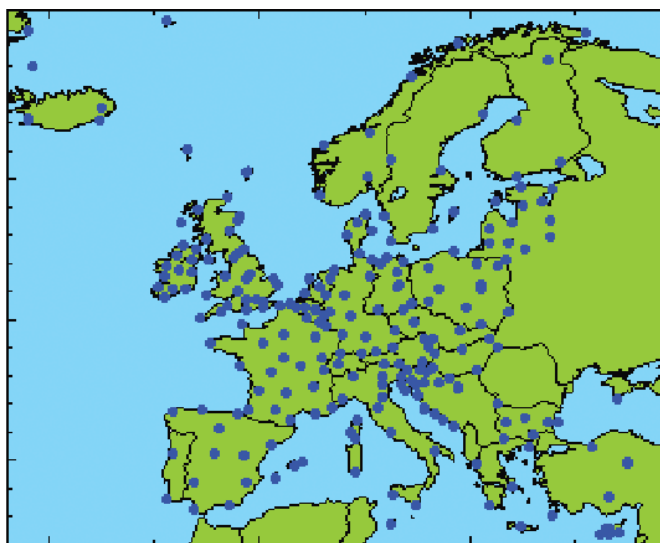
Les objectifs actuels sont de définir le plus précisément possible des systèmes de référence. La notion de systèmes de référence apparaît dans les années 80. Il s'agit de positionner par rapport à la Terre un trièdre dont l'origine O est proche du centre de gravité de la Terre, OZ proche de l'axe de rotation de la Terre, et le plan XOZ proche du méridien de Greenwich.

On réalise un système géodésique par un réseau de points, sur lesquels on observe par géodésie spatiale et dont on déduit les coordonnées par un processus de calcul. Le fait de faire un nouveau calcul avec de nouvelles coordonnées constitue une nouvelle réalisation. Le réseau mondial ITRF a été réalisé au début par des campagnes de mesures internationales de VLBI, Laser satellite, GPS et est en majorité maintenant composé de station permanentes (GPS, DORIS). En 2000 ce réseau comporte plus de 500 sites. Dans le système ITRS les plaques tectoniques sont mobiles et donc dans ce système les points sont représentés par leurs positions et vitesses.

Le réseau Européen est une partie densifiée du réseau ITRF. Les deux systèmes étaient confondus en 1989 mais l'ETRS89 suit la plaque tectonique Eurasie et donc dans ce système les points n'ont pas de vitesse due au mouvement de plaques.



ITRF : IERS Terrestrial Reference Frame (IGN/LAREG)



EUREF : Européen Reference Frame

Le réseau GPS Permanent

La première réalisation du RGF93 a été faite par campagnes de mesures GPS sur le RBF. On sait maintenant que son exactitude est de l'ordre de 2-3 cm. Pour accéder à la référence nationale l'utilisateur doit stationner avec GPS quelques points du RBF (4 entre 5 et 20 km suivant la précision et fiabilité requise). Le RGP, mis en place par l'IGN et de nombreux partenaires, est constitué d'une cinquantaine stations GPS qui observent en continu et dont les observations sont mises à disposition gratuitement sur Internet. L'utilisateur peut en utilisant ses observations et celles de stations RGP accéder à la référence Nationale précisément sans se déplacer. La réalisation RGF issues des stations permanentes a une exactitude d'environ 5 mm

Les références verticales

Que ce soit la triangulation ou le GPS les mesures géodésiques ne permettent pas d'atteindre les précisions du nivellement de précision et donc dans les deux cas un réseau de nivellement reste nécessaire (NGF-IGN69, NGF-IGN72). En triangulation on a attribué une altitude à la plupart des points du réseau NTF, pour quelques un par rattachement au réseau de nivellement et pour la plupart par mesure d'angles verticaux. En moyenne l'altitude a une précision de l'ordre de 10 cm.

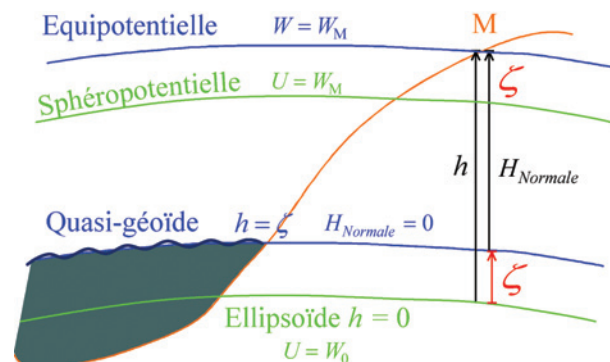


Schéma des différentes hauteurs (H. Duquenne)

En GPS la quantité déduite des observations est la hauteur au dessus de l'ellipsoïde. L'altitude cependant reste une nécessité pour de nombreuses applications (génie civil, VRD,...). Pour avoir une altitude normale il faut connaître la hauteur du quasigéοïde au dessus de l'ellipsoïde.

La grille RAF98 issue de l'adaptation du quasi-géοïde QGF98 à environ 900 points RBF nivelés précisément permet de transformer la hauteur au dessus de l'ellipsoïde GRS80, système RGF93 en altitude IGN69 avec une précision entre 2 et 3 cm. Cette précision est déduite de tests sur de nombreux chantier, répartis sur toute la France.

Avec cet outil, si les observations et calculs GPS sont bien référencés dans le RGF93, les seules observations GPS donnent à la fois un positionnement géométrique tridimensionnel précis mais aussi une altitude (donc dans le champ de pesanteur) avec une précision entre 2 et 3 cm.

Conclusions et perspectives

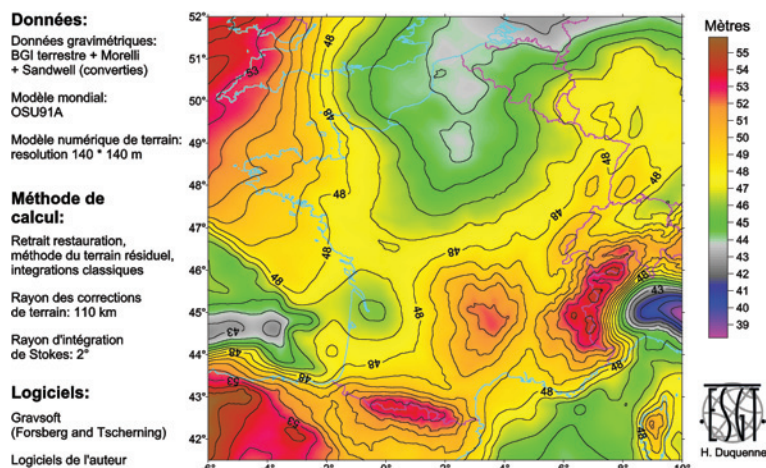
Les objectifs de la géodésie sont donc :

- la réalisation précise des références nationales
- la fourniture à l'utilisateur GPS des moyens d'accéder à ces références le plus précisément et le plus rapidement possible.

Les perspectives :

- amélioration du quasi-géοïde et de la grille RAF98
- accès aux références en temps réel. ●

Le modèle de quasigéοïde QGF98



Le Réseau GPS Permanent

■ Thierry DUQUESNOY Institut Géographique National

Dans le cadre de sa mission de service public, l'IGN fédère l'installation d'un réseau de stations GPS permanentes en partenariat avec des organismes du secteur public et des entreprises du secteur privé.

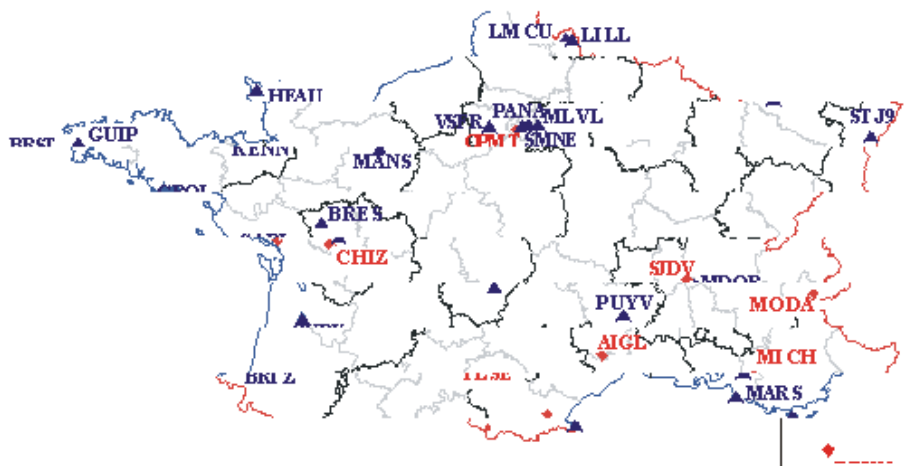


Figure 1 : le réseau Permanent à la date du 10 juin 2004

Un tel réseau de stations a pour double objectif de donner un accès facile et peu coûteux au système de Référence National en matière de coordonnées (le RGF93) et de favoriser l'utilisation des techniques spatiales. En effet, le GPS (Global Positioning System) est en constante évolution, et le nombre de ses applications et de ses utilisateurs augmente régulièrement.

Un inconvénient du GPS étant la nécessité, pour obtenir une localisation précise, de placer un récepteur sur un point de coordonnées connues et un autre sur les positions à déterminer, l'utilisation de deux récepteurs pour un seul qui effectue les mesures sur un chantier est obligatoire. L'incidence sur le coût des opérations est alors non négligeable. Le remplacement de la station située sur le point de coordonnées connues par des stations fixes permanentes utiles à la communauté des utilisateurs, et dont les données sont mises à sa disposition par l'intermédiaire du réseau Internet, permet ainsi une mutualisation des moyens et par conséquent une baisse sensible du coût des opérations.

A ce jour, le Réseau GPS Permanent comprend une cinquantaine de sites, composée pour un tiers de stations implantées et gérées par l'IGN et pour deux tiers de stations appartenant à des organismes partenaires. Si le maintien et l'accès à la Référence Nationale peut se satisfaire des seules stations gérées par l'IGN, l'utilisation de techniques de détermination des points rapides ou en temps réel nécessite une densité de stations plus importantes. C'est ce qui a incité l'IGN à développer sa politique partenariale initiée dès l'expérience pilote de 1997. En contrepartie d'une mise à disposition gratuite vers l'ensemble des utilisateurs des données enregistrées par chaque station permanente, l'IGN propose une éventuelle aide technique, la mise en référence et le contrôle en continu

de la stabilité de la station, ainsi que l'archivage à long terme des données.

Le réseau de stations GPS permanentes présente pour l'utilisateur un autre avantage majeur sur les réseaux de points matérialisés, celui de disposer de coordonnées d'appui recalculées chaque jour. Les coordonnées publiées des points matérialisés datent en effet de l'époque de leur détermination et ne présentent donc pas les mêmes garanties de stabilité dans le temps malgré des visites régulières.

Les enregistrements collectés par les stations permanentes, par fichiers de 1 heure échantillonnés à la seconde ou de 24 heures échantillonnés à 30 secondes, sont transmis dès la clôture du fichier vers les deux centres opérationnels du RGP situés à Saint-Mandé et à Marne-la-Vallée et mis à la disposition des utilisateurs sur deux serveurs ftp aux adresses suivantes :

<ftp://rgpdata.ign.fr> pour le site de Saint-Mandé

<ftp://lareg.ensg.ign.fr> pour le site de Marne-la-Vallée.

Les données des stations permanentes disponibles sur ces sites le sont dans un format standard (RINEX) accepté par la quasi-totalité des logiciels de traitement GPS, et doublement compressées afin de minimiser les temps de transfert. Des outils interactifs de décompression des fichiers sont disponibles sur le site web du RGP :

<http://geodesie.ign.fr/rgp/index.htm>

La présence des fichiers des stations permanentes sur les serveurs est contrôlée en permanence, et la page d'accueil du site web du RGP indique cette disponibilité aux utilisateurs comme aux partenaires. D'autres outils ont été développés afin de renseigner au mieux et le plus rapidement possible les utilisateurs. Toutes ces informations sont également accessibles sur le site web du RGP. ●

Conclusion en forme d'épilogue

■ Suzanne DÉBARBAT Observatoire de Paris - Bureau des Longitudes

Le colloque "Méchain et la longueur du mètre" qui, sur deux journées, a réuni au total près d'une cinquantaine de participants inscrits, ne semble pas avoir déçu ceux qui y ont participé. Il était organisé, à l'Observatoire de Paris, s'y tenant pour partie, et pour une autre dans l'Amphithéâtre de l'Institut d'Astrophysique de Paris situé sur le Campus de l'observatoire. Cette rencontre "Méchain et le Mètre" a débuté, le mercredi 22 septembre par l'accueil des participants à partir de 14 heures avec remise des dossiers contenant, notamment, tous les résumés des communications. A partir de 16 h 30, a eu lieu une visite de la présentation d'objets et de documents traitant des travaux des prédécesseurs de Méchain et de ses activités menées, pour la campagne de mesures de la Méridienne de France de 1792-1798, en parallèle avec Delambre, de Dunkerque à Barcelone. Les participants étaient accueillis en musique dans la Grande galerie de l'Observatoire de Paris par M. Heintzen, agrégé de mathématiques qui s'est intéressé au Système métrique, notamment, dans le cadre de son enseignement. Puis il interprétait, en s'accompagnant de la vielle, instrument dont les facteurs d'autrefois se trouvaient tous à Jenzat dans le Bourbonnais, une de ses compositions "La Commission du Mètre" en hommage aux fondateurs du Système métrique décimal.

Après accueil et présentation générale par le Conservateur, M^{me} Bobis, la visite de la galerie permettait à chacun d'examiner plus particulièrement tel ou tel document ou objet. De l'ensemble des mesures de Méchain et de Delambre est issue la décision du choix de la longueur du mètre, mètre dont plusieurs exemplaires étaient présentés. Enfin venait la seconde campagne de Méchain achevée sur l'annonce de son décès, le 20 septembre 2004, reçue d'Espagne. Outre des instruments de cette opération, étaient exposés, entre autres objets, la "Toise du Nord" et la "Toise du Pérou", cette dernière ayant servi de référence pour la longueur du mètre de 1799, à 3 pieds 11.296 lignes de cette toise, deux des quatre "Règles de Borda" employées pour la longueur des bases...

A 18 h 30, le président de l'Observatoire de Paris, Daniel Egret, accueillait à son tour les personnes présentes, rappelant les activités de l'Établissement qui n'a cessé et ne cesse de s'intéresser aux problèmes métrologiques de différents domaines

de l'astronomie, en particulier à la "Longueur du Mètre" de notre époque, héritée de découvertes, de recherches et de développements menés depuis plusieurs siècles. D. Egret conviait alors à une réception, dans l'actuelle Salle du Conseil où, sous l'œil de Méchain, mais aussi de Delambre et de quelques autres, M. Heintzen interprétait une autre chanson de sa composition intitulée "La Méridienne", en hommage à ces géodésiens, Delambre n'ayant pu manquer, en venant au centre de la France, sur le Méridien de l'Observatoire de Paris, d'entendre des airs interprétés à cet instrument.

Ce Colloque bénéficiait d'une collaboration avec l'Institut Géographique National qui avait accepté de prêter trois instruments prestigieux de ses collections : un cercle de Borda du constructeur Lenoir, lequel est probablement, à l'origine de la réussite de cet instrument, un cercle du constructeur Bellet, un de ses collaborateurs et celui de Delambre, un graphomètre à lunettes du type de celui employé sur le terrain par Méchain et par son collaborateur Tranchot, pour déterminer les conditions de visibilité des points hauts de la triangulation en Espagne. La collaboration de l'Association Française de Topographie a permis d'inviter Antonio Ten, de l'Université de Valencia, à venir présenter la correspondance de Méchain des années 1803-1804, sujet sur lequel il travaille depuis vingt ans, ses recherches l'ayant conduit à des découvertes de textes inédits qui éclairent d'un jour nouveau le comportement de Méchain dans les années qui ont précédé son décès à Castellon de La Plana.

La revue XYZ de cette Association a bien voulu prendre en charge l'édition des actes de cette rencontre dans une de ses livraisons qui suit le Colloque. Le Bureau des longitudes, auquel Méchain a appartenu dès sa création par la Loi du 8 messidor an III, avait tenu à s'associer à cette manifestation. A ce titre il a fourni les affiches comportant, à côté de la signature de Méchain, celles de nombreuses célébrités, ainsi que les badges avec cette même signature.

Le voyage qui avait été envisagé le 24 octobre 2004 n'a pas été organisé en raison du nombre restreint de participants. Une autre proposition sera faite pour le 1^{er} semestre 2005.

Que tous ceux et toutes celles qui ont contribué à ces différentes actions trouvent ici l'expression de la gratitude qui leur est due. ●



M. Heintzen interprétant une chanson de sa composition intitulée "La Méridienne"

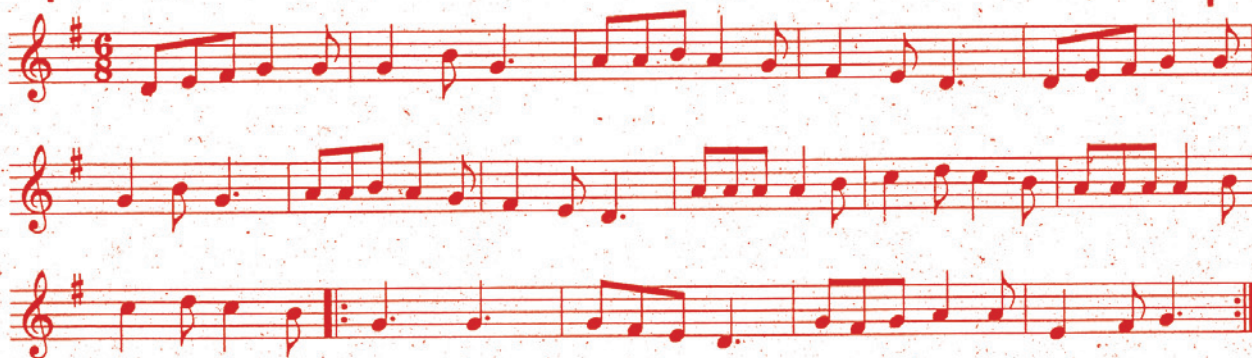
© M. Bailly



La Méridienne



chanson nouvelle



1.
Écoutez une chanson nouvelle
Dessus l'ait de Cadet Roussel (bis)
Qui raconte les aventures
Des deux héros de la mesure

Refrain
Ah oui, ah oui vraiment,
La méridienne c'est épatant ! (bis)

2.
Voilà Delambre, voilà Méchain
Qui viennent mesurer l'méridien (bis)
Ah citoyens quelle drôle d'affaire
C'est vraiment révolutionnaire !

3.
C'est grâce à eux mes bons amis
Que l'on voit à Bourges en Berry (bis)
En plein milieu d'la cathédrale
Passer comme une espèce de rail !

4.
Ils montent en haut d'tous nos clochers
Ils passent leurs journées à viser (bis)
Pour trouver la distance exacte
Du belvédère jusqu'à Mòrlac !

5.
Le méridien à ce qu'on nous dit
S'en va du nord jusqu'au midi (bis)
J'savais pas qu'la forêt d'Habert
Était au sud du belvédère !

6.
C'est le p'tit vin d'Châteaumeillant
Qui fait mesurer en tournant (bis)
Les arpenteurs visent de traviole
Dedans les régions viticoles !

7.
Mais si leurs zigzags continuent
Le méridien s'ra tout tordu (bis)
V'là un sacré système métrique,
Si l'étalon est élastique !

8.
Pour en finir faut vous conter
le souvenir qui est resté (bis)
A une jolie petite brunette
Qui a trop visé dans leur lunette

9.
Une fois les topographes partis
Sa taille a bien vite forçé (bis)
Cet enfant du système métrique
Fut baptisé Théodolite !

© M. Heintzen.



Imprimerie du mètre moqueur



Texte original d'une chanson de M. Heintzen.

SIG, une histoire de définitions...

■ Mathieu KOEHL

Tout ouvrage, tout article, tout cours technique commence par la définition de l'objet de la technologie décrite. Il en est de même pour ce qui concerne ce qui suit et qui a pour objectif de retracer dans le temps l'évolution ce que l'on appelle aujourd'hui couramment un SIG. Après un retour sur les multiples définitions des SIG un aperçu historique de l'évolution de ces systèmes est mise en parallèle avec les différentes publications autour de ce thème dans cette même revue XYZ depuis son premier numéro.

SIG, les définitions

Le terme Système d'Information Géographique a été utilisé pour la première fois par R. F.Tomlinson, quand il a installé un système d'informations, se référant à un espace, pour le compte du Canada en 1963 (CGIS). A travers cette dénomination, il réussissait pour la première fois l'orientation vers une nouvelle technologie : à savoir l'utilisation de l'ordinateur pour le traitement des données se référant à un espace.

De façon analogue, depuis le XIX^e siècle, il existe des systèmes d'information (géographique ou se référant à un espace donné) sous forme de cartes planes, et qui au cours du temps, par l'approfondissement des connaissances, sont devenues très denses et très riches en contenu d'informations.

Mais du fait de la complexité de ces cartes, ces dernières sont devenues de plus en plus difficiles à manipuler et aussi à mettre à jour. De plus, du fait de l'interdisciplinarité des problèmes à résoudre qui nécessitent l'échange et la prise en compte d'un grand nombre de données très différentes, il devient rapidement difficile voire impossible, en tout cas peu commode, d'envisager des traitements complexes avec des systèmes dits analogiques. Aussi fallait-il absolument recourir à des moyens informatiques puissants manipulant des systèmes analytiques.

■ Système d'Information (SI)

Information/Donnée

Le terme "Information" vient du latin "informatio" et signifie : renseignement sur quelqu'un, sur quelque chose. De manière générale, on comprend par "information" aussi bien un savoir, qu'une nouvelle, qu'un message, mais également la transmission d'un savoir (élément ou système pouvant être transmis par un signal ou une combinaison de signaux).

Dans le domaine de la communication, le terme "information" est employé pour parler des connaissances sur des faits, des réalités, des choses qui se sont déroulées.

En informatique, l'information va être considérée comme une

connaissance en relation avec une certaine utilité et qui va être utilisée pour atteindre un objectif fixé. Les informations sont reliées à des signes ou symboles qui permettent de les exprimer. Il faut distinguer trois plans différents dans le langage : la syntaxe comme plan du signe et du symbole, la sémantique comme plan de la signification et la communication comme plan de la relation entre objets.

Le terme d'information doit de ce fait être considéré comme le résultat de l'application de règles et de directives sur des données, qui ont amené à des faits, des découvertes et qui se fondent sur des relations de ressemblance, de dépendance et de classement de structures complexes. De cette manière, il sera possible d'obtenir de nouvelles informations en combinant et en traitant des informations élémentaires.

Par données, nous pouvons définir les descriptions quantitatives et qualitatives des particularités d'ensembles homogènes ou non, ou de l'objet faisant office de sujet étudié.

Pour permettre de tirer des nouvelles informations ou pour retirer des caractéristiques spécifiques aux données recherchées, nous allons utiliser les ordinateurs, dans lesquels sont contenues à la fois toutes les données et toutes les méthodes permettant de les traiter. Ils forment ainsi des systèmes d'informations.

■ Système d'information

Sous sa forme élémentaire, un "système d'information" (SI) est un système de questions-réponses reposant sur des données. Nous pouvons ainsi définir les SI comme des outils polyvalents permettant le traitement et l'analyse informatique de données et d'informations.

En 1980, R. Conzett qui est l'un des pionniers en ce qui concerne les systèmes d'informations donnait la définition suivante : "Si les fonctions d'un système permettent la saisie, le stockage, le traitement et la représentation des informations, alors il s'agit d'un système d'information. Il se compose ainsi de l'ensemble des données et des directives de traitement. Ce système doit permettre à l'utilisateur d'obtenir des informations sous forme compréhensible, dérivées des informations (données) initiales."

Ainsi, un système d'information va-t-il comprendre une chaîne de processus permettant la saisie des données, leur gestion, leur analyse et leur représentation (modèle à quatre composants). La gestion des données inclut leur modélisation, leur structuration et leur stockage.

Une approche informatique des systèmes d'information va présenter ses différents composants selon la classification suivante :

- processeurs et périphériques : matériel.
- programmes de traitements et règles : logiciels.
- description quantitative et qualitative : les données.
- utilisateurs à différents niveaux.



■ ■ ■ ■ Systèmes d'Information Géographique (SIG)

Caractéristiques

Un Système d'Information Géographique peut être caractérisé par la même structure à quatre composants : il s'agit d'un système informatique composé de matériel, de logiciels, de données et de programmes d'applications. Un tel système est destiné à la saisie de données géolocalisées, à leur stockage et réorganisation, leur modélisation et leur analyse ainsi qu'à leur représentation sous forme alphanumérique ou graphique.

Un Système d'Information Géographique (SIG) est un outil informatique de représentation et d'analyse de données géographiques localisées. C'est principalement cette possibilité d'analyse spatiale qui les différencie de tous les autres systèmes de gestion et de manipulation de données.

Définitions

La littérature scientifique abondante, ainsi que des sites internet spécialisés¹ dans le domaine des SIG proposent un grand nombre de définitions permettant à la fois de montrer l'évolution du concept de SIG ainsi que le sujet de l'étude ou le contexte dans lequel le SIG est utilisé. En voici quelques unes.

En 1979, Dueker propose une définition assez précise du concept de SIG comme *"Un type particulier de système d'information dont la base de données contient des informations reliées à des entités physiques, des activités ou des événements localisés et assimilables aux formes géométriques de points, de lignes et de zones. Un SIG gère les informations spécifiques à ces points, lignes et zones pour extraire les données requises afin de réaliser des recherches et des analyses spécialisées."* Cette première définition montre bien les éléments géométriques de base qui peuvent être utilisés.

Un peu plus tard, en 1986, Burrough reprend la définition du SIG comme *"Un ensemble puissant d'outils pour saisir, conserver, extraire, transmettre et afficher les données spatiales décrivant le monde réel."* Il s'agit bien de mettre en évidence que l'objet du SIG est la gestion de "phénomènes" du monde réel dans toute sa complexité.

En 1988, une définition donnée par Dickinson et Calkins reprend le SIG comme un système à plusieurs composantes : *"Les SIG comportent trois types de composantes : technologiques (matériel et logiciel), informatives (bases de données géographiques et associées) et infrastructurelles (personnel, installations, services de support)." Cette définition donne une approche systémique du concept de SIG. Il ne s'agit pas seulement d'outils (logiciels), mais d'un système complexe. La SFPT (Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection) donne également sa définition d'un SIG lors d'un congrès à Strasbourg en 1990 : un "système informatique permettant à partir de diverses sources de rassembler, organiser, gérer, analyser, combiner, élaborer, présenter des informations localisées géographiquement, contribuant notamment à la gestion de l'espace."*

En 1990, Michel Didier² propose sa définition qui inclut l'aspect économique : *"Ensemble de données repérées dans l'espace, structuré de façon à fournir et extraire commodément des synthèses utiles à la décision."*

Le CNIG (Conseil National de l'Information Géographique) définit, en 1992, le SIG comme un *"ensemble coordonné d'opérations généralement informatisées, destinées à transcrire et utiliser un ensemble d'informations (géographiques) sur un même territoire. Ce dispositif vise particulièrement à combiner au mieux les différentes ressources accessibles : base de données, savoir-faire, capacité de traitement selon les applications qui lui sont demandées."*

En 1996, dans le "Que Sais-je?" dédié au SIG, Denègre et Salgé³, nous enseignent que l' *"on peut retenir les principales opérations de gestion de l'information géographique dévolues aux SIG comme les 6 A : Acquérir, Archiver, Accéder, Analyser, Afficher, Abstraire."*

Une définition incluant à la fois les opérations d'un SIG et sa composition comme un système organisé est donnée par l'un des principaux éditeurs de SIG (ESRI) : *"Un ensemble organisé de matériel informatique, de logiciels, de données géographiques et de personnel visant à saisir, stocker, maintenir, manipuler, analyser et afficher de façon efficace toutes les formes d'informations géographiques à référence spatiale."*

Les SIG sont donc spécialement conçus pour le traitement de données géolocalisées. Ils comportent des modules de modélisation et d'analyse très performants. Ils intègrent des primitives géométriques, des descriptions graphiques, sémantiques et administratives (sous forme d'attributs) dans des objets géolocalisés. Le traitement numérique de données géométriques et de leurs attributs associés, permettent la constitution d'informations très diverses qui servent à décrire, à analyser et à comprendre le monde réel que l'on peut alors modéliser à souhait. Le modèle de données, que l'on peut définir de toutes les différentes façons voulues, et la multiplicité des domaines d'applications qui peuvent être traités par de tels systèmes ouvrent un très large éventail aux possibilités d'emploi de ces systèmes. L'aspect thématique, très important dans les types des données traités, permet de différencier très nettement ces systèmes d'avec les systèmes-CAO (Conception Assistée par Ordinateur). Les données, qui sont stockées de manière permanente, forment la base du système composé des quatre notions : saisie, édition, analyse et représentation. La carte thématique n'est alors qu'un moyen de représentation des données contenues dans le SIG ; les graphiques ou les rapports papiers sont d'autres modes de représentation associés aux SIG, mais, le traitement interactifs des données est l'une des caractéristiques principales des SIG.

La dénomination SIG implique, aujourd'hui, un degré de complexité minimum des données et des structures, et tend à engendrer des systèmes de plus en plus complets et traitant des domaines de plus en plus variés.

■ Autres SIGles

SIG

Devant l'ampleur du phénomène des SIG et la généralisation de leur utilisation, les sigles se multiplient et sont utilisés avec des significations différentes.

Par exemple, SIG est utilisé pour dire système d'information géographique, qui désigne comme nous venons de le voir, le système d'information géographique en tant que système inté-

gré. Mais il peut également représenter uniquement le paquet-logiciel qui permet de réaliser des traitements de type SIG. Le "S" initial est souvent détourné également en "Sciences" dans le cas des Sciences de l'Information Géographique⁴. De nombreux services de collectivités territoriales ont profité de la vague SIG pour se rebaptiser Service de l'Information Géographique désignant le service public gérant et délivrant les données et informations géolocalisées. Chez nos voisins anglosaxons, SIG devient GIS. Mais là aussi le "S" final peut désigner autre chose que System, notamment Studie : l'enseignement dans le domaine de l'information géographique ou encore l'étude de la manière dont les SIG sont implémentés, utilisés dans la société : aspects économiques, historiques, légaux, sociologiques, etc. Dans SIG, le "G" signifie en général "Géographique". Mais pour plus de précision sémantique, il peut aussi signifier "Géolocalisée", "Géoréférencée", etc.

SIRS⁵ et autres

Du côté des canadiens et des suisses, nous retrouvons une grande diversité de sigles concernant les SIG. Chaque sigle permet de différencier et de caractériser chaque type de SIG par rapport aux domaines d'applications. Le Système d'Information à Référence Spatiale (SIRS) est un sigle incluant de manière plus précise l'objectif du système. Le SIS (Système d'Information Spatiale) montre qu'il s'agit d'un système d'information au départ, mais traitant de données spatialisées.

Associés⁶ au sigle de SIT, plus localisé, signifiant Système d'Information Territorial ou Système d'Information du Territoire, mais parfois également Système d'Information Topographique, nous pouvons également rencontrer le SGT (Système de Gestion des Terres), le SIC (Système d'Information Cadastre), le SGI (Système de Gestion des Infrastructures).

D'autres systèmes apparentés génèrent des sigles plus ou moins bien connus : les MNA (Modèle Numérique d'Altitude), SIA (Système d'Information pour l'Aménagement), SIF (Système d'Information Foncière), SIURS (Système d'Information Urbaine à Référence Spatiale), et autres SAIG (Système d'Analyse de l'Information Géographique), SIEM (Système d'Information pour les Etudes de Marché), SIERS (Système d'Information environnementale à référence spatiale), SIS (Système d'Information sur les Sols), SGTC (Système de Gestion des Transports et des Communications), etc.

Un peu d'histoire

Alors que dans les années soixante la notion de SIG était à peine apparue, on utilisait déjà les techniques de dessin assisté par ordinateur (DAO), qui étaient à l'origine de nouvelles orientations dans les traitements des données informatiques. Dans les années cinquante, l'apparition des technologies du graphisme en mode vecteur laissait tout le monde sceptique. En effet, le coût de mise en oeuvre de ces nouveaux concepts et le niveau de formation qui était requis pour les aborder ne promettaient pas le meilleur avenir pour ces systèmes. Mais aujourd'hui, on assiste à la fusion complète des produits et développements en matière de technologie graphique et géométrique avec ceux des SIG.

L'introduction du concept de données en mode vecteur a été à l'origine de projets pilotes dans le domaine de la cartogra-

phie numérique. En 1958, on assiste à la réalisation du premier MNT au Massachusetts Institute of Technology (MIT) qui va être utilisé pour la détermination de nouveaux tracés de routes aux Etats-Unis.

Dans les années soixante, les techniques de traitement numérique des images ont connus un essor considérable. Les images et données, saisies par les nouvelles techniques embarquées dans les satellites, ont transformé le traitement des images numériques en une discipline à part entière, même si les techniques d'images-rasteurs n'étaient pas encore très développées. Les techniques et concepts sur les MNT ont également été développés lors de cette décennie (MN. modèle raster, MNT par triangulation, etc.)

A cette époque, on désignait par SIG une méthode permettant de superposer différentes cartes avec des données numériques pour en extraire des attributs géolocalisés à l'aide de gros systèmes informatiques. Mais cette solution n'était utilisable que par les grandes administrations, les militaires, la recherche et les grands services chargés de la gestion des forêts, de l'élaboration de cartes topographiques, de la documentation sur les ressources naturelles, des remembrements, de l'aménagement du territoire, etc.

Plusieurs contributions importantes dans les prémices des concepts de SIG sont à noter lors de cette décennie.

En 1963, R. F. Tomlinson définit le concept du Canadian Geographic Information System (CGIS) pour l'inventaire national des ressources.

En 1964, The Harvard Lab for Computer Graphics and Spatial Analysis, Harvard University, permet à Howard Fisher de continuer à développer SYMAP (SYnagraphic MAPping System), application pionnière dans le domaine de la cartographie automatisée.

En 1969, Environmental Science Research Institute (ESRI) est fondé par les Dangermond. Parallèlement, la société M & S Computing Inc. (qui deviendra plus tard INTERGRAPH) est créée.

Les années soixante-dix peuvent être considérées comme les années des systèmes d'informations à très petite échelle. C'est lors du congrès FIG de mai 1974, à Washington, que ce concept a été officialisé. La cartographie a de plus en plus utilisé les moyens informatiques et a également institué la cartographie-DAO. Puis la photogrammétrie s'est de plus en plus imposée comme moyen de production de données. C'est d'ailleurs à cette époque qu'aboutissent des travaux de recherche sur les ortho-projections numériques (1976) et sur la corrélation numérique d'images (1978).

La décennie des années quatre-vingt a vu la percée des SIG, à travers le développement et la conception de SIG dans les domaines de l'écologie, de l'environnement, de l'espace et des différents réseaux locaux. C'est à cette époque que toutes les

- (1) GGR-18708 et GGR-60449, par Marius Thériault et Yves Brousseau, Département de géographie Université Laval
- (2) Didier M. (1990), Utilité et valeur de l'information géographique, *Economica*, STU, CNIG, 1990.
- (3) Denegre J. et Salge F. (1996), Les systèmes d'information géographique, *Que sais-je ?* n° 3122, PUF, 1996.
- (4) Goodchild M. (1997), What is Geographic Information Science? <http://www.ncgia.ucsb.edu/gisc/>
- (5) Pornon H. (1990), Systèmes d'Information Géographiques, des concepts aux réalisations. Paris STU, Hermès
- (6) GGR-18708 et GGR-60449, par Marius Thériault et Yves Brousseau, Département de géographie Université Laval

■ ■ ■ grandes administrations décident d'utiliser des SIG pour traiter, analyser et résoudre leurs différentes tâches. En partant des armoires à plans, puis de BDU (Banques de Données Urbaines), les systèmes informatiques de gestion de la cartographie se sont transformés en systèmes cartographiques comportant un nombre croissant de fonctionnalités de gestion et d'analyse. Quelques dates importantes à retenir lors de cette décennie : en 1981, ESRI lance le système ARC/INFO. En 1985, le GPS devient opérationnel, en 1986, le premier satellite SPOT est lancé (CNES) et MAPINFO est créé. En 1988, naissance de SMALLWORD et premières publications des hebdomadaires GIS World dédiés aux SIG.

Dans les années quatre-vingt-dix, les SIG ont connu un nouvel essor. Les nouveaux problèmes à régler sont la constitution de réseaux de SIG permettant des échanges d'informations très rapides. Alors qu'on employait jusqu'à présent surtout des données de type vecteur, les nouveaux SIG permettent de plus en plus d'intégrer des images numériques et d'autres types de données qui vont mener à des SIG de type hybride. Ces développements entraînent nécessairement des évolutions dans la dimension géométrique des données et aussi dans les méthodes d'accès aux données.

La photogrammétrie devient de plus en plus importante dans le domaine de la saisie des données en raison de la nature tridimensionnelle des mesures effectuées. Mais, ici aussi, les reconstituteurs analytiques vont être remplacés par des reconstituteurs numériques.

Comme autre révolution dans le domaine de la saisie des données, il faut aussi signaler le Global Positioning System (GPS) qui atteint sa maturité lors de cette décennie. A noter durant cette décennie : 1993, création de EUROGI (The European Umbrella Organisation for Geographic Information). 1999 : premier congrès de l'ISPRS (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing) Commission IV à Stuttgart (Allemagne) depuis la création d'une commission Cartographie et SIG en 1996.

Au début des années deux mille le milieu des SIG est en évolution exponentielle. La 3D devient un concept intégré, les données sont partagées, accessibles sur les réseaux étendus, consultables via internet. Les animations deviennent de plus en plus importantes : notamment les simulations, la réalité virtuelle, la réalité augmentée, etc.

Les langages de développement sont directement axés sur internet et sur la communication à travers les réseaux (java, VML, XML). Les bases de données comportent à la fois des données sémantiques et des données géométriques (Oracle avec cartouche Spatiale). Les données deviennent de plus en plus précises notamment avec des images satellitaires de très haute résolution. Les SIG deviennent également transportables sur le terrain, les bases de données et les cartographies sont chargées ou téléchargées sur des assistants personnels qui permettent des affichages et des mises à jour en temps réel. La téléphonie connaît également une explosion technologique. L'image se communique par les réseaux sans fils, les cartes et autres données géolocalisées sont transmises et interrogées en mettant en œuvre les mêmes techniques. L'aide à la navigation est un "gadget" de plus en plus utilisé pour les véhicules et se

fonde sur des technologies de SIG pour la localisation et le calcul d'itinéraires et sur le GPS pour le positionnement.

Le SIG est devenu une réalité incontournable lorsqu'il s'agit de travailler avec des données géolocalisées.

Le développement de ces nouveaux concepts et leur mise en œuvre sont poussées à un point tel que l'utilisateur puisse s'en servir de façon aussi conviviale que lorsqu'il se sert d'un ordinateur PC, même s'il a à faire à des systèmes d'une extrême complexité.

SIG en XYZ' et T

Pour retracer l'évolution des SIG dans le temps, nous pouvons également suivre la liste des thèmes publiés dans la revue XYZ depuis le premier numéro.

Le n° 1 de XYZ comportait déjà un article rappelant les prémices des SIG sous la forme du *"Rôle du topographe dans la direction d'un système de renseignements terrestres"*, P.-F. Dale, J.-L. Hollwey (traduit par le Colonel Corbeau).

En 1980, les XYZ n° 5 à 7 comportent des articles traitant de la *"Représentation graphique des données numériques"* (P. Cormier) et des *"Compromis entre représentation graphique et géomatique"* (B. Dubuisson), ainsi que sur *"Les modèles numériques de terrain [...] dans les études de projet d'aménagement"* (G. Gros).

Ce n'est que dans XYZ n° 16 que nous retrouvons le prochain article sur les SIG et notamment sur *"Les systèmes d'Informations Urbains. Démarche de la Communauté Urbaine de Dunkerque"* (M. Bisman). Ceux-ci sont repris lors du colloque de Lille relaté dans le n° 18 : *"Systèmes d'informations urbains"*, (A. Cridlig).

Dans le n° 17 précédent, *"L'informaticien et le cartographe"* (J.-P. Grelot) se rejoignent pour une collaboration étroite.

En 1984, le premier congrès international de l'AFT relate *"Les grandes orientations définies par la commission nationale de l'information géographique"*, (M. Sautreau). Puis les *"Systèmes d'information du territoire"*, (J.-J. Chevallier) XYZ n° 22, sont décrits. Un intérêt particulier est donnée aux technologies parallèles comme *"La photogrammétrie : une technique d'acquisition de données pour les systèmes d'informations géographiques"*, (E. Van Der Zee).

En 1987, XYZ n° 35, *"La banque de données urbaines de Mulhouse et ses relations avec le cadastre"*, (B. Daull), est un exemple d'application de SIG dans une collectivité territoriale qui sera repris dans le XYZ n° 57 sous *"La BDU de Mulhouse. L'expérience de la ville en matière de SIG"*, (B. Daull).

Dans la revue n° 41-42, *"Les bases de données topographiques et cartographiques de l'IGN"*, (L. Pressence, C. Faad) sont décrites en détail, avant de revenir sur les *"Systèmes d'informations numériques du territoire"*, (M. Eichhorn) dans la revue n° 43-44.

Dans la revue n° 51, les SIG font une entrée remarquée. Après avoir décrit *"Les SIG ? Deux ou trois choses que je sais d'eux"*, (J.-P. Cheylan), il faut en donner *"Quelques précautions d'usage des SIG"*, (S. Motet) et essayer de s'en faire une idée

claire, car aux yeux de certains la question *"SIG: panacée, mythe, élixir parégorique... ou simple outil de travail ?"*, (H. Pornon) n'est pas encore tranchée. Mais il s'agit de travailler ensemble et d'utiliser le *"SIG dans les villes"* à bon escient sans qu'il ne génère *"la querelle des topographes et des urbanistes"*, (H. Pornon, n° 53), tout en exploitant au maximum *"Une grande variété d'applications"*, (H. Pornon, n° 54).

"Les événements de l'année 92 dans le domaine des SIG", (H. Pornon, n° 55), puis *"Les SIG de 1993 à 1994"*, (H. Pornon, n° 57) montrent l'évolution des SIG et notamment celle des *"SIG dans le secteur privé, de nouvelles opportunités ?"*, (H. Pornon). La bibliographie dans le domaine des SIG commence à s'étoffer avec plusieurs *"ouvrages sur les SIG"* (n° 56) et des thèmes comme *"La qualité des données géographiques"*, (H. Pornon) et le *"Partenaire du SIG: l'orthophoto numérique"*, (Dr J. Loodts, D. Mendel) sont développés. La *"Qualité et données géographiques"* sera le thème de la 6^e journée nationale de la recherche géographique (CNIG) (n° 65).

En 1993, le CNIG décrit son *"Réseau de suivi et programme de recherche-développement des SIG"* (XYZ n° 57).

Dans XYZ n° 60, *"BDU-SIG"* restent encore deux notions distinctes mais sont utilisés pour *"l'adduction en eau potable dans le district de Reims"*, (O. Baudot).

L'histoire suit ensuite son cours: *"SIG: vecteur et raster, une évolution naturelle"*, (M. Bernard), et ce sera le moment de faire *"Le point sur la norme EDIGEO et son utilisation"*, (B. Cholvy et al., n° 63) repris un peu plus tard (XYZ n° 67) *"Le point sur la certification des échanges EDIGEO"*, (J. Flochel), alors que du côté de l'*"IGN: la BDTopo était au MICAD"*, (J.-P. Ducuing).

En 1995, alors que l'on s'intéresse à la *"Formation aux SIG (en marge du salon MARI)"*, (R. Bauche) et à la *"Diffusion et échange de données géomatiques, Mâcon, 10 et 11 mai 1995, cours COMETT"*, (M. Rognon), on est en droit de se demander: *"Les SIG ont-ils atteint leur majorité ?"*, (M. Bernard, n° 64).

Dans le n° 65 de XYZ, on aborde la question d'*"Un SIG pour les petites communes"*, (J.-L. Desgrandchamps), et surtout celle de son *"intérêt pour une commune"*, (F. Bellanger, n° 89), avant d'avoir des exposés sur *"Le SIG de la Communauté Urbaine de Strasbourg"*, (H. Hugel, n° 67 à 69) et sur *"Un système d'information et de gestion urbaine: Le Havre"*, (P. Laurent, n° 71) et également sur *"Le SIG de la Communauté Urbaine d'Arras"*, (S. Stolarczyk et al., n° 75) puis sur *"Le système d'information de la ville du Havre"*, (F. Perdrizet, n° 82) et *"Un SIG pour Vannes"*, (B. Le Gall, n° 83).

La composante logicielle est importante dans le SIG et l'*"Evolution de l'offre logicielle en SIG: 1992-1997"*, (H. Pornon, n° 70), puis *"Le marché des SIG, évolutions et perspectives"*, (H. Pornon, n° 75) permettent de faire le point sur les possibilités qu'offrent les systèmes. A ce moment là, nous sommes en pleine explosion du réseau *"internet et la géomatique"*, (M. Bernard) en profite.

Différents témoignages sur la mise en place d'applications spécifiques comme *"SIG et détection archéologique"*, (B. Chazaly et al., n° 72), *"SIG Archéologie: Le site gallo-*

romain du Vieil-Evreux (Eure)", (L. Aubry, n° 88), ou *"Les SIG dans les métiers de l'eau et de l'assainissement"*, (C. Westphal et al., n° 74), ou encore *"Un SIG solidaire au pays de Lorient"*, (J. Coché et al., n° 79) augmentent. Les acteurs du monde des SIG doivent veiller à la *"Valorisation et (la) diffusion des données géographiques (du canton de Genève)"*, (T. Morand et al., n° 80), ce qui est d'ailleurs repris lors du (SIG), premier colloque informatique cartographique et collectivités locales, (F. Morel, n° 73).

Mais, il est temps de s'arrêter un moment sur les *"Systèmes d'information géographique, état, développement et perspectives"*, (A. Carosio, n° 74), alors que *"L'information géographique (est) vraiment pour tous"*, (J.-L. Desgrandchamps, n° 75) et qu'il y a même *"Une nouvelle place pour l'information géographique"*, (J.-C. Lummaux, n° 79).

Au même moment, le problème de la gestion des données dans le système devient crucial et on assiste à *"(Information géographique et SGBD), (la) chronique d'une convergence annoncée"*, (M. Bernard, n° 76), puisque les nouveaux développement concernent *"Les serveurs de données spatiales ou l'information géographique partagée"*, (E. Berck et al., n° 81). Le rôle de la *"Modélisation géométrique et sémantique en milieu urbain"*, (M. Koehl, n° 79 et 81) est également souligné pour le développement de systèmes performants.

Puis une nouvelle évolution apparaît avec *"Un SIG nomade - Arcpad"*, (O. Laugier, n° 83), et très rapidement l'*"Apport d'un SIG nomade pour cartographier la végétation naturelle de l'île de la Réunion"*, (H. Durand, n° 89) en est une application directe.

Le SIG devient alors l'outil universel pour la gestion et l'analyse des différents phénomènes géolocalisés. Il est utilisé comme *"Le système d'information sur les évolutions du lit de la Loire"*, (D. Reinbold et al., n° 82), *"au service de l'exploration pétrolière chez TotalFinaElf"*, (J.-M. Amouroux, n° 88), *"au service d'une étude nationale sur l'impact des mines antipersonnel"*, (F. Cussigh et al., n° 88).

Même en cas de catastrophe l'outil est utilisé: c'est le cas lors de l'*"Evènement: Utilisation des photographies aériennes, des cartes ou plans et d'un SIG lors de la catastrophe d'Enschede (Pays-Bas)"*, (Drs. P. Hofstee et al., n° 87).

Aucun domaine n'y échappe: l'*"Application à la cartographie d'un réseau"*, (B. Legeard et al., n° 89) est considérée comme classique, mais même *"L'office National Interprofessionnel des Céréales (ONIC)"* s'intéresse aux "SIG" (L. Roman, n° 90). Si *"La mouche tsé-tsé (est) sous haute surveillance"* (D. Laffly et al., n° 92) grâce au SIG, celui est utilisé comme *"un outil au service du développement durable au parc Naturel régional des Vosges du Nord"*. (O. Reis, n° 92). L'*"Atlas dynamique sur le web, des pollutions associées au naufrage"*, (H. Durand, n° 90) montre également les potentialités des SIG dans le domaine de la diffusion des informations sur le web, ce qui est repris par *"Un système d'information géographique pour une cartographie historique de Strasbourg, de la carte à l'immeuble"*, (T. Hatt, n° 92).

(7) Revues XYZ de l'Association Française de Topographie

■ ■ ■ L'outil "GéoStation la solution géomatique de gestion des domaines skiables développée par Orodia sur le SIG GeoConcept". (F. Collinse et al., n° 93) montre encore une application intéressante.

"Les outils cartographiques et SIG développés dans le cadre des études hydrauliques à la compagnie nationale du Rhône", (M. Garcia, n° 93) et dans le cadre des "Délimitations maritimes et extension du plateau continental", (F. Bizet et al.) montrent les possibilités de développement de propres outils dans un environnement SIG

Enfin, "La gestion du réseau de télécommunications de Fibres Optiques Défense", (R. Leroy, n° 93) et le "Projet de développement du SIG du CERN. Application à la gestion du réseau de fibres optiques." (C. Carneiro et al., n° 99) sont deux applications types SIG orientés réseaux.

Si ces articles relatent souvent des expériences abouties, des mises en place réussies, des utilisations ou des applications particulières de SIG, ils sont les témoignages vivants d'un domaine dont l'évolution, voire la révolution est fortement liée aux avancées technologiques dans les milieux connexes tels que l'informatique, les méthodes d'acquisition de données, les possibilités de développement d'outils informatiques, les performances des matériels et périphériques, les technologies de stockages et d'accès aux données, mais également la baisse des coûts du matériel informatique, des systèmes d'exploitation et des bandes passantes en télécommunication.

Les SIG aujourd'hui, demain

D'après R. F. Tomlinson⁸, les facteurs qui auront les impacts les plus forts sur l'évolution des SIG de demain peuvent être regroupés dans les trois catégories de fonctionnalités, communication et gestion.

Du point de vue des fonctionnalités les recherches & développements sont appliquées à la modélisation et la simulation et notamment dans le cas de la visualisation de système complexes aussi bien virtuels que physiques. Les fonctionnalités des SIG du futur devront intégrer des processus de modélisation complets. Ceux-ci permettront d'une part, d'effectuer l'étude et l'analyse de systèmes spatiaux complexes et d'autre part, de pouvoir effectuer des prévisions sur les événements, les phénomènes et les conséquences de certaines actions, mais permettront enfin et avant tout de les comprendre.

Du point de vue de la communication et de l'échange de données, les points-clés des futures décennies consisteront dans la sécurité, la qualité et l'intégrité des données mais aussi dans les possibilités de leur archivage et de leur propriété ainsi que les principes éthiques sur leur utilisation que l'augmentation de l'accès physique aux données va engendrer.

Du point de vue de la gestion des SIG, les fonctionnalités futures permettront d'analyser les processus organisationnels, de reconnaître et de définir les nouveaux produits d'information nécessaires à une organisation, de modéliser le flux de données et les analyses associées et d'implémenter des systèmes qui seront entièrement intégrés dans les objectifs

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

stratégiques de l'organisation. Pour les SIG de demain, certaines notions parfois encore floues aujourd'hui vont certainement être à l'origine de révolutions encore plus importantes dans le domaine de l'information en général et de l'information géographique en particulier.

Ces évolutions concerneront sûrement :

- l'interactivité du SIG, des utilisateurs,
- l'intégration des technologies multimédia dans les SIG permettant notamment la prise en compte ou la stimulation des différents sens de l'utilisateur,
- le développement de l'utilisation et l'intégration des technologies de réalité virtuelle dans les SIG,
- le développement d'interface en langage naturel,
- l'intégration accrue de la dimension temporelle dans le SIG,
- l'OpenGIS,
- le SIG temps-réel pour la navigation, l'aide au déplacement, la gestion de l'espace, des risques,
- l'interopérabilité des systèmes,
- les bases de données géographiques réparties,
- l'IHM multimodale,
- la décision coopérative,
- le SIG participatif,
- la gestion des flux et des réseaux,
- le couplage de modèles,
- le data mining spatial,
- la modélisation prédictive,
- la simulation dynamique,
- de nouvelles applications, etc.

Depuis la création du concept, le SIG a pleinement profité des quatre révolutions majeures dans le domaine de l'informatique : les stations de travail, les micro-ordinateurs, les réseaux, la mobilité. Aujourd'hui, le SIG est dans une phase de développement durant laquelle il utilise, profite et intègre des concepts technologiques développés en parallèle pour d'autres besoins. Demain, le SIG sera utilisé comme plateforme de base pour tous les types de traitement de l'information géographique. Après-demain le SIG disparaîtra, arrivé à la fin comme dans tout du cycle de vie d'un du concept. Soit parce qu'il sera à son tour intégré dans un produit ou dans des méthodes, soit parce qu'il sera remplacé par des nouvelles technologies plus performantes. En attendant, les SIG ont encore un bon bel avenir devant eux. ●

Contact

Mathieu KOEHL

Maître de Conférences à l'INSA de Strasbourg, Spécialité Topographie - Mathieu.Koehl@insa-strasbourg.fr
<http://www.insa-strasbourg.fr/topographie/>

ABSTRACT

The aim of this paper is to relate in an historic way the development of the well known GIS. After a review of the multiple definition of GIS, the historic development is compared to the themes of different papers published in the XYZ journal.

Amélioration du champ de pesanteur et du géoïde autour de la Corse par gravimétrie aéroportée

■ H. DUQUENNE - A.V. OLESEN - R. FORSBERG - A. GIDSKEHAUG

Trois modèles du géoïde couvrant la Provence et la Corse ont été récemment publiés : QGF96, EGG97 et QGF98. Des comparaisons de ces modèles avec des points GPS nivelés du réseau géodésique français ont montré que les anciennes données gravimétriques marines sont entachées d'erreurs grossières, atteignant plusieurs dizaines de milligals. En février 2001, plusieurs organismes (KMS, Université de Bergen, ESGT, IGN, INSU) ont entrepris un levé aérien, dans le but d'améliorer la couverture gravimétrique dans cette région. Le lot de données final comprend 1458 valeurs filtrées d'anomalies de pesanteur réparties le long de 2 510 km de lignes de vol. Une analyse des écarts à 25 points de croisement conduit à une précision interne de 2,6 mgal. Des comparaisons de ces nouvelles données avec les mesures marines anciennes de la base du Bureau Gravimétrique International (BGI) et avec des anomalies dérivées d'altimétrie par satellite (grilles de KMS, de CLS et de l'Université de Californie) ont permis de retrouver des erreurs importantes dans les anciens levés et fournissent une estimation externe de la précision. Un nouveau lot de données gravimétriques denses et validées, incluant des données terrestres, a été construit, à partir duquel un nouveau modèle du géoïde pour la Corse a été calculé. Une validation finale a été obtenue par comparaison du géoïde avec 51 points GPS nivelés des réseaux français du continent et de la Corse.

Durant la dernière décade, trois modèles du géoïde couvrant la France et la Corse ont été publiés : QGF96, EGG97 (Denker et Torge 1998), QGF98 (Duquenne H. 1998). Les modèles QGF et EGG97 ont été calculés indépendamment, par des programmes et des méthodes différents : retrait-restauration avec combinaison simple pour les premiers, combinaison spectrale pour le dernier. Cependant, des comparaisons des modèles de géoïdes avec des points nivelés du réseau géodésique français ont mis en évidence des erreurs importantes en Provence, où les géoïdes calculés étaient 0,60 m trop haut (voir figure 1 et table 5), et surtout en Corse où les erreurs dépassaient 1 m. Après des vérifications soignées du réseau géodésique par l'Institut Géographique National (Garayt et Nocquet 2000) et des données gravimétriques terrestres (Debeglia 1998), le doute s'est porté sur la gravimétrie marine. En

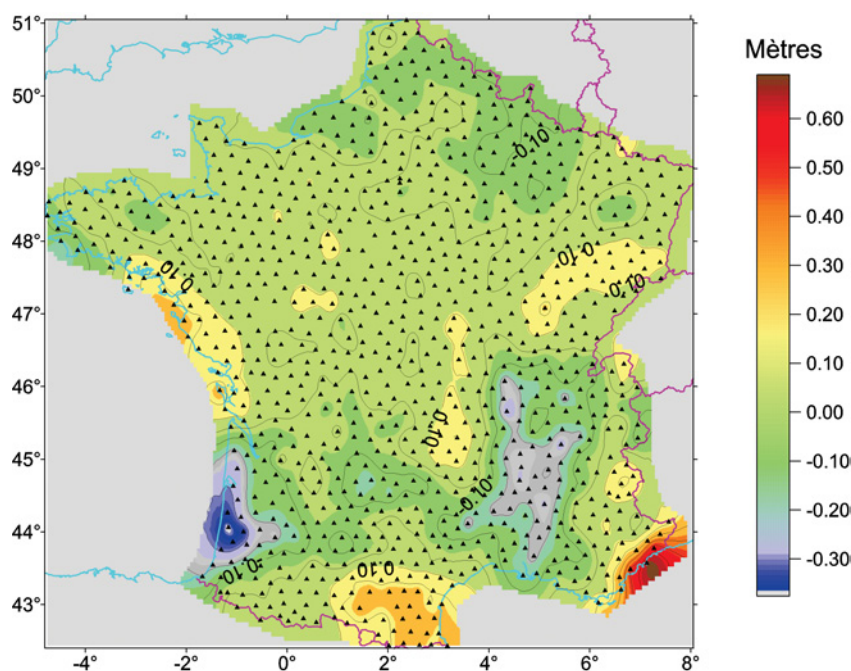


Figure 1 : Résidus de la comparaison de QGF98 (rayon de Stokes 2°) avec les points GPS nivelés du RGF (triangles noirs). Noter les valeurs importantes dans le sud-est de la France.

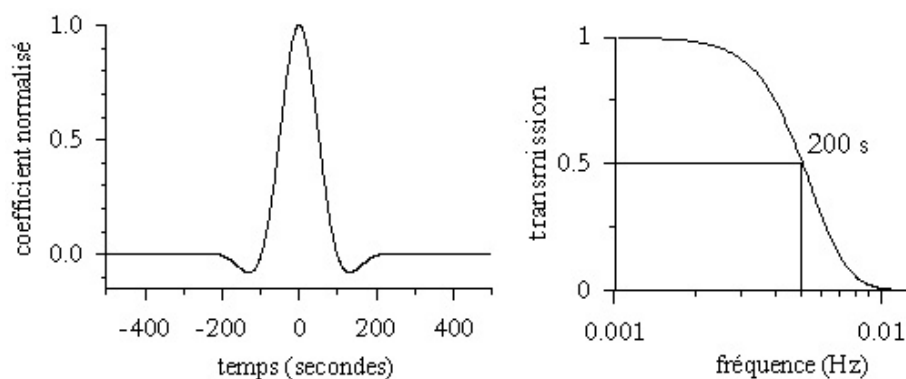


Figure 2: Filtrage des données gravimétriques. Réponse impulsionnelle (à gauche) et transmission (à droite).

■ ■ ■ Méditerranée, les trois modèles du géoïde ont utilisé le même lot de données gravimétriques résultant de la numérisation des cartes de Morelli par l'Institut für Erdmessung (Behrend et al. 1996). A cette époque, il semblait que c'était le meilleur choix pour deux raisons. D'une part, Behrend et al. ont trouvé un bon accord entre les données de Morelli et les anomalies de pesanteur déduites d'altimétrie, sauf à proximité des côtes, ce qui a été logiquement imputé à l'altimétrie. D'autre part, les anciens levés marins conservés dans la base de données du BGI étaient très disparates. En décembre 2000, R. Forsberg proposait d'utiliser l'avion et le gravimètre prévu pour la campagne CAATER en Crête, pour entreprendre un levé aérien dans la zone critique. C'était une bonne occasion d'améliorer le géoïde en Provence et en Corse.

Le levé gravimétrique aérien

Les opérations aériennes se sont déroulées du 20 au 22 février 2001. L'avion était le Fokker 27 "ARAT" (avion de recherche atmosphérique), appartenant à l'IGN et affrété par l'Institut National des Sciences de l'Univers. Il était équipé du gravimètre Lacoste & Romberg de l'Université de Bergen, de deux récepteurs GPS (Trimble et Javad) et d'un système de navigation inertielle prêté par KMS (le service danois du cadastre), en plus du système propre à l'avion. Six stations GPS au sol ont été utilisées : deux perma-

nentes (IGN et CNRS), et quatre temporaires (ESGT et KMS). Les données ont été recueillies pendant 8,5 heures de vol à 300 mètres d'altitude, à la vitesse de 310 km/h. 25 minutes de données ont été perdues pour des raisons diverses. Les trajectoires de l'avion ont été calculées à la fois par KMS avec le logiciel GPSurvey de Trimble et à l'ESGT en utilisant GAFNAV. En terme de qualité d'estimation des accélérations, ces deux logiciels sont aussi performants. Les deux programmes ont fourni des résultats légèrement meilleurs avec les mesures du récepteur Trimble. Les différences sont cependant insignifiantes pour ce qui concerne l'estimation des anomalies de pesanteur. Il existe cependant deux exceptions.

- 1) Le récepteur Javad n'a pas fonctionné normalement le premier jour au voisinage du temps GPS 208572, faussant l'estimation des accélérations.
- 2) Le dernier jour, les trajectoires basées sur les mesures du récepteur Trimble ont présenté des manques, au moins lors du calcul direct. Finalement, pour la détermination des anomalies de pesanteur, les solutions provenant des observations du récepteur Trimble, traitées avec GRAFNAV ont été préférées pour les deux premiers jours, tandis

que les mesures du récepteur Javad calculées avec GPSurvey ont été retenues pour le dernier jour. Pour plus de détail, on peut consulter (Duquenne F. 2001), (Olesen 2002) et (Duquenne et al. 2002).

Les observations du gravimètre ont été traitées par KMS. Les anomalies de pesanteur ont été obtenues, en omettant les termes du second ordre, par :

$$\Delta g = A_z - A_{z0} - h'' + \delta g_{\text{Eötvös}} + \delta g_{\text{tilt}} + g_0 - \gamma_0 - (h - N) \partial \gamma / \partial h \quad (1)$$

où A_z est la lecture du gravimètre, A_{z0} la lecture au point de référence à l'aéroport, h'' l'accélération verticale issue du GPS, $\delta g_{\text{Eötvös}}$ la correction d'Eötvös, g_0 la valeur de la pesanteur au point de référence, γ_0 la pesanteur normale, h la hauteur ellipsoïdale obtenue par GPS, N la hauteur du géoïde déduite du modèle EGM96, et δg_{tilt} la correction de non-horizontalité du bras du gravimètre, voir (Olesen et al. 2000).

La position utilisée dans la formule (1) est celle de la masse d'épreuve du gravimètre. Cette position est obtenue en ajoutant à celle de l'antenne GPS un vecteur dépendant du temps. Les variations de direction de ce vecteur (cap, roulis, tangage) peuvent être estimées à partir de données inertielles. Les corrections correspondantes apportées à la pesanteur et issues des systèmes de navigation de KMS et de l'avion sont très similaires, et les deux ensembles de mesures peuvent être utilisés pour les réductions de pesanteur.

Les valeurs de pesanteur obtenues de l'équation (1) ont été traitées par un filtre passe-bas. Le filtre est principalement caractérisé par le point pour lequel le facteur de transmission vaut 0.5 (figure 2). Un filtre de 200 secondes a été utilisé, ce qui est une durée standard pour les levés gravimétriques aériens réalisés par KMS (Olesen et al. 2000). Avec une vitesse de 310 km/h, cela cor-

Tableau 1 : Points de croisement des lignes de vol

Nombre	Ecart minimal	Ecart maximal	emq
25	-6.8 mgal	7.2 mgal	3.7 mgal

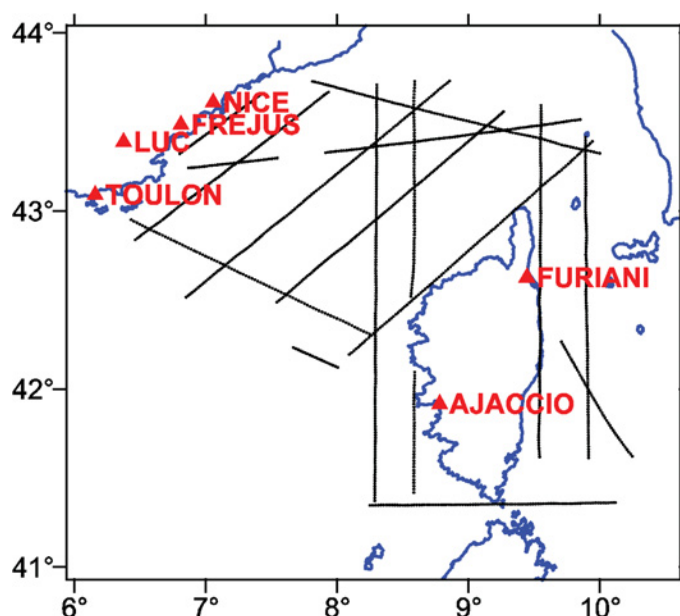


Figure 3: Trajectoires utiles du levé aérogravimétrique. Les triangles rouges représentent les stations GPS au sol.

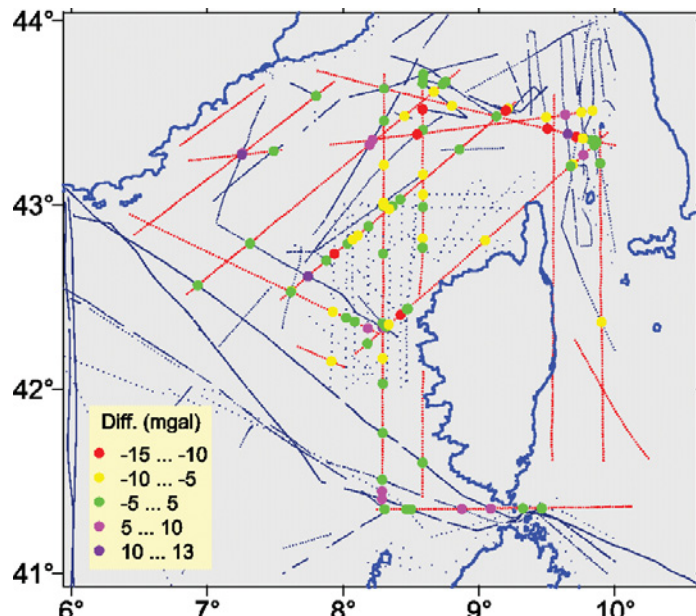


Figure 4: Points de croisement entre lignes de vol (lignes rouges) et croisières (lignes bleues). Unités: mgal.

Tableau 2: Statistiques des écarts aux points de croisement entre croisières et lignes de vol, après rejet des croisières aberrantes. Unité : mgal.

Identifiant source BGI	Nombre de crois.	Ecart moyen	EMO	Ecart min.	Ecart max.
61020315	4	0.7	4.6	-4.4	5.7
61021992	3	1.1	1.5	0.3	2.5
61021993	45	-3.7	8.2	-14.7	12.4
65170006	28	-3.7	6.2	-12.1	5.6
65100027	1	1.2	1.2	1.2	1.2
65100029	9	3.4	4.1	0.9	6.9
65100115	4	4.3	4.4	3.3	5.5
65100138	2	2.6	4.1	-0.5	5.7
65100144	2	2.0	5.8	-3.4	7.4
Total	98	-2.1	6.8	-14.7	12.4

Tableau 3: Statistiques des écarts d'anomalies de pesanteur entre le levé aérogravimétrique et l'altimétrie par satellite. Unité: mgal.

Grille	Moyenne des écarts	Ecart type	Ecart	Ecart max.	Nombre de points
KMS99	-1.7	8.6	-40.3	35.0	1432
KMS01	-3.4	11.0	-52.6	39.2	1458
Sandwell	-1.7	8.6	-38.5	20.7	1458
CLS	0.4	16.7	-73.5	53.1	1448

respond à une résolution (demi-longueur d'onde) de 8,5 km.

Le lot de données final est représenté sur la figure 3. Il comprend 1458 valeurs à 20 secondes d'intervalle, soit 2510 km de données à la vitesse de 310 km/h. L'écart moyen quadratique des écarts aux points de croisement (sans soustraction de biais ni ajustement) atteint 3,7 mgal. Si on suppose que les erreurs ne sont pas corrélées entre lignes de vol, on peut conclure à un bruit de mesure de 2,6 mgal. L'analyse des points de croisement est résumée par le tableau 1.

Evaluation des données marines et de l'altimétrie satellitaire

En raison de la bonne précision du levé aérogravimétrique, il a été décidé de l'utiliser comme une référence pour valider les données gravimétriques marines anciennes, et pour évaluer des grilles d'anomalies issues d'altimétrie satellitaire. Les données marines consistent en d'anciennes croisières italiennes et françaises conservées dans la base de données du BGI. Elles sont réputées très douteuses en raison de mauvaises mesures ou de corrections

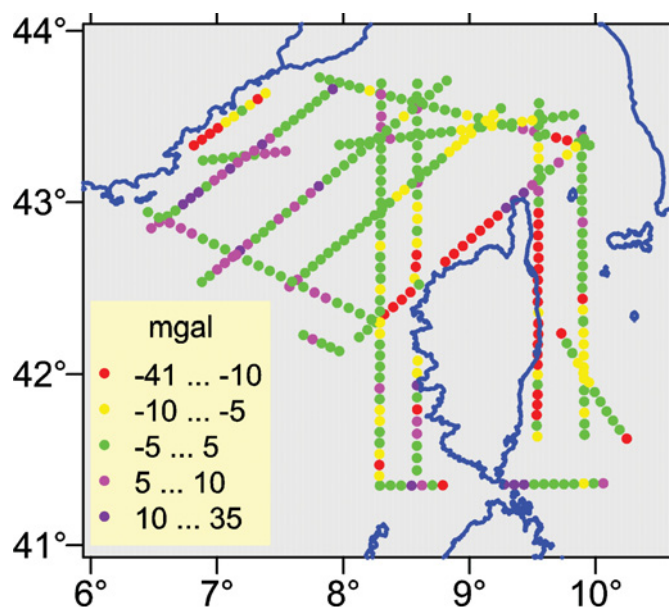


Figure 6 : Comparaison de la gravimétrie aéroportée et de la grille KMS99. Un point sur 5 est représenté.

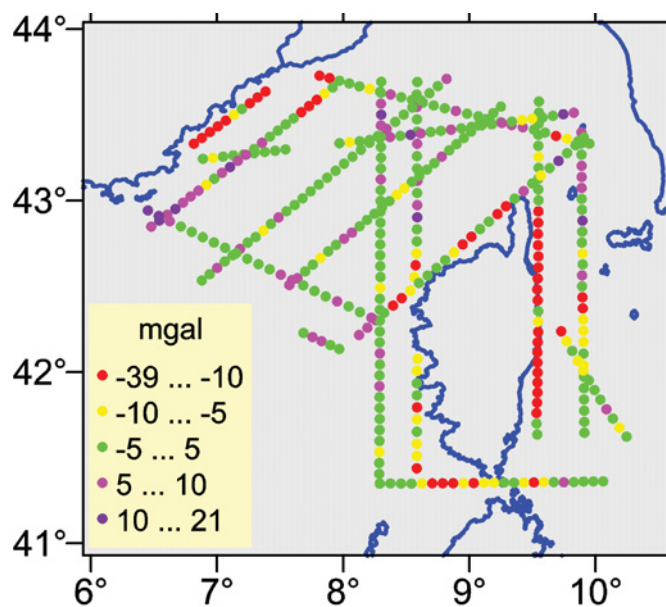


Figure 7 : Comparaison de la gravimétrie aéroportée et de la grille de Sandwell. Un point sur 5 est représenté.

et réductions erronées. En premier lieu, les croisières complexes ont été divisées en segments rectilignes. Puis les écarts entre les anomalies de pesanteur aux points de croisement des croisières et des lignes de vol ont été calculés, et les croisières présentant des écarts anormaux ont été rejetées. Le tableau 2 et la figure 4 donnent les résultats de cette comparaison. Il faut

noter que les données marines n'ont pas été filtrées, de sorte que les écarts incluent les variations naturelles de l'anomalie à une résolution inférieure à 8,5 km.

Après rejet des croisières présentant des écarts supérieurs à 15 mgal, l'écart moyen quadratique (EMQ) des écarts vaut 6,8 mgal. De cette valeur, on peut déduire une précision des données

marines d'environ 6,3 mgal. Les statistiques sont dominées par deux croisières (numérotées 61021993 et 65170006) bien situées par rapport au levé aérien. Elles sont malheureusement biaisées de manière significative et de médiocre précision. L'histogramme de la figure 5 montre que la distribution des écarts aux points de croisement n'est pas normale, peut-être en raison du processus de rejet.

Quatre grilles d'anomalies gravimétriques dérivées d'altimétrie par satellites étaient disponibles : KMS99, KMS01, la grille de l'Université de Californie (Sandwell et Smith 1997) et la première version d'une grille produite par CLS, une filiale du CNES. Ces grilles ont été comparées au levé aérien pour estimer leur précision et la distance minimale de la côte à laquelle elles sont utilisables. Il est en effet connu que l'altimétrie par satellite ne donne pas de résultats satisfaisants dans une bande côtière dont on évalue généralement la largeur à 100 km environ. Le tableau 3 présente les statistiques de ces comparaisons. On a calculé un écart entre le levé aérien et les grilles en chaque point du levé aérien. Sur les terres émergées, les grilles KMS01 et Sandwell sont complétées par des valeurs tirées du

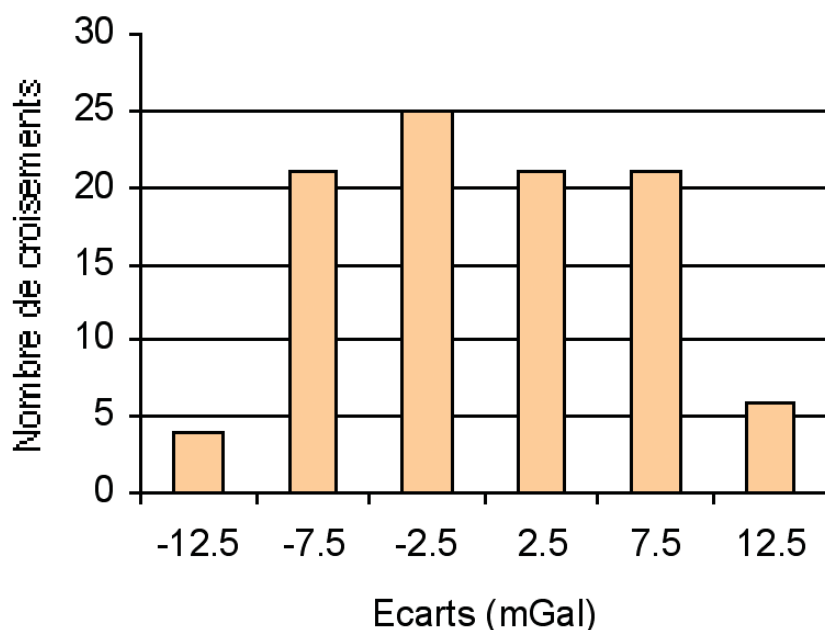


Figure 5 : Histogramme des écarts des anomalies de pesanteur aux points de croisement entre lignes de vol et croisières, après rejet de croisières aberrantes.

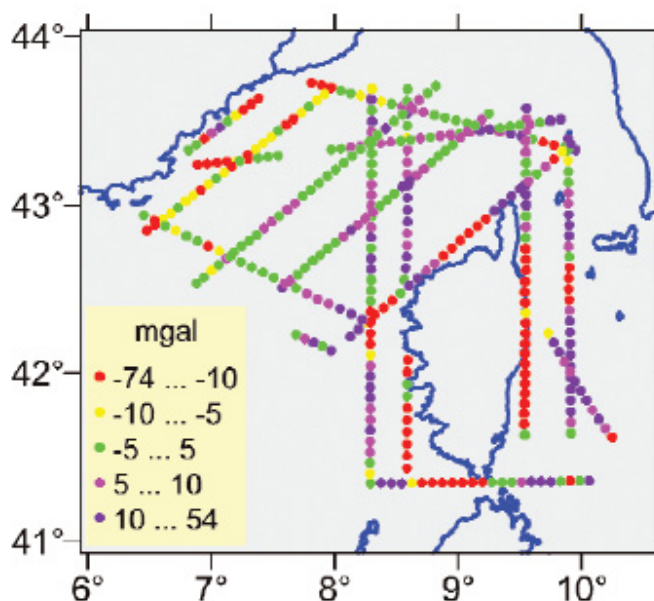


Figure 8 : Comparaison de la gravimétrie aéroportée et de la grille CLS. Un point sur 5 est représenté.

modèle de champ global EGM96. On peut donc interpoler dans ces deux grilles plus près des côtes. Cela explique les légères différences entre les nombres de points de comparaison. Ceci pourrait avantager artificiellement les grilles KMS99 et CLS, dans lesquelles on ne peut pas interpoler à moins de 2 km des côtes environ. Les grilles KMS99 et Sandwell donnent les meilleurs résultats avec une précision de 8,2 mgal, déduction faite du bruit de mesure du levé aérien. La grille CLS semble nettement moins performante que les autres.

Cette opinion doit être atténuée au regard des figures 6 à 8, qui montrent la distribution des écarts des grilles KMS99, Sandwell et CLS avec le levé aéroporté. Clairement, cette dernière est affectée d'erreurs importantes à proximité des côtes, alors qu'en haute mer elle donne des résultats au moins équivalents à ceux d'autres grilles. En fait, près des côtes, les grilles KMS et Sandwell incorporent avec un poids variable des anomalies en provenance du modèle global de champ EGM96: cette technique assure un meilleur raccordement entre la haute mer et les terres, mais ne résout pas pour autant le problème de la fiabilité des grilles altimétriques dans la bande côtière. La lar-

geur de la bande côtière dans laquelle les grilles sont utilisables est un paramètre important, particulièrement pour les déterminations du géoïde. En haute mer, la précision des grilles est de l'ordre de 5 mgal. La figure 8 montre que, pour la grille CLS, la précision se dégrade au niveau de 10 mgal à 75 km des côtes et parfois dès 50 km pour atteindre au pire 74 mgal. On peut en conclure que, dans la zone de ce test, on peut raisonnablement utiliser les grilles altimétriques à plus de 50 à 75 km des côtes, en conservant une précision de 5 mgal.

Dans le but de valider les croisières du BGI et de confirmer la précision des grilles issues de l'altimétrie par satellite, on a comparé ces données en dehors de la zone du levé aérogravimétrique. La tâche a été facilitée par les validations

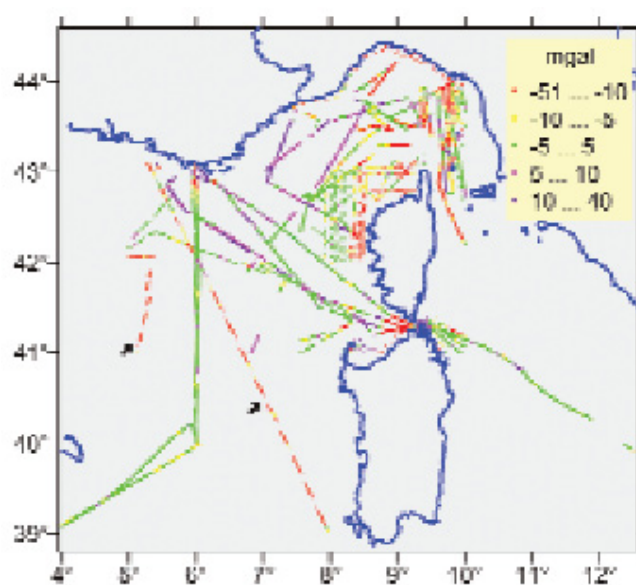


Figure 9 : Ecart des anomalies de pesanteur issues de la base du BGI et de la grille KMS99. Les flèches noires indiquent deux croisières biaisées.

précédentes, les croisières erronées ayant été rejetées. La figure 9 représente les écarts d'anomalies de pesanteur entre les données marines de surface et la grille KMS99. Elle met en évidence deux croisières en haute mer présentant des biais importants: elles ont donc été éliminées. Cette figure confirme aussi que l'altimétrie par satellite ne convient pas pour estimer des anomalies de pesanteur à moins de 50 à 75 km des côtes. Une carte analogue a été obtenue pour la grille de Sandwell, elle n'est pas très différente de celle de la figure 9. Les statistiques de comparaison des données marines du BGI avec les quatre grilles altimétriques sont données par le tableau 4. Dans la zone étudiée, et considérant les données marines validées comme une base de comparaison, la grille de Sandwell semble la

Table 4 : Statistiques des différences d'anomalies de pesanteur entre données marines et altimétrie satellitaire. Unité : mgal.

Grille	Moyenne des écarts	Ecart type	Ecart min.	Ecart max.	Nombre de points
KMS99	-0.6	9.3	-50.4	39.2	9896
KMS01	-1.2	10.5	-74.3	46.9	9896
Sandwell	-1.0	7.9	-46.7	37.1	10298
CLS	-0.3	11.7	-62.8	63.4	9896

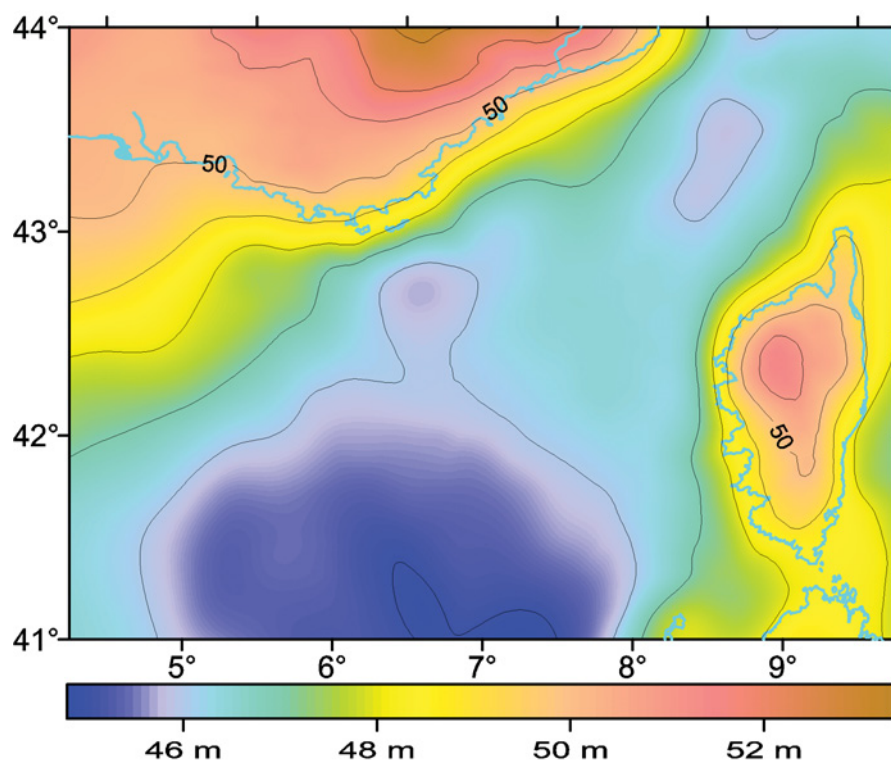


Figure 10: Le modèle de quasi-géoïde QGC02A.

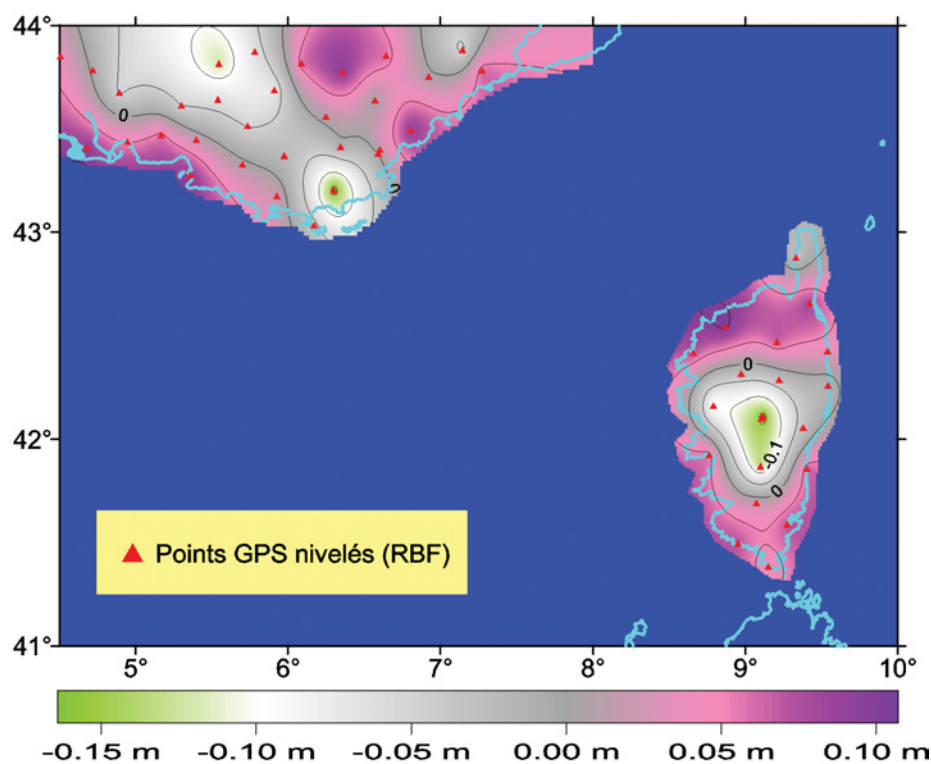


Figure 11: Résidus de la régression linéaire de QGC02A sur 2 ensembles de points GPS nivelés du RBF.

plus précise, bien que légèrement plus biaisée que KMS99. KMS99 est légèrement meilleure que KMS01. La grille CLS donne de bien meilleurs résultats que dans le test précédent (voir tableau 3), car l'échantillon de points est ici majoritairement en haute mer, donc plus favorable.

Détermination du géoïde

Les données gravimétriques précédemment validées ont été utilisées pour calculer un modèle de quasi-géoïde. Un ensemble de données a été constitué, comprenant des données terrestres, le levé aérien, les données marines validées (sans filtrage ni ajustement). Des anomalies issues de la grille de Sandwell ont été incorporées aux endroits manquant d'autres données, mais seulement si la distance à la côte dépassait 50 km. La méthode de retrait restauration dans sa variante du terrain résiduel (Forsberg 1994) a été employée. Les anomalies à l'air libre ont été réduites par retrait des contributions du modèle de champ EGM96 et du terrain résiduel. Une grille des anomalies de pesanteur résiduelles a été interpolée, avec une taille de cellule de $45'' \times 60''$, dans les limites: $39^\circ \leq \varphi \leq 46^\circ$, $1.5^\circ \leq \lambda \leq 12.5^\circ$. La partie à courte longueur d'onde des anomalies d'altitude a été déterminée par l'intégrale de Stokes, avec un rayon de 2° .

Enfin, les effets du terrain résiduel et du modèle global ont été restaurés. Le résultat est une grille d'anomalies d'altitude (quasi-géoïde) appelée QGC02A (figure 10). Sa résolution est de $1.5' \times 2'$. Elle couvre la région: $41^\circ \leq \varphi \leq 44^\circ$, $1.5^\circ \leq \lambda \leq 12.5^\circ$. QGC02A et l'ancien modèle QGF98 ont été calculés de la même façon. Les seules différences concernent le modèle de champ (EGM96 au lieu de OSU91) et les données gravimétriques marines et aériennes.

Pour valider le nouveau modèle de quasi-géoïde et le comparer aux solutions existantes, on a comparé chaque modèle à deux ensembles de points GPS nivelés appartenant au réseau géodésique français RGF: le premier en Provence, le second en Corse. Dans les

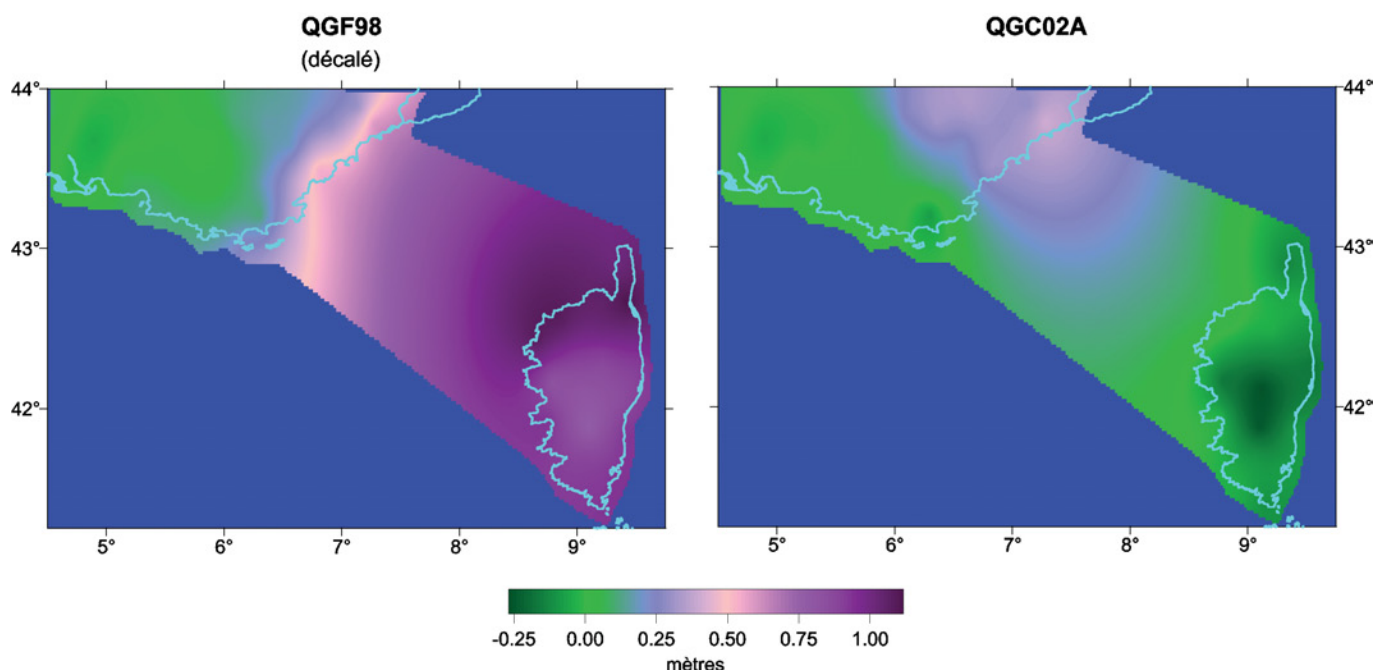


Figure 12: Ecart entre géoïdes gravimétriques et points GPS nivelés.

A gauche, QGF98 décalé pour être compatible avec QGC02A dans la partie nord-ouest. A droite, QGC02A.

deux cas, un ajustement à 3 paramètres a été réalisé entre chaque quasi-géoïde et les anomalies d'altitude calculées à partir du nivellement et du GPS, en utilisant l'équation :

$$\zeta_{GPS-Lev,i} - \zeta_{Grv,i} = a + b(\varphi_i - \varphi_0) + c(\lambda_i - \lambda_0)\cos\varphi + v_i \quad (2)$$

$\zeta_{GPS-Lev,i}$ et $\zeta_{Grv,i}$ sont les anomalies d'altitude au point de coordonnées géographiques φ_i, λ_i issues d'une part du réseau géodésique et du nivellement, et d'autre part du quasi-géoïde. φ_0, λ_0 sont les coordonnées du centre de la zone ajustée. a est un biais local constant, b et c sont des pentes vers le nord et l'est, respectivement. Le tableau 5 fournit les

résultats. Les biais, la précision et la distribution des résidus obtenus en Corse avec QGC02A (figure 11) sont quelque peu décevants. La corrélation des résidus avec l'altitude semble évidente. Cependant, les biais supérieurs à 1 m obtenus avec le modèle EGG97 est maintenant réduits à 0,185 m. Le signe et la valeur des résidus indiquent que l'erreur se situerait au centre de l'île plutôt que sur la côte. En Provence, la situation est très prometteuse. Le biais de 0,60 m présent dans EGG97 a complètement disparu. La répartition géographique des résidus suggère des erreurs de $\pm 0,15$ m sur les hauteurs ellipsoïdales ou les altitudes de deux points géodésiques qui n'avaient pas été détectées jusqu'à pré-

sent (figure 11). Pour obtenir une vue plus globale des améliorations apportées par le nouveau modèle QGC02A par rapport à QGF98, on a représenté, sur la figure 12, les écarts entre les deux modèles de quasi-géoïdes et les points GPS nivelés du RBF QGF98 (sur la partie gauche de la figure) a été volontairement décalé pour être compatible avec QGC02A et EGG97 dans la partie nord-ouest (région des Bouches du Rhône). En effet, QGF98, incorporant le modèle de champ OSU91, est moins bien référencé que les autres modèles qui s'appuient sur EGM96. L'amélioration obtenue avec QGC02A est très visible sur la figure.

Conclusion

Tableau 5 : Résultat de l'ajustement local des modèles de quasi-géoïdes QGC02A et EGG97 avec des points GPS nivelés.

Modèle	Région	Nbre points	a (m)	b (10 ⁻⁶)	c (10 ⁻⁶)	Résidu min. (m)	Résidu max. (m)	Ec.-type (m)
QGC02A	Corse	20	+0,185	-3,57	+1,39	-0,162	+0,107	0,088
	Provence	31	-0,027	-2,10	-1,67	-0,164	+0,096	0,066
EGG97	Corse	20	-1,325	+2,14	+7,32	-0,180	+0,115	0,077
	Provence	31	-0,603	+1,47	+1,13	-0,462	+0,256	0,108
QGF98	Corse	18	-0,384	-1,71	+2,33	-0,107	+0,114	0,082
	Provence	31	+0,408	+3,21	-2,16	-0,131	+0,243	0,100

Le levé aérogravimétrique réalisé entre la Provence et la Corse et autour de cette île comprend environ 2510 km de lignes de vol. Avec une précision de 2,6 mgal, c'est actuellement la source d'information la plus précise sur la pesanteur dans la région étudiée. Son exécution a permis d'estimer la précision des anciennes données gravimétriques marines à 6,3 mgal. Quatre grilles d'anomalies de pesanteur issues d'altimétrie par satellite ont été évaluées par comparaison avec le levé aérogravimétrique. La précision moyenne des meilleures grilles dans cette région (KMS99 et Sandwell) est de 8,2 mgal, et meilleure que 5 mgal en haute mer. La distance minimale de la côte à partir de laquelle ces grilles sont fiables est de 50 à 75 km. Un nouveau modèle de géoïde a été calculé. Des comparaisons avec des points GPS nivelés ont prouvé une amélioration sensible dans la région considérée, par rapport aux modèles de géoïde précédemment disponibles, même si quelques défauts subsistent au centre de la Corse. ●

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier tous les organismes et les personnes qui ont participé à la réalisation du levé aérogravimétrique: le Professeur Michel Kasser, M. Alain Reynes, le pilote M. Pilotto et son équipage (tous à l'IGN), M. Guy Penazzi et Christian Allet (INSU), José Cali et André Balandier (ESGT) Paul Courbon (Ingénieur IGN, géomètre). Les opérations aériennes ont été financées par l'IGN, les travaux de terrain par le CNAM/ESGT. KMS a prêté gracieusement de l'instrumentation. M. Bernard Langellier (BGI) a fourni des données gravimétriques.

Auteurs

H. DUQUENNE

Laboratoire de Géodésie et Géomatique, ESGT, 1, Boulevard Pythagore, F-72000 Le Mans, France.
Laboratoire de Recherche en Géodésie, IGN/ENSG, 6 et 8, avenue Blaise Pascal, Champs sur Marne, 77455 Marne la Vallée CEDEX.

A.V. OLESEN - R. FORSBERG

Geodynamics Department, National

Survey and Cadastre (KMS), Rentemestervej 8, DK-2400 Copenhagen, Denmark.

A. GIDSKEHAUG

Institute of Solid Earth Physics, University of Bergen, Alle'gt. 41, N-5007 Bergen, Norway.

Références bibliographiques

- Behrend D., Denker H., Schmidt K. (1996).** *Digital Gravity Data Sets for the Mediterranean Sea Derived from Available Maps*. In: Bulletin n° 78, Bureau Gravimétrique International.
- Debeglia N. (1998).** *Données gravimétriques Corse et Sud-est*. Rapport interne, BRGM.
- Denker, H., Torge W. (1998).** *The European gravimetric quasigeoid EGG97, an IAG supported continental enterprise*. In: IAG Symp. Proc. vol. 119, Springer.
- Duquenne F. (2001).** *Gravimétrie Aéroportée Corse-Provence : rapport du calcul des trajectoires GPS*. Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes.
- Duquenne F., Olesen A.V., Cali J. (2002).** *Plane trajectory with GPS for airborne gravimetry*. Presented at the 3rd Meeting of the international Gravity and Geoid Commission, Tessaaloniki.
- Duquenne H. (1998).** *QGF98, a new solution for the quasigeoid in France*. Proc. of the 2nd continental workshop on the geoid in Europe. Reports of the Finnish Geodetic Institute, M. Vermeer and J. Adam (eds.)
- Duquenne H. (1999).** *Comparison and combination of a gravimetric quasigeoid with a levelled GPS data set by statistical analysis*. Physics and Chemistry of the Earth (A), vol.24, n° 1, pp79-83.
- Duquenne H., Olesen A.V., Forsberg R., Gidskehaug A. (2002).** *Improvement of the gravity field and geoid around Corsica by aerial gravimetry*. Presented at the 3rd Meeting of the international Gravity and Geoid Commission, Tessaaloniki.
- Forsberg R. (1994).** *Terrain effects in geoid computations. Lectures notes*. International School for the determination and use of the geoid. IgeS, DIIAR, Milan.
- Garayt B., Nocquet J.-M. (2000).** *Compte-rendu des opérations de terrain et de calcul de la mission Côte d'Azur de contrôle des modèles de conversion*

RGF93-IGN69. Rapport interne, Institut Géographique National.

Olesen A.V., Forsberg R. and Kearsley A. H. (2000). *Great Barrier Reef Airborne Gravity Survey (Braggs'99). A Gravity Survey Piggybacked on an Airborne Bathymetry Mission*. In: M. G. Sideris (ed.): Gravity, Geoid and Geodynamics 2000, IAG symposium Vol. 123, pp. 247-251, Springer Verlag.

Olesen A.V. (2002). *Airborne Gravity Project Povenice-Corsica February 20-22, 2001*. Report. National Survey and Cadastre, Denmark

Sandwell, D. T., Smith W. H. F. (1997). *Marine gravity anomaly from Geosat and ERS 1 satellite altimetry*. Journal of Geophysical Research, v. 102, No. B5, p. 10039-10054.

ABSTRACT

Three models of the geoid covering the French Riviera and Corsica have been available until now: QGF96, EGG97 and QGF98. Comparisons of these models with levelled GPS points of the French geodetic network showed that old marine gravity data are contaminated by large errors, up to tens of mgal. In February 2001, several organisations (KMS, University of Bergen, ESGT, IGN, INSU) carried out an aerial survey, aiming at an improvement of the gravity coverage in this area. The final data set consists of 1458 filtered values of gravity anomalies distributed along 2510 km of flight lines. An analysis of the misfits at 25 crossing points leads to an internal accuracy of 2.6 mgal. Comparisons of the new data with old marine data (from BGI database) and anomalies derived from satellite altimetry (grids from KMS, CLS and University of California) allows to reject large errors in the old data set and provide an external estimation of accuracy. A new dense gravity data set is built, including measurements on land, from which a new model of the geoid is computed for Corsica. A final validation is obtained from the comparison of the geoid with 51 levelled GPS points of the French and Corsican geodetic networks.

Droits de préemption en aménagement et autres

■ Jean-Pierre MAILLARD

Le sujet concerne le domaine de la propriété immobilière. Il recouvre un champ législatif et réglementaire varié. Pour illustrer la diversité de la préemption, les droits qui y sont attachés bénéficient aussi bien à une structure publique (Etat, Collectivités territoriales, Etablissements publics, ...) qu'à une entité privée (Société d'aménagement foncier et d'équipement rural-SAFER-, locataire, ...). C'est dire la multiplicité des cas de figure, certains allant même jusqu'à rétablir une situation d'origine par l'inversion du bénéficiaire du droit. Leur perception change selon que l'on se place du point de vue dudit bénéficiaire ou de celui du propriétaire qui cède un immeuble.

Ce faisant la présentation ne se limite pas au titre I^{er} du Livre II du code de l'urbanisme justement intitulé "Droits de préemption" » bien que ceux-ci soient les plus analysés dans ce qui suit. Elle montre tout ce qui amène un propriétaire, quand il entend réaliser son bien, à renoncer à le céder à qui bon lui semble, sans pouvoir s'y opposer. Pour être exhaustif, les dépossession forcées seront également listées comme étant la manifestation d'une préemption au sens premier du terme, celle de pouvoir acheter avant autrui. C'est pourquoi, selon les situations, le nom préemption se transformera par les mots priorité, préférence, rétrocession...

En revanche le développement sera volontairement limité car l'article, n'ayant pas vocation à servir de support pédagogique, ne peut pas se substituer aux différents codes et aux publications existantes auxquelles il renvoie. Cependant il contient ce qu'il faut savoir sur tel ou tel droit et, le cas échéant, un commentaire de praticien qui illustre les curiosités de l'imbrication de certains textes réglementaires.

Les aliénations volontaires

Le propos conduit à se mettre dans la peau d'un notaire en charge de réitérer par acte authentique l'accord sur "la chose et sur le prix" intervenu entre deux parties. L'inventaire des droits de préemption en vigueur qu'il convient de purger sont identifiés sans que l'ordre retenu constitue une trame hiérarchisée.



© Jean-Pierre Maillard

■ Droits de préemption, urbain et en zone d'aménagement différé (ZAD)

Les droits de préemption institués par le Code de l'urbanisme, motivés par l'intérêt général, sont fondés sur l'article L300-1 définissant : "Les actions ou opérations d'aménagement qui ont pour objet de mettre en oeuvre un projet urbain, une politique locale de l'habitat, d'organiser le maintien, l'extension ou l'accueil des activités économiques, de favoriser le développement des loisirs et du tourisme, de réaliser des équipements collectifs, de lutter contre l'insalubrité, de permettre le renouvellement urbain, de sauvegarder ou de mettre en valeur le patrimoine bâti ou non bâti et les espaces naturels". Le maître mot est donc "motivation". Pour être valide cette motivation doit effectivement préexister à la décision du bénéficiaire du droit.

Droit de préemption urbain (DPU)

Le territoire

Il peut-être institué dans les zones U et NA des plans d'occupation des sols (POS), rendus publics, et aujourd'hui des plans locaux d'urbanisme (PLU) s'ils sont approuvés, sur tout ou partie du territoire d'une commune. Cependant un DPU ne peut être institué sur une ZAD ou une pré-ZAD existante (cf. supra). De même il devient inopérant si une ZAD ou une pré-ZAD vient à être créée dans tout ou partie du territoire où il s'exerce.

Le bénéficiaire

La compétence appartient à la commune. Le DPU est créé par délibération du conseil municipal et peut être délégué soit au maire, soit à un délégataire (établissement public industriel et commercial -EPIC-, établissement public foncier -EPF- ou autre organisme public disposant de la compétence foncière) qui a accepté la délégation. Cela suppose cependant que la compétence d'urbanisme ne soit pas déjà transférée à une communauté de communes ou d'agglomération, transfert qui mettrait la création du DPU sur l'initiative de l'établissement public de coopération intercommunale -EPCI- concerné. Les subdéléga-

- ■ ■ tions ne sont pas autorisées. En cas de délégation non respectée le défaut de pouvoir du bénéficiaire est source d'illégalité.

La motivation de la préemption

La motivation doit être conforme aux textes rappelés ci-dessus exceptés, par définition, les espaces naturels et s'appliquer à une finalité précise. Dans le cas d'une réserve foncière, l'existence d'une volonté d'aménagement à terme doit s'inscrire dans la politique annoncée de la collectivité locale. Le défaut de motivation préexistante est sanctionné par le tribunal administratif.

Les aliénations soumises

Toutes ou presque (ventes, échanges, adjudications) sont concernées. En sont exclues les conventions qui n'emportent pas mutation de propriété et les mutations à titre gratuit (donations, successions, ...) et celles non volontaires objet d'une autre action foncière prioritaire (DUP, ZAD, ...)

D'une façon générale, les appartements constituant un lot de copropriété et les immeubles construits depuis moins de dix ans ne sont pas soumis au DPU. Si, par délibération expresse, ces immeubles spécifiques sont tout de même inclus, le DPU sera dit "renforcé" ce qui suppose un projet de rénovation urbaine, qualifiée de lourde, en justification.

La déclaration d'intention d'aliéner (DIA)

La DIA est adressée en mairie dont les services vérifient la recevabilité et saisissent l'administration du domaine, en général la direction des services fiscaux (DSF) qui évalue le bien.

La décision du titulaire et ses conséquences

La décision doit être prise dans le délai de deux mois de la réception de la DIA en mairie.

Le bénéficiaire peut soit renoncer, soit préempter.

S'il y a préemption on dit qu'elle est parfaite quand elle intervient au prix déclaré avalisé par le domaine comme correspondant au marché. La préemption à un prix inférieur à celui déclaré, conforme à l'avis du domaine, ouvre deux solutions au vendeur : soit il renonce à son aliénation, soit il accepte l'offre de l'administration. A défaut, le recours au juge s'impose, la fixation judiciaire du prix de vente étant de la seule initiative du titulaire du DPU.

Si le prix est supérieur, le bénéficiaire entendant saisir une opportunité peut passer outre l'avis du domaine mais cela nécessite une décision expresse à prendre par l'organe délibérant pour les collectivités.

Le défaut de réponse dans le délai de deux mois équivaut à un renoncement tacite.

Droit de préemption en ZAD

Le territoire

Créé par arrêté préfectoral ou, à défaut d'avis favorable de la collectivité locale concernée, par décret en conseil d'Etat, le périmètre d'une ZAD peut être défini sans restriction d'urbanisme. Cependant l'existence d'un schéma de cohérence intercommunale (SCOT) en vigueur limitera le territoire "zadable" à la zone reconnue constructible par le document d'urbanisme.

Le bénéficiaire

Le recours à la ZAD est à la disposition de toutes les collectivités territoriales, à savoir l'Etat et ses établissements publics,



les communes et groupements de communes à la demande de ces derniers, un département, une région.

La motivation de la préemption

La motivation est faite par référence à l'acte créant la ZAD comportant la justification de son objet qui doit être conforme l'article L300-1 ci-dessus, exceptés les espaces naturels (cf. infra).

Les aliénations soumises

Les mêmes que celles définies au DPU, sans aucune exception

La DIA

La DIA est reçue par le maire de la commune chargée à ce dernier d'effectuer les mêmes tâches que pour le DPU et de la transmettre au bénéficiaire de la ZAD si, bien sûr, il n'est pas la commune.

La décision du titulaire

Elles sont les mêmes que pour le DPU. Toutefois, pour les établissements publics d'Etat, le passé outre est de la compétence du ou des ministères de tutelle. C'est dire que son usage est quasi inexistant.

■ **Espaces naturels sensibles (ENS)**

Le droit de préemption relatif aux espaces naturels sensibles est institué par l'article L142-3 du code de l'urbanisme au bénéfice du département. Il implique une politique volontariste de protection et d'ouverture au public des espaces naturels concernés. L'existence d'une construction ne fait pas obstacle à une préemption dès lors que la surface de la propriété préemptée est significative par rapport au bâti. La création des ENS et la procédure d'instruction des DIA sont identiques à celles relatives à la ZAD.

Un même immeuble peut être soumis à un ENS et à une ZAD ou à un DPU. Ces cas révéleraient un problème de politique d'aménagement, une contradiction entre le projet d'un département et celui d'un autre acteur public. Quoiqu'il en soit, les deux droits de préemption doivent être purgés, en même temps ou successivement selon le choix du déclarant.

■ **Mise en copropriété d'un immeuble**

Le locataire d'un lot de copropriété mis en vente après division d'un immeuble dispose d'un droit de préemption au prix susceptible d'être effectivement retenu pour la vente.

■ Congé pour vendre

Le locataire d'un logement ou le titulaire d'un bail à ferme a un droit de préférence en cas d'aliénation par le propriétaire. Les ventes de logement et d'immeubles ruraux occupés par un exploitant agricole sont à réaliser sous la condition suspensive de la préemption du locataire. Cependant, ce droit personnel ne prime pas sur les droits de préemption ci-dessus. L'existence d'un occupant étant révélée par la DIA, le bénéficiaire du droit de préemption achètera, le cas échéant, un bien occupé.

■ Droit de préemption de la SAFER

Ce dernier s'exerce à l'occasion de la mise en vente de terres agricoles. S'il existe une ZAD, le droit de préemption qui lui est attaché prime celui de la SAFER. À défaut, le droit de préemption de la société d'aménagement foncier s'effacera, là encore, devant le droit de priorité de l'occupant exploitant agricole.

Le délai d'instruction est aussi égal à deux mois. Dans certaines SAFER le renoncement est toujours tacite. Si les parties veulent obtenir rapidement une décision formelle, il faudra alors payer l'instruction du dossier.

■ Droit conventionnel

Comme il n'est pas possible de céder un même immeuble à deux personnes différentes, le notaire devra s'assurer qu'aucune option et qu'aucun droit de préférence n'ont été consentis par le vendeur.

Les aliénations forcées

■ Déclaration d'utilité publique (DUP) et préemption

La plus connue des déposessions est l'expropriation pour cause d'utilité publique. Comme la question mériterait en elle-même un article spécifique, le commentaire sera limité à ce qui touche la DUP et la préemption, sachant que celle-ci ne s'applique pas aux acquisitions de l'expropriant.

En revanche, l'existence d'une DUP ne créant pas de droit de préemption rien n'empêche une mutation hors l'expropriant. Il appartient cependant au notaire de signaler à l'acquéreur l'existence d'une DUP et, partant, une expropriation possible à court terme. Cela décourage en général le dit acquéreur. Pour sortir de cette situation, le propriétaire qui souhaite se dessaisir de son bien peut mettre l'expropriant en demeure d'acquiescer (art L11-du Code de l'expropriation pour cause d'utilité publique). Cette procédure qui oblige l'expropriant à acheter, relève de la seule volonté du vendeur.

Si le périmètre est également concerné par un droit de préemption, au bénéfice de l'expropriant, l'acquisition aura les mêmes effets qu'un accord amiable conclu sous le régime de l'expropriation (art L213-5 du code de l'urbanisme). C'est une novation assez récente car précédemment, l'administration estimait qu'une aliénation volontaire n'ouvrait pas au verse-

ment de l'indemnité de remploi. Tel serait d'ailleurs le cas si le titulaire du droit de préemption était autre que celui de la DUP. Il arrive en effet qu'une compétition puisse naître entre deux collectivités publiques. Une action foncière déterminée supposerait donc qu'une DUP soit précédée d'une ZAD prise au profit du même bénéficiaire.

Dans ce cas, le défaut de préemption ne peut pas être juridiquement opposé à l'expropriant si, in fine, il se décide à utiliser les effets de la DUP. À noter cependant que dans un cas de cette nature, un exproprié a recouru à l'arbitrage du médiateur de la République arguant, avec bon sens, que l'administration ne savait pas ce qu'elle voulait. Le médiateur a obtenu de l'expropriant qu'il renonce à l'expropriation.

■ Droit de rétrocession

Au titre d'une expropriation

L'article L 12-6 du code de l'expropriation donne au propriétaire dépossédé la faculté d'obtenir la rétrocession des immeubles expropriés si, au delà du délai de cinq ans du terme de la DUP, les dits immeubles n'ont pas fait l'objet d'un début d'aménagement conforme à la finalité de l'action foncière. Ce droit est ouvert pendant une durée de trente ans à compter de l'ordonnance d'expropriation. La jurisprudence évoluant, cette faculté s'ouvre désormais aux anciens propriétaires qui ont consenti une cession amiable passée sous le régime de l'expropriation.

Pour les DUP "ouvrage", la réalité de l'engagement de l'opération peut facilement s'apprécier à l'échéance des cinq ans du terme de la DUP. En revanche, pour les réserves foncières



- ■ ■ constituées pour une opération d'ensemble, le "début d'aménagement" est laissé à l'appréciation du tribunal. Ainsi une zone d'aménagement concerté (ZAC) en cours de validité et partiellement opérationnelle est réputée engagée quand bien même les immeubles dont la rétrocession est sollicitée n'ont pas encore reçu quelque début d'équipement que ce soit.

A contrario, si l'expropriant remet sur le marché un immeuble exproprié sans valeur ajoutée, il lui appartient de purger le droit de rétrocession par lettre recommandée avec accusé de réception auprès du propriétaire dépossédé.

Au titre d'un exercice du droit de préemption urbain (DPU)

L'article L 213.14 du code de l'urbanisme donne au propriétaire la faculté d'obtenir la rétrocession de l'immeuble acquis par l'exercice du DPU si le prix n'a pas été payé ou consigné dans les six mois de la préemption. Si l'acte est passé, un acte de rétrocession s'impose, sinon un simple échange sous seings privés suffit.

Le droit de rétrocession s'exerce aussi dans le délai de cinq ans de l'acquisition dans l'hypothèse où le bien est remis sur le marché ou utilisé à d'autres fins que l'objet de la préemption. (art L213-11 du code de l'urbanisme). Ce droit bénéficie également, par suite du renoncement du propriétaire, s'il est déclaré, à l'acquéreur évincé.

Au titre d'un exercice du droit de préemption en ZAD

Les biens acquis sur mise en demeure d'acquiescer en ZAD n'ouvrent pas de droit de rétrocession à leur ancien propriétaire.

■ Prescription acquisitive

La propriété s'appréhende aussi par prescription, au maximum trentenaire, (art 712 du Code civil). De bonne foi et à juste titre, elle est acquise dans le délai de dix ans par son possesseur si le propriétaire réel habite dans le ressort de la Cour d'appel de l'immeuble, vingt ans ailleurs, entre dix et vingt ans en cas de déménagement.

A défaut de titre, une période de trente ans s'impose. Un acte de notoriété pourra alors être établi et constituera le titre de propriété du "préempteur".

■ Biens vacants et sans maître

Les immeubles en cause sont appropriés par l'Etat (art 713 du code civil). La vacance est constatée par le service du domaine qui gère le bien jusqu'à sa remise sur le marché. Celle-ci intervient en application du code du domaine de l'Etat dans un cadre amiable ou par adjudication.

■ L'expropriation forcée

Un créancier peut poursuivre l'expropriation d'immeubles appartenant à son débiteur. (art 2204 du code civil). Ce dispositif est très réglementé.

■ Classement dans le domaine public

Il n'est pas rare que des ouvrages publics, routiers notamment,

soient construits sur sol d'autrui. Comme on ne détruit pas un ouvrage du domaine public artificiel, le propriétaire n'a pas d'autre choix que de constater sa dépossession et de se retourner contre le maître d'ouvrage pour obtenir une juste et postérieure indemnité et la formalisation de la cession correspondante en particulier pour échapper à l'éventuel impôt foncier.

■ Aliénation d'emprises de voirie déclassées

Dans la pratique, après déclassement du domaine public, la suppression d'une voirie communale est suivie, par moitié, d'une cession de l'emprise aux propriétaires riverains. Il en est de même pour les chemins ruraux après désaffectation à l'usage du public.

■ Emplacements réservés dans les POS et les PLU.

Comme dans le cas de la DUP, l'existence d'un emplacement réservé ne constitue pas un droit de préemption stricto sensu. Pourtant il donne à un propriétaire le droit de forcer le bénéficiaire de l'emplacement réservé à décider l'acquisition dans les mêmes conditions d'indemnisation que celles fixées par le code de l'expropriation. A défaut, l'emplacement réservé deviendra sans effet et devra être levé. Par suite, la constructibilité de l'immeuble sera rétablie. Ce dispositif est un peu théorique car si le projet constituant le fait générateur reste d'actualité, quand bien même le maître d'ouvrage a renoncé à acquiescer, il se trouvera peu de propriétaire ou de preneur disposé à s'engager dans un investissement dont la durée est immédiatement incertaine sauf à se transformer en plaideur.

Des possibilités de compétition entre collectivités territoriales, voire avec d'autres bénéficiaires pour s'approprier tel ou tel espace ont été mises en évidence. Cette situation milite pour la définition d'une politique d'aménagement cohérente partagée par le plus grand nombre, car les outils doivent être au service des politiques et non se substituer à elles.

Sans être forcément complet, ce tour d'horizon illustre déjà bien largement l'intérêt de la maîtrise du foncier dans notre société et la diversité des moyens mobilisables pour en disposer. Le lyrisme de l'article 17 de la déclaration des droits de l'homme et du citoyen annexé à la Constitution française, qui affirme la propriété comme un droit inviolable et sacré, est quelque peu tempéré par ce constat. Il n'est pas interdit de penser que c'est finalement plutôt heureux. ●

ABSTRACT

Keys words: Real estate, land developping, pre-emptive acquisition, public community.

In France, the real estate business action crosses the publics communities policies and private rights. In many cases, the land property cannot change hands without an administrative decision or/and somebody renunciation.

French laws and rules are listed with comments.

Izay iray vatsy, iray aina

Ceux qui ont les mêmes provisions de voyage sont unis dans la vie

■ François BODIN



Les années se suivent, les projets évoluent et comme ce qui est bon quelque part gagne à être transposé ailleurs le voyage malgache des élèves de l'ESGT en 2004 a eu pour double objectif d'abord de répondre à un travail technique particulier dans le prolongement de ce qui se réalise depuis quatre ans maintenant pour la desserte en eau de villages de la région de Fiaranantsoa et ensuite de prendre les premiers contacts avec les professionnels de la topographie et du foncier pour mettre en place un partenariat identique à celui qui existe avec l'école supérieure des ingénieurs géomètres du Bénin.



La chaleur de l'accueil et la générosité de nos hôtes malgaches ont garantis la totale réussite du séjour au cours duquel les professionnels de la formation des géomètres et les responsables du foncier furent rencontrés.

Des travaux pratiques partagés à Antananarivo par une partie des étudiants tandis que l'autre effectuait les relevés topographiques à Fiana ont occupés les premières semaines du séjour avant que tous, étudiants géomètres français et malgaches, se retrouvent pour un voyage d'étude.

Ces dix jours passés ensemble sur la route ne resteront pas sans suite : la topographie et la géométrie sont nos provisions communes et la vie professionnelle qui s'ouvre devant les étudiants de nos deux continents devrait enrichir ces liens nouveaux, à l'image du titre... (proverbe malgache). ●



Yvette Velay : la

■ Jean-Pierre MAILLARD

Depuis la rentrée 1997 l'Ecole nationale des sciences géographiques (ENSG) a pris ses quartiers à Marne-la-Vallée, sur la commune de Champs-sur-Marne, à la Cité Descartes précisément. L'ENSG est réunie sous un même toit à l'Ecole nationale des ponts et chaussées (ENPC). Il est donc bien normal que les architectes, Philippe Chaix et Jean-Paul Morel aient recherché un exploit technique pour honorer les ingénieurs d'hier, d'aujourd'hui, de demain, et valoriser les deux plus prestigieuses des grandes écoles dépendant du ministère de l'équipement.

L'ensemble se présente, sur cinq niveaux, sous la forme de trois barres de 133 m de long traversées par une voûte de verre clair suspendue. Cette dernière apparaît, dès l'entrée, comme une véritable nef de 17 m de large qui accueille et conduit, à droite à l'ENPC, à gauche à l'ENSG et, droit devant en sous-sol, à l'amphithéâtre Cauchy. En façade la voûte se révèle décentrée pour tenir compte des effectifs inégaux des deux écoles.

Aujourd'hui l'ENSG constitue la référence française de la formation topographique, cartographique, géodésique et géomatique et il n'est pas nécessaire de la présenter plus avant tant elle est bien connue des lecteurs d'xyz et aussi parce que son directeur, Michel Kasser, n'est autre que le président de l'AFT.

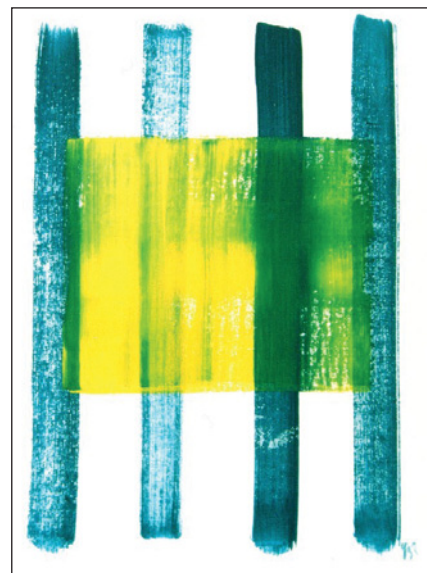
La semaine professionnelle de la FIG 2003

L'an passé l'ENSG s'est transformée, le temps d'une semaine de vacances scolaires en centre de congrès pour recevoir la manifestation de la Fédération internationale des géomètres (FIG) celle-ci n'ayant pas pu se dérouler en Israël, comme prévu, pour des raisons de sécurité.

XYZ a rendu compte de la contribution et de la participation de l'AFT, des sujets traités et de l'exposition professionnelle d'accompagnement. Il reste à commen-

ter le stand réservé dans l'exposition à la présentation de peintures à dominante géométrique, touches de couleur qui appellent à l'imagination, à sortir un moment des exposés techniques, des bilans et projets de la FIG, tout comme la rubrique "Art et géométrie" prétend distraire une lecture professionnelle.

Cette proposition a également eu pour effet de faire remarquer les interventions plastiques visibles dans le hall et l'amphithéâtre Cauchy. Elles sont le fait de Jean-Charles Blais et Pierre Buraglio. Le premier a imposé ses silhouettes en façade et une longue gravure du sol dans le hall. Le second a opté pour des paysages aux rétroviseurs dans l'amphithéâtre et deux séries de disques dans le hall. Dans le travail de Pierre Buraglio il convient de voir chaque rétroviseur comme un écran qui



© Yvette Velay

montre au présent l'immédiat passé pour aller de l'avant. Pour leur part, les disques illustrent la Lune et le Soleil et renvoient au système solaire, à la géographie en général.

Pour l'exposition temporaire de la FIG et par œuvres interposées, trois artistes ont été présentés : Marino di Teana, Ghislaine Escande et Yvette Velay. "Art et géométrie" ayant déjà fait connaître Marino di Teana (xyz n° 87) et Ghislaine Escande (xyz n° 91) il paraît équitable d'étudier aujourd'hui une réalisation d'Yvette Velay.



Phototèque EPAMarne Photo Philippe Guignard

couleur et l'écriture

Une œuvre

La série de peintures acryliques alors offerte au regard est résolument géométrique avec une dominante rectangulaire. Les toiles exposées ont été réalisées à main levée sans souci de la précision du dessin des polygones réguliers et des cercles. Il y a une part de risque dans la démarche.

Le tableau étudié marie le vert et le jaune. L'ensemble apparaît comme une écriture primitive sans savoir s'il s'agit d'une lettre ou d'un mot. Les rectangles verticaux vert foncé sont quasiment de la même dimension et leur espacement est régulier. Cette disposition n'est pas sans rappeler les premiers cours de dessin dispensés aux futurs géomètres du temps d'avant l'ordinateur. Il leur était demandé, justement à main levée, de faire des pages de bâtons dans l'espoir, au bout de trois mois, qu'ils seraient enfin identiques, alignés et régulièrement espacés. A posteriori on comprend que cet exercice ait sérieusement testé les qualités professionnelles de l'étudiant géomètre, à savoir la précision, la rigueur et la présentation. Les élèves découragés par ce travail jugé imbécile: *"Vous pensez, faire faire des bâtons à des bacheliers!"* qui ont quitté la formation n'ont pas de regret à avoir car ils

n'étaient pas prédisposés à ce métier. Le rectangle horizontal équilibre le sujet. La transparence du jaune conduit à la naissance du vert tendre au croisement des deux couleurs à la recherche d'une troisième dimension.

Comme toujours, dans l'abstraction, chacun est libre de l'interprétation. Au-delà d'une sorte d'enluminure contemporaine qu'il soit donc aussi permis d'y voir l'esquisse du plan masse des locaux de l'ENPC/ENSG le jour de la réalisation possible d'un quatrième bâtiment, le rectangle jaune figurant le hall et la voûte qui caractérisent l'édifice! Pour l'artiste, et selon son expression, *"il s'agit de parler en silence, écrire des mots muets qui portent en eux la musique des couleurs et le sens des lignes. Un trait bleu plus un carré rouge, ça fait quoi? Et si l'on ajoute un violet..."*

Un parcours

Yvette Velay est née en 1945 dans le Cantal. Sa vocation artistique date de la fin des années soixante-dix. Ses premières esquisses ont été faites dans l'atelier gravure de Maurice Maillard à Val de Reuil (Eure) dont le travail à la presse est aujourd'hui reconnu également à l'étranger. Ensuite elle rejoint le

cours de Louis-Marie Joubert aux Beaux-arts de Rouen.

Dans le même temps, dans un souci de perfection, elle entreprend des études d'arts plastiques à la Sorbonne sanctionnées, avec mention, par une maîtrise.

Sa recherche intérieure est gestuelle. Sa production est donc largement inspirée par la calligraphie chinoise et le constat que le dessin et l'écriture ont la même origine comme elle l'exprime si clairement: *"Initialement, dessiner et écrire se confondent, se renvoient l'un à l'autre, des premiers signes dans les cavernes du Paléolithique au début des écritures sumériennes.*

... Aller à l'essentiel des formes originelles là où le rond n'est cercle que par la raison d'un ordonnancement qui nous est inconnu et d'où nous procédons : la Préhistoire de la géométrie. Garder le souffle, le geste, la couleur, les objets anodins usagés souvent oubliés pour trouver quelque chose d'une respiration à l'unisson de la Création."

Depuis 1982 seule ou en groupe elle expose en galeries et dans des salons. Son souci d'être également présente dans la vie de l'entreprise l'a conduite à proposer des animations plastiques dans des lieux commerciaux. C'est ainsi que, notamment, plusieurs de ses œuvres sont exposées en permanence dans le show room de la concession Renault de Coulommiers et dans le magasin de meubles contemporains Intemporelle à Metz. Dans le même esprit il est heureux que la porte de l'ENPC/ENSG soit ouverte aux créateurs dont l'empreinte inspirée pérenne ou temporaire contribue aussi à l'identification des lieux. Ainsi les futurs ingénieurs sont à même de confronter leur prochaine condition d'homme de l'art à l'expression de valeurs esthétiques reconnues. ●

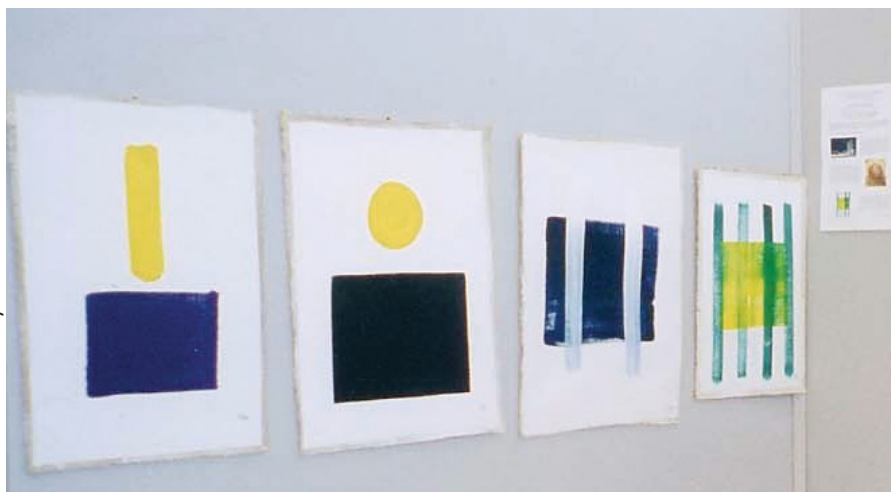
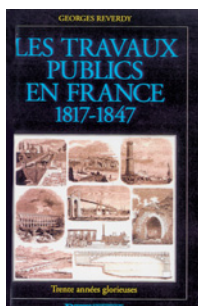


Photo André Bailly



■ Les travaux publics en France (1817-1847)

Trente années glorieuses

Par Georges Reverdy

La restauration et la monarchie de juillet ne tiennent pas une grande place dans notre histoire, en dehors des deux révolutions qui les ont clôturées. Cette époque vit pourtant la véritable naissance de la France moderne, avec les progrès considérables, un quadruplement de l'extraction de la houille, un développement encore beaucoup plus grand de l'industrie sous toute les formes, textile, métallurgique et même chimique, grâce à la diffusion de la machine à vapeur; et le développement correspondant des échanges, grâce à la mise en place définitive de l'infrastructure nécessaire, canaux, routes, ports et chemins de fer.

On retient en général son retard, dans la réalisation de ces chemins de fer, même si elle avait pris un remarquable départ. Il y avait souvent de quoi hésiter dans le choix des tracés des grandes lignes et leur mode de financement par l'Etat et les compagnies concessionnaires, compte tenu de l'importance de la dépense: on retrouve encore de nos jours les mêmes discussions pour les grands projets. C'est l'histoire des ces grands travaux que nous propose ici Georges Reverdy.

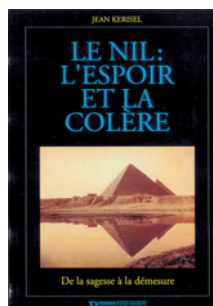
► 416 pages - 50 €
presse des Ponts et Chaussées

■ Le Nil : l'espoir de la colère

De la sagesse à la démesure

Par Jean Kerisel

Dans la plaine du Nil, des millénaires avant notre ère, s'est développée une grande civilisation. Il y eut alors communication intelligente entre l'homme, la terre et l'eau. De Namer à Nasser, l'auteur évoque cette trilogie riche en réalisations et symboles et



il souligne les ambitions parfois démesurées des lointains successeurs des pharaons. Le haut barrage fut un défi au monde occidental et une rupture avec la grande intelligence hydraulique des pharaons. L'auteur montre qu'un barrage plus modeste, l'amont. Eût suffi, épargnant la basse Nubie et ses temples, les crues étant rejetées latéralement dans la dépression de Tochka déjà bien connue des pharaons. Le haut de l'Égypte, pense l'auteur est dans l'aménagement hydraulique des chutes du Nil bleu, source d'énergie et d'eau abondante au long de l'année, au sein d'une action fédérée groupant l'Éthiopie, Nord Soudan et Égypte.

Jean Kerisel après une longue carrière scientifique, a écrit de nombreux ouvrages et articles sur les pyramides et les grandes architectures du passé.

► 216 pages - 27 €
presse des Ponts et Chaussées



■ Dans les traces d'Hercule Les voies transalpines du Mont-Cenis et du Petit-Saint-Bernard

Ouvrage collectif du CAUE de Savoie sous la Direction de JP Petit

la légende de nos provinces veut que le héros mythologique Hercule soit passé au Mont-Cenis.

Herculeum, les incessants travaux qui occupent les hommes depuis 1803 l'ont indéniablement été. Cette publication "bilingue" a été réalisée sur l'évolution des infrastructures transalpines à travers l'histoire pittoresque des voies du Mont-Cenis et du Petit-Saint-Bernard nécessaire au franchissement des Alpes pour sortir des vallées de Savoie, du Piémont et du

Val d'Aoste, de leur enclave et les relier au monde.

Ces réalisations formidables nous les devons au courage et à la volonté, au génie aussi, de ceux qui, ingénieurs, techniciens, ouvriers ont consacré leur vie à leur création et à leur entretien, en luttant contre les éléments naturels bien sûr, mais aussi parfois contre les préjugés et les superstitions.

A lire le chapitre petite introduction à l'histoire des voies de liaison franco-italienne de G Reverdy.

► 272 pages - 45 €
éditions des Ponts et Chaussées

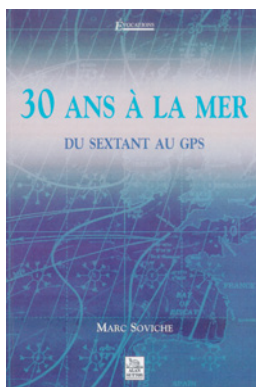


■ 2000 ans d'histoire du partenariat public-privé pour la réalisation des équipements et des services collectifs

par Xavier Bezançon

Cet ouvrage retrace de manière inédite la riche histoire du partenariat établi depuis plus de vingt siècles entre l'Etat, les collectivités et des entrepreneurs privés pour réaliser et faire fonctionner la plupart des équipements et services d'utilité collective que nous connaissons (routes, canaux, chemins de fer, réseaux divers) L'originalité de cette passionnante rétrospective est, à la fois, de nous révéler une histoire largement méconnue et de contribuer à dénoncer quelques fausses légendes. Elle permet de reconnaître la persistante modernité du système du partenariat public-privé dans un monde contemporain caractérisé à la fois par une demande croissante de services collectifs et une nécessaire économie de gestion des deniers publics. Xavier Bezançon est délégué général des Entreprises Générales des Entreprises, Docteur en sciences économiques et en droit.

► 288 pages - 40 €
presses des Ponts et Chaussées



■ 30 ans de la mer Du sextant au GPS

par Marc Soviche

le grand prix 2004 de l'Académie de Marine a été attribué au capitaine au long cours Marc Soviche pour son livre "30 ans à la mer - du sextant au GPS", quand il affronte les gros temps dans les années 80, Marc Soviche est le pacha de "l'Atlantique Cartier" qui est le plus gros porte-conteneurs. Sa carrière sur "l'Auray" un vieux navire qui faisait le Tour du monde de à moins de 11 nœuds et en 180 jours!

c'est un récit personnel composé à partir de ses carnets où l'on trouve des aventures de mer, des portraits d'officiers. La composition du récit est intéressante, peu savante et plutôt très directe.

Son témoignage, dépayçant et attachant raconte deux mondes maritimes qui se succèdent en l'espace de 30 ans: celui du voyage en sextant à petites vitesses et longues escales aussi exotiques qu'imprévisibles et celui des grandes lignes aux rythmes effrénés où les navires, aussi immenses soient-ils se manœuvrent au GPS et au centimètre près.

► 223 pages - 22 €
éditions Alan Sutton



■ Naître et renaître Une histoire de SPIE*

Par Jean Monville avec la collaboration de Xavier Bezançon

Société de construction de Batignolles, Schneider travaux Publics et SPIE, trois entreprises, trois cultures, qui il y a quarante ans, s'unissent et se mêlent au terme d'une route déjà longue pour suivre ensemble l'aventure. De la monarchie de juillet à nos jours, plus de cent cinquante ans d'histoire au travers de révolution, de guerres dévastatrices de conquêtes et d'effondrement d'empires coloniaux. De la civilisation du fer et de la vapeur à celle de l'électricité, puis à celle des ressources de données.

Dresser le portrait des entrepreneurs qui au XIX^e siècle furent à l'origine du groupe SPIE. De ceux qui l'on ensuite réuni, retracer les événements politiques et économiques qui ont influencé son évolution, les grandes étapes de son développement et les réalisations qui ont marqué son existence, tel est l'objet du présent ouvrage.

Le confort du succès et le temps qui passe, insensibles aux faiblesses et aux lassitudes, émoussent le courage et changent la quête du nouveau en une reproduction sans âme du passé. Et le repli frileux sur l'acquis condamne les entreprises à la décadence. La nature elle-même s'est toujours méfiée du clonage,

avec de bonnes raisons, après tout. Ainsi, la Société de Construction des Batignolles, refusant de remettre en cause et prisonnière des dogmes, perdit son élan initial et s'étiola peu à peu.

La SPIE se vit presque anéantie par la vague de nationalisations qui suivit le second conflit mondial.

Elle ne trouva son salut que dans une profonde mutation qui en fit une entreprise d'ingénierie et de travaux.

En 1997, le groupe SPIE vit le rachat de leur entreprise par ses collaborateurs et fit appel à un nouveau type d'appel commerciaux et une marque baptisée « CONCERTANCE » qui consiste à répondre aux appels d'offres en proposant à ses clients de travailler avec eux à la conception des ouvrages. Avec CONCERTANCE, les marges sont 2 à 3 fois supérieures et évite les réclamations.

Pour Jean Monville ressurgissent les souvenirs d'une lecture de son enfance : quatre siècles avant notre ère, dix milles soldats grecs, leur chef ayant disparu, s'organisèrent pour quitter les plaines du Tigre et de l'Euphrate, déjà l'Irak, pour traverser les montagnes d'Arménie et pour rejoindre les rives de la Mer Noire. Ce fut l'Anabase, la remontée.

Toute entreprise humaine est anabase, à la fois remontée vers le passé pour la recherche des racines et des valeurs et projection vers l'avenir pour reprise de l'accession, pour la fierté, l'enthousiasme et l'espoir recréés, ainsi toute association cherche son anabase.

Jean Monville Polytechnicien a été président directeur général de la SPIE en 1997 après avoir organisé le rachat de l'entreprise par ses salariés.

* SPIE : Société Parisienne d'Industries Electriques

► 350 pages - 40 €
presses des Ponts et Chaussées

Les colonnes de cette revue sont à la disposition de tous, adhérent ou non, pour toutes publications d'articles, de communications, d'annonces, d'informations en rapport avec la profession et après accord du comité de rédaction. N'hésitez pas, ces pages sont à la topographie.

REPertoire DES ANNONCEURS - N° 101

AERIAL	9	IGN	14	MESURIS	15
AERIAL	11	IMPHO GMBH	10	MICAD	12
ATLOG	6	INTERATLAS	2° de couv	REIS STOLZEL	88
CAOUSOU	88	ISTAR	1	TOPO CENTER	4° de couv.
ECOLE CHEZ SOI	4	JS INFO	86	TOPCON	80
GEOEVENEMENT	16	LEICA	2		
GÉOMEDIA	3° de couv	LEPONT	20-79		