

xvz

Éditée par l'
Association
Française de
Topographie
n°113

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

BICENTENAIRE DU CADASTRE

Contributions
de Pierre CLERGEOT
et Michel KASSER

28 décembre 2007
www.Cadastre.gouv.fr

**Le GPS au service
de la performance
sportive**



Directeur des publications

André Bailly
Ingénieur Géomètre ETP

Directeur adjoint des publications

Emmanuel Natchitz
Enseignant-Chercheur ESTP

Rédaction et administration XYZ

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

Rédacteur en chef

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

Comité de Rédaction

Stéphane Durand
Enseignant-Chercheur - ESGT Le Mans
Pierre Grussenmeyer
Professeur des universités
INSA de Strasbourg
Michel Kasser
Professeur des universités
Directeur ENSG - Marne-la-Vallée
Tania Landes
Maître de Conférences
INSA de Strasbourg

Responsable du site Internet

Tania Landes

Publicité

Samuel Guillemin
Tél. : 06 72 12 08 97
communication@aftopo.org

Conception et maquette

Dorothée Picard

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

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

Dépôt légal

4^e trimestre 2007 ISSN 0290-9057
N° CPPAP : 01 11 G 80 866

Tirage de ce numéro : 1600 ex**Abonnement annuel**

France CEE : 83 €
Etranger (avion, frais compris) : 86 €
Les règlements payés par chèques
payables sur une banque située hors
de France doivent être majorés de 10 €,
sauf à utiliser l'identifiant international
de compte IBAN
FR08 3004 1000 0116 3000 3Y02 023
Le numéro : 20 €
Le bulletin d'adhésion est en p. 72
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.

Photo de couverture : Pierre Ribot en pleine
action - ©Dan Ferrer - dan@twib.biz

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

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

Courriel : info@aftopo.org • Site Internet : <http://www.aftopo.org>

■ Editorial 5**■ Info-Topo**

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

■ Manifestations

> Le FIG 2007 : La planète en mal d'énergies

Jean-Pierre MAILLARD 14

> Conférence francophone

ESRI SIG 2007 15

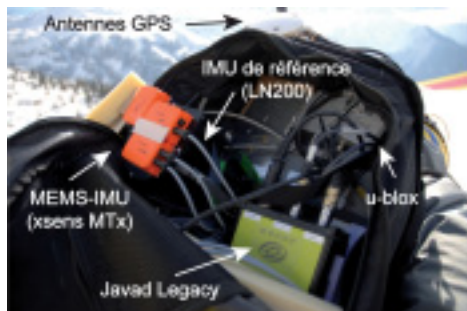
> Intergeo® salon international
de la géodésie, de la géomatique
et de la gestion du territoire



Olivier REIS 16

> Québec Capitale de la géomatique en 2007

Emmanuel NATCHITZ 18

■ GPS

> L'analyse de performance sportive à l'aide
d'un système GPS/INS low-cost : évaluation
de capteurs inertiels de type MEMS

Adrian WAEGLI - Jean-Marie BONNAZ
Jan SKALLOUD 19

■ Géodésie

> Le Quasi-géοide libanais (QGL06) et la
référence d'altitude du NGL (RAL 06)

Mohamed ALLOUCHE - Joseph FARAH 25

**■ Topographie :
un demi-siècle d'évolution
technologique (4/4)**

> L'avènement des satellites, la géodésie
spatiale, le GPS

> La topogrammétrie

Paul COURBON 29

■ Topographie

> Journées de la Topographie :

Etat et tendances de l'art topographique
Mathieu KOEHL 45

■ Bicentenaire du Cadastre

> Impact des évolutions technologiques
actuelles sur les levés cadastraux

Michel KASSER 51

> Les modalités de constitution
du cadastre napoléonien

Pierre CLERGEOT 56

■ Topo vécue

> Hélicoptère et Géodésie en Antarctique

Jean-Jacques DERWAELE 61

> Un ventilateur à nuages
(Imprévu et imprévoyance)

Robert CHEVALIER 64

■ Livres 67**■ Art et Géométrie**

> Maria-Carmen Perlingeiro :
la légèreté de l'albâtre

Jean-Pierre MAILLARD 68

**PROCHAIN XYZ - n° 114
NUMÉRO SPÉCIAL SIG**

Pour la recherche de nos annonceurs
consulter la page 67.

Galileo : la fin d'un feuilleton qui a failli devenir mauvais ?

C'est vrai que le démarrage du projet Galileo avait été remarquable à plus d'un titre : l'Europe se rendant compte de la réelle volonté hégémonique des USA, et surtout de leur armée, sur les moyens mondiaux de localisation précise, avait réussi à trouver un consensus sur un montage bien plus intéressant que celui offert par le GPS. Le but était en effet, pour les usagers, d'être face à un opérateur assumant ses responsabilités de diffuseur de signaux, et ne pouvant les interrompre pour quelque raison politique que ce soit. Et puis la première présentation un peu critique sur la scène mondiale, au début du siècle, avait donné lieu à une sorte de lancement en fanfare : la conférence internationale des télécommunications d'Istanbul avait permis d'allouer les fréquences indispensables au fonctionnement de Galileo, fréquences tellement précieuses, et ceci en opposition forte avec les USA. Et derrière ce léger parfum d'américanophobie toujours à la mode, se cachait alors un vrai sujet de gouvernance mondiale, les USA cherchaient alors assez activement à torpiller le projet Galileo, et pas seulement parce que celui-ci anticipait une certaine façon de bousculer leur tutelle. Ils voulaient absolument pouvoir en brouiller les signaux selon leurs éventuels besoins de sécurité (appréciés souverainement par eux-mêmes bien entendu), ce qui devenait relativement difficile dans cette nouvelle configuration, puisqu'alors le brouillage risquait d'affecter aussi leur propre GPS.

Bref, un lancement en fanfare dans la cour des grands...

Hélas, les épisodes suivants ont été moins glorieux, certains d'entre eux étant d'ailleurs sans doute appuyés sur la ligne de partage entre pro- et anti-américains des différents pays européens, toujours fluctuante car basée sur de nombreux non-dits, et donc sur des oppositions plutôt théoriques et très faciles à réactiver. Et puis, cette fois-ci dans le registre de la pure théorie économique, les politiciens européens avaient infligé à Galileo l'obligation de rentrer dans le moule des idées à la mode, et avec un beau mépris des contingences évidentes, avaient requis un cofinancement important issu du secteur privé. Comme si on pouvait envisager de trouver facilement des retours financiers d'un dispositif directement concurrent d'un système d'accès entièrement gratuit... C'est ainsi qu'alors la France trouvait à financer sur fonds propre le TGV-Est, l'Europe entière ne trouvait pas une somme nettement moindre pour financer Galileo.

Le bon sens économique des industriels n'a pas tardé à reprendre le dessus, et il a fallu attendre des années avant de revenir vers une décision inéluctable : un financement entièrement public de Galileo était indispensable. Restait alors à trouver l'argent, à éviter de décevoir les industriels en leur promettant une part de travail pour chacun, forme de Meccano habituelle en matière spatiale, mais toujours assez longue à négocier et, victoire ! On a apparemment trouvé le 23 novembre 2007 la solution qui semble convenir à tous. On peut donc revenir aux choses sérieuses mais, que diable, combien ces théoriciens économistes peuvent nous coûter cher !

Et pour nous, les topographes, les géomaticiens de tout poil, etc... eh bien c'est aussi une bonne nouvelle, parce que 30 satellites de plus dans le ciel pour nous localiser, c'est une grosse amélioration pour toutes les zones ayant un horizon peu dégagé, les espaces urbains, où nous devons majoritairement travailler, puisque nous travaillons là où sont les hommes. Espérons que la suite ira vite ! Et saluons quand même ces pas successifs (même lents, mais enfin consensuels) de la construction européenne, qui nous assure depuis sa naissance une si longue période de paix, longue comme l'Europe n'en a peut-être bien jamais connue auparavant...

Michel Kasser

Le Portail Francophone de la Géomatique sur Internet

GeoRezo.net
Le portail francophone de la Géomatique

L'histoire

Association loi 1901 depuis juin 2004, GeoRezo – Le Portail Géomatique est présent sur Internet depuis avril 1998 lors de la création de la liste Géomatique, une liste de diffusion par messagerie électronique traitant de sujets techniques et généraux sur l'information géographique et les Systèmes d'Information Géographique. Conglomérat de sites personnels, puis site collectif dès 1999, ce portail communautaire d'échanges sur l'information géographique, est devenu au fil des années une "référence" du secteur. L'association compte aujourd'hui 28 modérateurs bénévoles qui prennent en charge les développements et l'administration du site <http://georezo.net>, la modération et l'animation des forums techniques, et qui participent également à la vie de la profession au travers d'échanges avec l'AFIGEO <http://www.geo-entreprises.fr> et le CNIG (groupe formation-recherche).

Les forums

Les canaux de diffusion d'information ont été complétés au fil du temps pour couvrir plus efficacement de nouvelles thématiques. La refonte des listes de diffusion et le passage en septembre 2005 à un mode de forums groupés par grande famille, en ont considérablement ouvert l'accès :

- Généraliste avec le forum phare, Géomatique, et le Mémento,
- Logiciels avec les titres majeurs du marché SIG du moment, Autodesk® SIG, ESRI®, FME®, GeoConcept®, GeoMedia®, Mapinfo® et MAPublisher®,
- Open Source avec les SIG libres bureautiques et les solutions libres pour le web,
- Thématiques centrés sur des domaines précis tels que les bases de données



nées géographiques, le géomarketing, la télédétection, la topographie et le webmapping,

Ces forums techniques sont complétés par des canaux de diffusion d'informations spécifiques sur le marché de la géomatique française :

- GéoPromo, le canal de l'information promotionnelle pour les entreprises et les offres de formation.
- Appels d'offres, pour la diffusion des marchés et consultations publics.
- Job, devenu la référence de la diffusion d'offres d'emploi et de stage.
- La banque et la carte des CV, complètement indispensable du forum Job.

Les autres outils du portail

Le travail de regroupement et de structuration des ressources est aussi réalisé au travers d'outils comme l'annuaire, la bibliographie, l'agenda géolocalisé, la carte des membres ou encore plus récemment avec les Géo-Entreprises en partenariat avec SIG La Lettre et l'AFIGEO. Dernièrement, ce sont les GéoBlogs qui ont été lancés, offrant un nouvel espace de publication d'informations sur le secteur de la géomatique.

La démarche métier

L'activité de GeoRezo ne se limite pas à la seule maintenance de son site et de ses différentes ressources. L'association s'investit depuis 2002

dans une démarche "métier" dont elle est à l'initiative aux côtés de l'AFIGEO et du CNIG pour une meilleure reconnaissance et valorisation des métiers de la géomatique. Deux enquêtes menées en 2003 et en 2005 ont permis de rassembler des éléments de connaissance très utiles pour les actions entreprises auprès des organismes de la sphère de l'emploi et de la formation (ANPE, l'APEC, le CNFPT ou l'ONISEP...). GeoRezo a également participé aux deux dernières assises des géomaticiens organisées par l'AFIGEO portant plus avant cette démarche de reconnaissance et d'organisation de la profession.

Finalement, que vous apporte GeoRezo ?

- Des réponses techniques, et des échanges généralistes, une veille technologique, une communauté de discussion composée de très nombreux professionnels.
- Une diffusion gratuite vers un public ciblé de vos offres d'emplois, de vos appels d'offres, de votre CV.
- La possibilité de consulter une cartographie des entreprises de l'information géographique, et de géolocaliser gratuitement la vôtre.
- GeoRezo : plus de 8 000 membres, plus de deux millions de pages lues en 2006. Le tout totalement gratuit... 1

► Pour plus d'information :
<http://georezo.net>

Le FIG 2007 : La planète en mal d'énergies

■ Jean-Pierre MAILLARD

Dans son allocution d'ouverture de la 18^e édition du Festival international de géographie de Saint-Dié-des-Vosges (FIG) Christian Pierret, Président fondateur, a justifié la thématique de l'énergie car elle est au cœur de l'actualité nationale et internationale, indissociable de la prise de conscience dans l'opinion publique de la gravité des dangers qui guettent la planète. Dans cet esprit il a souscrit à une "révolution énergétique des mentalités" qui donne au leitmotiv du développement durable "penser globalement, agir localement" une traduction personnelle "penser environnement, agir individuellement".

On ne se lasse pas de participer au FIG. Cette année encore, le succès était au rendez-vous preuve que, pour leur part, les organisateurs n'ont pas été en mal d'énergie ! Bien sûr ce succès tient à la diversité des conférences, à l'intérêt des expositions, à l'attraction du pays invité – cette année la Roumanie – et à la qualité des intervenants comme à celle des personnalités présentes. Sous la présidence d'Azouz Begag, ancien ministre, les participants ont pu croiser et écouter aussi bien Edith Cresson, Elisabeth Roudinesco, Hubert Védrine que Richard Bohringer et Bernard Giraudeau. Mais au-delà de leur présence active mais non moins médiatique, le FIG a ce petit quelque chose qui enchante au-delà de la gratuité. C'est un moment particulier de communication, où l'on peut facilement parler à son voisin même s'il s'agit d'une personnalité connue, un moment où l'on prend du temps pour l'écoute et l'échange. A titre d'exemple, je ne suis pas prêt d'oublier, dans une ambiance de fête populaire, en marge du salon de la gastronomie le repas roumain partagé avec l'écrivaine Marie Rouanet sur la nappe en papier d'une table en bois.

Comme chaque année le prix Vautrin-Lud, le "Nobel de physique" a été solennellement décerné, attribué cette fois à Michael Franck Goodchild. Aujourd'hui professeur au département de géographie de l'Université de Santa Barbara, il est mondialement reconnu comme fondateur et promoteur des systèmes d'information géographique (SIG). Depuis le début des années 80, véritable globe-trotter de l'enseignement et de la recherche, il est passé successivement de l'Université du Western Ontario au Canada à plusieurs autres universités des Etats-Unis et de l'Australie pour rejoindre in fine la Californie.



© Escande Ghislaine

Auteur de plus de quatre cents publications scientifiques il a également exercé les fonctions de rédacteur en chef de la revue *Geographics analysis*.

Le salon de la géomatique s'est tenu dans les locaux du musée Pierre-Noël. Le public étant à dominante enseignant, les exposants privilégient des offres tournées vers la pédagogie qu'ils soient organismes de formation ou professionnels. Bicentenaire de la Révolution oblige, la Direction des services fiscaux vosgienne, bien présente sur le salon, a montré dans une présentation didactique l'évolution des matériels de lever depuis deux cents ans et celle du plan correspondant. Au stand de l'ENSG le Géoportail, le portail des territoires et des citoyens, a sans doute été le plus regardé. Dans sa conférence, sur ce point, Marc Léobet du ministère de l'écologie, a souligné la pluralité des géoportails dont la finalité vise à permettre au plus grand nombre "de trouver, de voir, de télécharger et de partager". Devant la multiplication des sites et dans un souci de qualité il estime qu'une plus grande visibilité et une labellisation doivent être recherchées. Constatant que le téléchargement des données des administrations et des collectivités territoriales devient accessible il pense qu'une voie s'ouvre à la valeur ajoutée. Partant, une économie naissante va trouver un champ libre pour des usages inédits et innovants qui concourront à un futur interactif et partagé. Dans une autre intervention, Yves Riallant, secrétaire général de l'AFIGéO a pour sa part présenté l'état de l'information géographique attachée à la surveillance et à l'information de l'environnement qui oscillent entre le global et le local. L'analyse montre que tout concourt à la mise en place d'une centralisation mondiale des systèmes d'observation de la Terre précisément vers le registre GEOSS.

Même si la géomatique a toute sa place dans la manifestation

et pourrait justifier la présence de l'AFT et sa revue lors des festivals à venir, les questions géographiques sont bien sûr les plus nombreuses. Pour illustrer la diversité des sujets, parmi plus de cent conférences on remarque celle tenue, sous la forme d'une interview, par Jean Bastié Président de la société de géographie, sur le remarquable parcours professionnel d'Emmanuel de Martonne (1873-1955) dont l'intérêt a été constant pour la Roumanie, la géomorphologie et la climatologie et à qui l'on doit la création de la licence et de l'agrégation de géographie. On remarque aussi, dispensée dans la cathédrale, la conférence de Jean-Robert Pitte, Président de l'Université Paris-Sorbonne sur la géographie des énergies spirituelles ou encore, au lycée Jules Ferry celle relative à l'avenir de l'énergie du cheval traitée par Sylvie Brunel et Bénédicte Durand, professeurs des Universités.

La visite au salon du Livre suscite également l'intérêt. Celui de la proximité avec les auteurs qui sont nombreux à dédicacer leurs écrits et la certitude d'être dans son milieu professionnel puisqu'on y trouve notamment les ouvrages de Raymond d'Hollander.

La part faite aux expositions par le FIG est tout aussi significative. Dans ce cadre, le public a pu apprécier les œuvres de Ghislaine Escande⁽¹⁾ réunies sous le titre "Des Terres et des Mers". La plasticienne maîtrise parfaitement l'art de donner une nouvelle jeunesse aux cartes anciennes et périmées car en mêlant toutes les représentations, ses tableaux ouvrent la voie à de nombreux voyages imaginaires. Ghislaine Escande a également présenté un livre d'artiste titré "Brèves légendes du portulan de l'Insoumise" réalisé en partenariat avec Gilbert Lascaux, écrivain et critique d'art. L'illustration ci-contre montre une des treize cartes de la série, les cartes inventées d'un bateau métaphore.

Rendez-vous l'année prochaine pour la 19^e édition du festival du 2 au 5 octobre 2008 sur le thème "Entre guerres et conflits : la planète sous tension".

► Pour tous renseignements : www.fig-saintdie.com
www.escande.info

(1) voir xyz n° 91

Conférence francophone ESRI SIG 2007

Ronnie Gal, PDG d'ESRI France, a introduit la Conférence Francophone ESRI 2007 en soulignant un événement connu et reconnu au-delà même des frontières de la Géomatique. SIG 2007, qui s'est déroulée pour la première fois à Versailles, a accueilli cette année 110 communications d'utilisateurs de différents pays et représentant une diversité exceptionnelle et inégalée d'expériences en matière d'utilisation de la dimension géographique. L'intérêt de la rencontre a été renforcée dans un "Village d'entreprises" par la présence de 60 partenaires technologiques et de média.

Pour illustrer cette diversité, ESRI France a invité, en qualité de témoins, trois maîtres d'ouvrage dont les applications SIG sont significatives :

- L'Atelier Parisien d'Urbanisme (APUR) a présenté l'étude sur la localisation des stations Vélos en libre-service (Vélib). La demande potentielle a été évaluée au regard des caractéristiques urbaines (densités de population et d'emploi, présence de commerces, d'équipements, de services, localisation des stations de transports...) et grâce au SIG, proposé un maillage et un dimensionnement des stations.
- Les Nouvelles messageries de la presse parisienne (NMPP) qui depuis 60 ans font quotidiennement le lien entre les édi-

teurs de presse (quotidienne et magazines) et les lecteurs, ont eu recours au SIG pour répondre servir sa mission : mettre à disposition les titres là où se trouve le potentiel ou le besoin.

- En créant l'outil "Info-service du REIN" l'Agence de biomédecine utilise un SIG pour disposer d'une meilleure connaissance des variations géographiques dans la fréquence des maladies ou des disparités d'accès aux soins et à la greffe en soulignant l'impact important sur la politique de santé.

Un CD-Rom rassemble les communications présentées dans le cadre de SIG 2007 ainsi que les informations sur les partenaires associés à l'événement dont XYZ présent dans le village d'entreprises qui remercie ERSI France pour son accueil. 1

► Pour tout renseignement : www.esrifrance.fr



Au stand de l'AFT de gauche à droite : J.-P. Maillard, P. Gaubert et J. Riffault.

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

■ Olivier REIS

Il y a un peu moins de deux siècles, en octobre 1813, Leipzig et ses alentours furent le théâtre de la bataille des Nations, la plus grande et certainement la plus sanglante (près de 100 000 morts...) des confrontations ayant opposé les armées napoléoniennes aux forces coalisées. Aujourd'hui, les rencontres organisées dans cette grande ville du Land de Saxe sont heureusement plus pacifiques, comme l'édition 2007 du salon Intergeo® qui a vu y converger, du 25 au 27 septembre, des professionnels de la géodésie, de la géomatique et de la gestion du territoire venus du monde entier et des horizons les plus divers.

Après la démesure de l'édition 2006 à Munich où Intergeo® était couplé au 23^e congrès international de la FIG (cf. XYZ n° 109, décembre 2006), la manifestation est revenue à des proportions plus habituelles sans renoncer pour autant à sa traditionnelle scission 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 près de 1 500 participants qui ont pu assister à plus d'une centaine de conférences regroupées par blocs thématiques (une vingtaine pour la partie Intergeo® du congrès, allant des GNSS à la géolocalisation en passant par les infrastructures de géodonnées, l'aménagement du territoire, la gestion immobilière, les modèles urbains en 3D, les tendances actuelles dans le secteur des SIG ou encore le balayage laser ou laser scanning) au sein desquels une même question était abordée sous les angles les plus divers. Il est cependant à noter que la plupart des interventions se sont faites en allemand, les orateurs, comme le public, venant pour l'essentiel de pays germanophones. Certaines étaient toutefois en anglais et un rééquilibrage au profit de cette dernière langue devrait s'opérer dans les années à venir. Des forums étaient par ailleurs organisés en parallèle aux blocs thématiques et permettaient à des entreprises de venir présenter brièvement leurs nouveautés (thèmes concernés : photogrammétrie et balayage laser -



technologies utilisant les satellites, la photo aérienne et les capteurs de mesure – SIG – infrastructures de géodonnées – applications et solutions SIG – applications 3D).

Comme indiqué précédemment, l'édition 2006 d'Intergeo® s'est déroulée dans un contexte et des conditions particulières rendant toute comparaison impossible. Nous retiendrons donc ici les chiffres clés de l'édition 2005 qui s'était tenue à Düsseldorf. Pour mémoire : 25 000 m² de surface d'exposition, plus de 16 000 visiteurs et 515 exposants en provenance de 24 pays. On note par conséquent une stabilisation de la surface d'exposition (25 000 m² également à Leipzig), une légère hausse du nombre de visiteurs (16 500 cette année), un recul du nombre d'exposants (revenu à 484 cette année) mais une petite progression du nombre de pays représentés (28 contre 24). A y regarder de plus près, le poids du pays organisateur reste écrasant, 70% des stands étant occupés par des entreprises allemandes ou supposées telles : en effet, toutes les sociétés multinationales, et elles sont tout de même quelques-unes, sont représentées par leur filiale allemande et bon nombre de sociétés de taille moyenne agissent désormais de même (c.-à-d. en ouvrant des filiales dès que des perspectives s'esquissent sur un marché local) de sorte que la réalité est nettement plus nuancée. Quant aux 30% restants, officiellement estampillés "étrangers", ils réservent quelques surprises à qui prend la peine d'éplucher le catalogue. Seuls cinq pays atteignent la barre des dix stands répertoriés : les Etats-Unis et le Royaume-Uni (15 chacun), la Suisse (14), les Pays-Bas (12), et la Chine (10)... Viennent ensuite l'Autriche (9), le Canada (7) et l'Italie (7) puis la France (5) dont la modestie de la participation ne cesse de susciter l'étonne-

ment, année après année. Pour ce qui concerne les autres pays représentés, douze d'entre eux ne le sont que par un ou deux stands, donc de façon plutôt symbolique.

Si l'on braque à présent les projecteurs non plus sur les exposants mais sur les visiteurs, l'amplification de l'ouverture à l'international qui constituait l'objectif majeur affiché par les organisateurs à l'issue de l'édition 2006 à Munich, laquelle était censée créer un appel d'air, s'est traduite par un nombre assez élevé de nationalités représentées (une cinquantaine aux dires des organisateurs) mais qui le furent certainement de manière très inégale. A défaut de chiffres disponibles, on se permettra ici de faire référence aux échos perçus sur divers stands attestant d'un fort contingent de visiteurs issus des pays d'Europe centrale et orientale. La proximité avec les frontières polonaise et surtout tchèque n'y est sans doute pas étrangère, de même que les relations, pas si anciennes, entretenues avec ceux qui étaient naguère des "pays frères". N'oublions pas que Leipzig était, il y a encore vingt ans, de l'autre côté du rideau de fer et qu'au-delà de cette période tragique du siècle dernier, le "poids de l'histoire" est particulièrement lourd dans cette partie de l'Europe. En revanche, le sentiment de brassage et de cosmopolitisme si patent l'an passé à Munich était bien plus diffus cette année. En résumé, s'il est indéniable que l'ouverture d'Intergeo® se poursuit (le renforcement constant de la présence chinoise en est un exemple), elle n'a peut-être pas atteint l'ampleur escomptée que la manifestation de l'an passé laissait espérer.

Observons enfin, concernant la fréquentation, la faiblesse de la progression du nombre de visiteurs en dépit de l'internationalisation. Il est fort probable que le salon ait atteint ou soit en passe d'atteindre la saturation sur son marché domestique, à savoir les professionnels de la topographie dans l'espace germanophone, raison pour laquelle il cherche à s'étendre toujours plus au-delà des frontières de ce cadre géographique mais aussi au-delà du champ de la topographie, même considérée au sens le plus large, pour s'ouvrir à de nouveaux domaines connexes (comme en témoignent l'organisation d'une journée de l'immobilier et d'une journée des architectes et concepteurs de bâtiments).

Cette extension va d'ailleurs dans le sens du marché puisque les produits (parmi lesquels on comptait un nombre record de nouveautés cette année) que l'on pouvait découvrir en parcourant les allées du salon s'adressaient bien souvent à un éventail d'utilisateurs dépassant largement le cadre de la topographie. Et cela, à tous les niveaux de la chaîne de trai-



Intergeo® 2007 en bref :

- **Plus de 25 000 m²** de surface d'exposition
- **484 exposants** (dont bon nombre de "sous-exposants" présents sur des stands de partenaires commerciaux)
- **28 pays représentés** (Afrique du Sud, Allemagne, Autriche, Belgique, Bulgarie, Canada, Chine, Croatie, Danemark, Espagne, Etats-Unis, Finlande, France, Hongrie, Inde, Israël, Italie, Norvège, Pays-Bas, Pologne, Portugal, République tchèque, Royaume-Uni, Russie, Suède, Suisse, Turquie, Ukraine)
- **Plus de 16 500 visiteurs** entre le 25 et le 27 septembre
- **Près de 1 500 participants** au congrès
- **Couplage à la 55^e journée des cartographes** allemands
- **Plus de 100 conférences** au total abordant une très large variété de thèmes.



tement des données, de leur saisie à leur exploitation en passant par leur gestion. L'exemple le plus frappant est peut-être celui des scanners laser : cette année plus encore que les précédentes, les fabricants de ce type d'instruments et les prestataires de services dans ce domaine ont occupé une part importante de la surface d'exposition. Tous les acteurs principaux du marché ont intégré cette technologie à la gamme de leurs produits ou prestations de services. Et ceux qui ne l'ont pas fait semblent pouvoir s'en mordre les doigts. Couplés à des outils de traitement puissants de l'information (vu la taille des volumes de données générés), ils ouvrent la voie à de nouvelles applications dans des domaines encore inexplorés voilà peu. Autre exemple, d'ailleurs lié au précédent par certains aspects : l'importance prise par la troisième dimension et les possibilités qu'elle offre, entre autres en termes de visualisation. Dans ce cas également, la richesse des applications permises dépasse le cadre de la topographie et ouvre de belles perspectives à qui saura les saisir.

En résumé, Intergeo® est une vitrine qui permet à qui veut bien s'en donner la peine de dresser un constat annuel de l'état des techniques en géodésie et en géomatique et d'en suivre l'évolution et les tendances en s'y rendant à intervalles réguliers. Deux options sont finalement possibles : suivre tous les développements intervenant sur un segment du marché que l'on connaît bien et dont tous les acteurs principaux sont présents au rendez-vous ou se faire une idée globale de l'état du marché de la géodésie et de la géomatique, en capter les tendances de fond et en deviner les orientations pour mieux pouvoir s'y adapter. Ce faisant, Intergeo® pourrait être comparé, avec un soupçon d'imagination, à un thermomètre indiquant, avec une précision et une fiabilité assez bonnes, l'état de santé de notre profession...

S'il ne nous appartient pas d'assurer la promotion de cette manifestation, il est de notre rôle d'en souligner l'importance et, par voie de conséquence, d'annoncer d'ores et déjà la tenue de sa prochaine édition du 30 septembre au 2 octobre 2008 à Brême. 1

Québec Capitale de la géomatique en 2007

■ Emmanuel NATCHITZ

Québec a accueilli du 2 au 5 octobre 2007 le Géo-congrès Québec 2007 pour commémorer de nombreux "géo-anniversaires". L'organisation de ce congrès a été assurée par l'ordre des arpenteurs-géomètres, la section Champlain de l'Association canadienne des sciences géomatiques, l'Université de Laval et le ministère des Ressources naturelles et faune du Québec. Plus de 1 200 participants venus d'une quarantaine de pays ont répondu à l'invitation "histoire de voir le monde".



QUÉBEC 2007
HISTOIRE DE VOIR LE MONDE

C'est sous cette thématique que les organisateurs ont réuni durant ces trois jours des géomaticiens, géomètres et arpenteurs pour partager leur vision de nos professions dans 20 ans. Les "géo-anniversaires"¹ célèbres montrent l'attachement du Canada à la description du Territoire et au monde de la cartographie en général.

Une importante délégation française a répondu à l'invitation de nos "cousins" Canadiens. L'OGE a fait le voyage avec une délégation de 40 personnes (dont certains ont proposé de brillantes allocutions). Le CERTU est venu parler de la qualité des données géographiques. Les écoles d'ingénieur françaises avaient bien sûr fait le déplacement (ESTP, ESGT).

Des sessions de formations, des tables rondes de discussions et des présentations se sont succédées durant ces géo-journées. Les discussions ont porté à la fois sur des notions juridiques (droit des sols, cadastre, etc.) mais aussi sur des aspects plus techniques (modélisation 3D, GNSS, acquisition de données). Toutes ces discussions avaient comme leitmotivs le partage intelligent des données géographiques. En parallèle à toutes ces séances, les étudiants ont affiché des posters présentant leurs travaux d'études.

La fédération des géomètres francophones et la FIG en ont profité pour se réunir en assemblée générale et animer des groupes de travail. Une exposition de matériels et logiciels illustrait les propos des conférenciers. Les entreprises françaises sont venues présenter leurs savoir-faire (JS INFO, Géomensura).

Mais Québec est aussi une ville très accueillante, surtout à cette période de l'année. Les organisateurs ont choyé les participants en proposant aussi des activités festives. Des dîners-débats, des visites culturelles ont permis de découvrir ou redécouvrir le patrimoine de ce site. Bordée par le fleuve Saint Laurent, la ville de Québec recèle de trésors architecturaux qui la rendent très agréable à contempler sous la lumière et les couleurs d'automne.

Ces trois jours se sont clôturés par une session plénière pour apporter un éclairage final à la question "Quelle est votre vision de notre profession, de notre secteur d'activités, de notre rôle de notre monde dans 20 ans ?"

Il est rassurant de voir que la géomatique sera, sans conteste, au cœur de nos sociétés. Le besoin de se (re)positionner, en extérieur comme en intérieur reste un fondement de nos attentes. L'évolution majeure pourrait être l'intégration encore plus importante de la notion de temps dans nos mesures. La notion de l'information géospatiale doit être complétée par l'application qu'elle sert. Pour synthétiser, il faut pouvoir répondre aux questions Ou ?, Quand ?, Comment ?, et ce, de façon rapide pour ne pas dire instantanée. Le changement radical du type d'économie est une composante importante dans l'évolution de nos activités. Nous allons passer, selon Pierre Dujardin² de l'économie de "pénurie" à celle "d'abondance". L'informatique, les télécommunications et Internet nous ont déjà prouvé cette métamorphose.

M. Styli Camateros³ a précisé, par ailleurs, que pour les 25 prochaines années, l'investissement pour le maintien des infrastructures allait nécessiter 40 000 milliards de dollars. 30 % de ce montant serait gaspillé majoritairement par un mauvais transfert d'informations. Pour éviter cet état de fait, notre profession peut apporter des solutions viables. Ne sommes-nous pas les garants de la qualité de l'information géographique ? Alors soyons pragmatiques, nous avons un bel avenir devant nous.

1

► Pour plus d'informations: www.quebec2007.ca

(1) Ordre des arpenteurs géomètres, Association canadienne des sciences géomatiques, Département des sciences géomatiques de l'université Laval, et à la naissance de la Fédération des géomètres francophones

(2) Directeur de TRIMBLE Solution GNSS Infrastructure

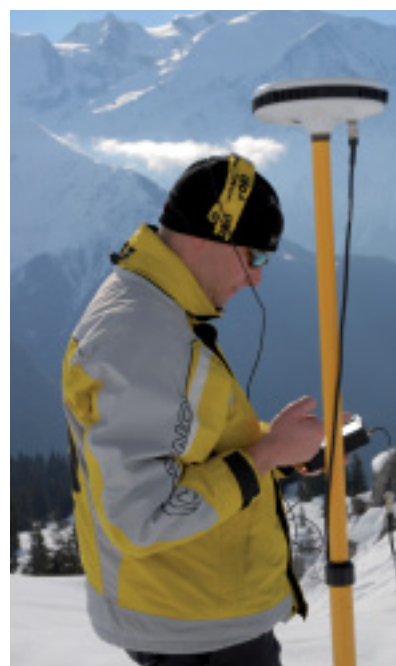
L'analyse de performance sportive à l'aide d'un système GPS/INS low-cost : évaluation de capteurs inertiels de type MEMS

■ Adrian WAEGLI - Jean-Marie BONNAZ - Jan SKALOU

Les skieurs s'intéressent au GPS (Global Positioning System) pour évaluer leurs performances. Les positions enregistrées durant les entraînements et les courses permettent d'analyser les trajectoires et de comparer vitesses, accélérations et autres paramètres liés à la performance sportive (p. ex. la fréquence cardiaque). Malheureusement, l'environnement montagneux, la dynamique relativement élevée du skieur et les restrictions ergonomiques dépassent souvent les limites technologiques actuelles. Des centrales inertielles de type MEMS (Micro-Electronic-Mechanical Systems) couplées à des récepteurs GPS offrent une certaine autonomie lorsque le signal GPS est défectueux. Malheureusement, les capteurs MEMS-IMU (Inertial Measurement Unit) ont des erreurs systématiques importantes et de comportement peu connu. Cet article présente une expérience durant laquelle un skieur a été équipé avec des récepteurs GPS, des capteurs MEMS-IMU et une centrale inertielle haut de gamme servant de référence. Cette expérience a permis d'analyser le comportement d'erreur des MEMS-IMU et d'investiguer la performance de l'intégration GPS/MEMS-IMU en termes de position, vitesse et orientation.

■ mots-clés

performance sportive,
GPS, MEMS-IMU,
trajectoire



Dans beaucoup de sports, la différence de niveau entre athlètes devient de plus en plus faible. Très souvent, la victoire d'un athlète repose sur un "détail" qui permet de faire la différence. Cependant, les méthodes d'analyse de performance des athlètes usuelles se basent sur des chronométrages ou des enregistrements vidéo [1]. Elles semblent limitées par certains facteurs tels que les conditions météorologiques ou la difficulté de reproduire les mêmes postures et mouvements d'une descente à l'autre. De plus, elles ne fournissent que peu de variables quantitatives permettant de juger la performance sportive de manière objective. GPS (Global Positioning System) est une technologie permettant de calculer des positions et des vitesses qui a déjà

fait ses preuves dans le domaine des sports motorisés [2] et aquatiques [3, 4]. Dans le ski Alpin, les changements de constellation, les multi-trajets ainsi que la haute dynamique rendent la résolution des ambiguïtés difficile voire impossible [5]. La mise au point d'un système autonome permettant de combler les carences du GPS s'impose. Des centrales inertielles couplées à des GPS augmentent l'autonomie de positionnement lorsque des obstacles bloquent le signal GPS et offrent en plus du GPS la possibilité de déterminer l'orientation du mobile. Malheureusement, le coût et la taille des centrales inertielles et des récepteurs GPS haut de gamme ne permettent pas d'envisager une telle intégration pour des applications sportives.

■ Ces limites ergonomiques et financières nous restreignent à utiliser des récepteurs GPS mono-fréquence et des centrales inertielles de type MEMS (Micro-Electronic-Mechanical Systems) [5, 6]. Depuis quelques années, la société TracEdge (Grenoble, France) et le laboratoire de topométrie de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL – Suisse) mettent au point un système miniaturisé et abordable visant le marché des sportifs confirmés. Cette intégration de capteurs bon marché pose de nouveaux défis tels que la modélisation d'erreur des capteurs MEMS-IMU. En effet, leurs propriétés d'erreur ne semblent pas permettre de décorréler efficacement biais, facteurs d'échelle, dérives et défauts d'alignement.

Dans cette perspective, une comparaison des mesures MEMS-IMU à des données d'une centrale inertielle haut de gamme (LN 200) sera présentée dans cet article. Elle se base sur des essais à ski et permet d'isoler certains paramètres d'erreur des capteurs inertiels. Ensuite, un filtre de Kalman étendu (EKF) permet d'intégrer les données satellitaires et inertielles. Il se limite à estimer des biais sur les accéléromètres et gyroscopes en appliquant un procédé de Gauss-Markov du 1^{er} ordre pour modéliser leurs erreurs. Ces biais sont comparés aux biais issus de la comparaison des signaux bruts afin d'analyser le modèle d'erreur choisi.

Intégration des mesures GPS avec des mesures MEMS-IMU

L'intégration GPS/MEMS-IMU présentée se base sur un filtre de Kalman étendu (EKF) en couplage lâche ; les mesures GPS sont post-traitées indépendamment avant d'être intégrées aux données inertielles [7, 8]. Les équations différentielles suivantes doivent être résolues [9] :

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{r}}^n \\ \dot{\mathbf{v}}^n \\ \dot{\mathbf{R}}_b^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}^{-1} \mathbf{v}^n \\ \mathbf{R}_b^n \mathbf{f}^b - (\boldsymbol{\omega}_{in}^n + \boldsymbol{\omega}_{ie}^n) \times \mathbf{v}^n + \mathbf{g}^n \\ \mathbf{R}_b^n (\boldsymbol{\omega}_{ib}^b - \boldsymbol{\omega}_{in}^b) \end{bmatrix}$$

avec \mathbf{r}^n le vecteur de position, \mathbf{v}^n le vecteur vitesse, \mathbf{R}_b^n l'orientation du capteur inertielle (repère b pour "body") par rapport au repère de navigation (n), \mathbf{f}^b les mesures accélérométriques et $\boldsymbol{\omega}_{ib}^b$ les mesures gyroscopiques.

En ce qui concerne le modèle d'erreur des capteurs MEMS-IMU, nous faisons l'hypothèse que leurs diverses sources d'erreurs (défauts d'alignement, des biais, des facteurs d'échelle ou des dérives) ne peuvent pas être décorrélées efficacement. Leurs propriétés d'erreurs est en effet peu connu et il est important de rappeler que l'erreur associée à un capteur inertielle MEMS détériore très rapidement la solution de navigation si elle n'est pas corrigée [10]. Pour les mesures inertielles, un modèle d'erreur simplifié a été choisi. Seuls des biais ont été modélisés par un procédé de Gauss-Markov du 1^{er} ordre :

$$\hat{\ell}^b = \ell^b + \mathbf{b}_{\ell^b} + \mathbf{w}_{\ell^b}$$

$$\dot{\mathbf{b}}_{\ell^b} = -\beta_{\ell^b} \cdot \mathbf{b}_{\ell^b} + \sqrt{2\sigma_{\ell^b}^2 \beta_{\ell^b}} \cdot \mathbf{w}_{\ell^b}$$

avec $\hat{\ell}^b$ la mesure MEMS-IMU compensée (force spécifique, mesure angulaire), ℓ^b l'observation, \mathbf{b}_{ℓ^b} le biais de la mesure inertielle, \mathbf{w}_{ℓ^b} le bruit de mesure, $\sigma_{\ell^b}^2$ l'amplitude de la densité spectrale et β_{ℓ^b} l'inverse du temps de corrélation.

L'utilisation de capteurs MEMS-IMU et du modèle d'erreur simplifié utilisé dans l'EKF soulève plusieurs questions :

- Quel est le comportement d'erreur des capteurs MEMS-IMU ?
- Est-ce que le modèle simplifié est approprié pour modéliser les erreurs inertielles ?
- Peut-on améliorer le modèle d'erreur en estimant d'autres termes d'erreur (p. ex. facteurs d'échelle, défauts d'alignement) ?
- Comment les paramètres d'erreur évoluent dans le temps ? Serait-il possible d'en calibrer certains ?
- Quelle est l'influence de divers modèles d'erreur sur la solution de navigation ?

Essais à ski

Afin de pouvoir répondre à ces différentes interrogations, l'EPFL et TracEdge ont réalisé plusieurs tests. L'objectif principal est de comparer la solution EKF intégrant des capteurs MEMS-IMU à une solution intégrant une centrale inertielle haut de gamme considérée comme référence. De plus, les signaux MEMS-IMU sont comparés à ceux de la centrale inertielle de référence afin d'étudier ses caractéristiques d'erreur. Pour ce faire, nous avons monté conjointement une centrale inertielle haut-de-gamme (LN 200) et plusieurs capteurs MEMS-IMU (xsens MTx). Les mesures GPS ont été faites par des récepteurs Javad Legacy bi-fréquence et ublox mono-fréquence. Le tout a été fixé solidement sur le dos d'un skieur (figure 1). L'expérience a été réalisée dans la station de Passy Plaine-Joux (Haute-Savoie, France) sur une piste bien

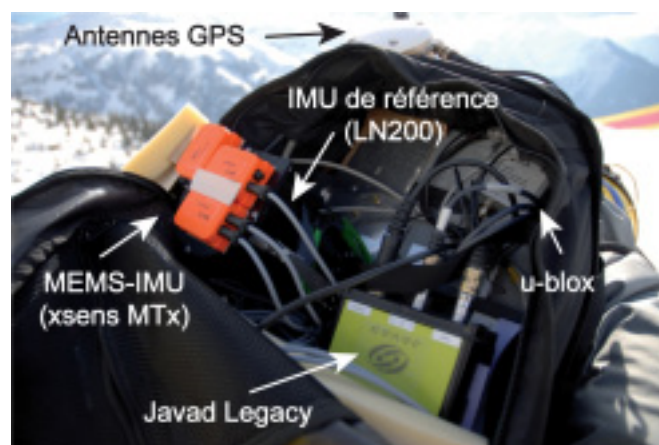


Figure 1 : L'équipement de l'expérimentation.

dégagée. Un athlète a réalisé une dizaine de slaloms géants d'une durée de 90 s environ. Une descente se décompose en deux périodes statiques (une au départ, l'autre à l'arrivée) et d'une période dynamique (figure 2).

Les données de la LN 200 (400Hz) couplées avec les données GPS bi-fréquence (1Hz) permettent le calcul d'une solution de référence avec un logiciel commercial (PosProc, partie verte de la figure 3). Comme les facteurs d'échelle se sont avérés non significatifs par rapport à leur écart-type estimé, uniquement des biais ont été estimés.

De la même manière, une solution inertielle a été calculée avec l'EKF en utilisant des mesures GPS bi-fréquence (1 Hz) et des données MEMS-IMU (100 Hz, partie rouge de la figure 3). Nous avons préféré utiliser pour ce travail les données GPS bi-fréquence aux données GPS mono-fréquence pour étudier véritablement l'influence des MEMS-IMU sur la solution de navigation, sans introduire des incertitudes liées à la précision GPS mono-fréquence. La performance du système L1 GPS/MEMS-IMU a été présentée dans [7, 11].

Comparaison des données inertielles brutes

Dans un premier temps, nous avons comparé les signaux des MEMS-IMU aux signaux de référence afin de détermi-

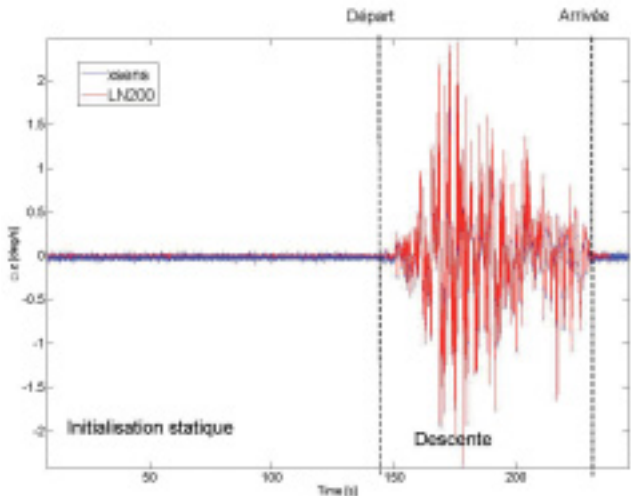


Figure 2 : Définition des périodes de calcul.

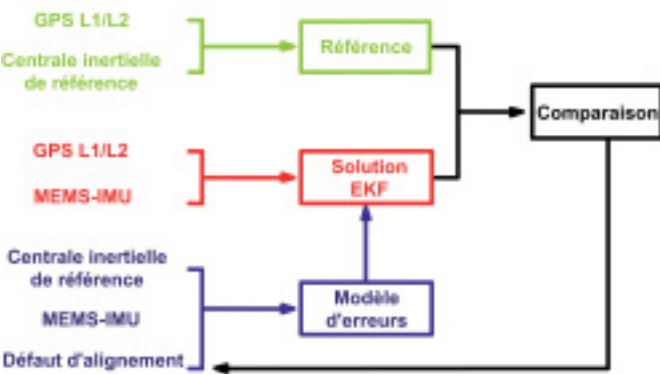


Figure 3 : Méthodologie d'analyse.

ner les erreurs qui affectent ces derniers. Pour ce faire, nous avons filtré les données LN 200 et MEMS-IMU avec un filtre passe-bas pour éliminer un maximum de bruit. Il a fallu également corriger le défaut d'alignement entre les axes de la centrale inertielle LN 200 et ceux des MEMS-IMU (partie bleue de la figure 3). L'estimation de ces angles de boresight (angles entre les repères liés à la LN 200 et aux MEMS-IMU) s'est faite en injectant les angles d'orientation donnés par la solution de référence dans l'EKF comme observations [7] :

$$h(\hat{\mathbf{x}}^-) = (\mathbf{I}_3 + \mathbf{B}) \boldsymbol{\varepsilon}_{LN\,200} + \mathbf{w}_\varphi$$

$$\dot{\mathbf{B}} = -\boldsymbol{\beta} \cdot \mathbf{B} + \sqrt{2\sigma_B^2 \boldsymbol{\beta}_B} \cdot \mathbf{w}_\varphi$$

avec \mathbf{B} la matrice symétrique gauche des angles de boresight, $\boldsymbol{\varepsilon}_{LN\,200}$ les orientations de référence, \mathbf{w}_φ le bruit de mesure $\boldsymbol{\beta}_B$ l'inverse du temps de corrélation fixé à l'infini. Ces défauts d'alignement ont été estimés avec une précision d'environ 0.5°.

Une fois le défaut d'alignement corrigé, nous avons pu comparer les signaux de la LN 200 et des MEMS-IMU [12]. Nous avons estimé un biais b et un facteur d'échelle s par moindres carrés à l'aide du modèle suivant :

$$\ell_{LN\,200} - v = (1 - s) \ell_{MEMS} + b$$

Il est à noter que durant les périodes statiques, aucun facteur d'échelle ne peut être estimé. En effet, le manque de dynamique ne permet pas de les décorréler des biais. Ainsi, en période statique, nous nous sommes limités à estimer un biais qui correspond alors à la moyenne de la différence entre les deux signaux. Relevons également, que les biais avant le départ sont statistiquement identiques à ceux à l'arrivée. Nous pouvons donc négliger l'estimation de dérives pendant ces descentes qui ne durent que 90 s.

Le tableau 1 donne les résultats de l'analyse pour un jeu de données représentatif. En période statique, certains biais sont non significatifs par rapport à l'écart-type estimé (cellules en rouge). Il s'agit avant tout des biais d'accéléromètres horizontaux. Le biais de l'axe y (qui pointe vers le bas) se décorréle plus facilement en raison de la gravité. En période dynamique, les biais sont estimés avec une plus grande précision et sont tous significatifs. Les facteurs d'échelle des gyroscopes s'avèrent négligeables alors que ceux des accéléromètres sont statistiquement significatifs.

Initialisation statique	fx [m/s ²]	fy [m/s ²]	fz [m/s ²]	wx [deg/s]	wy [deg/s]	wz [deg/s]
Biais	0.008	0.171	0.020	-0.11	0.51	1.38
Écart-type	0.022	0.024	0.027	0.12	0.14	0.16

Descente	fx [m/s ²]	fy [m/s ²]	fz [m/s ²]	wx [deg/s]	wy [deg/s]	wz [deg/s]
Biais	-0.049	0.039	-0.145	-0.21	0.38	1.39
Écart-type	0.003	0.003	0.009	0.01	0.01	0.01
Facteur d'échelle [-]	0.0046	-0.0533	-0.0223	-0.0051	-0.0118	0.0004
Écart-type [-]	0.0006	0.0009	0.0011	0.0212	0.0357	0.0250
Corrélation [-]	0.93	0.32	0.98	0.31	0.43	0.14

Tableau 1 : Biais et facteurs d'échelle estimés pendant une initialisation et durant une descente.

- ■ ■ En revanche, ils sont fortement corrélés avec les biais accélérométriques (cellules en vert, 0.9 pour les axes horizontaux, 0.3 pour l'axe verticale).

Les biais gyroscopiques calculés en périodes statiques et dynamiques ne diffèrent pas statistiquement, contrairement aux biais accélérométriques. Leur estimation donne des résultats plus homogènes en partie statique (figure 4 à figure 6), alors qu'ils varient plus fortement entre les descentes s'ils sont estimés conjointement avec les facteurs d'échelle (figure 7). On s'aperçoit que les biais et les facteurs d'échelle sont corrélés entre capteurs pendant la période dynamique. Ceci souligne la difficulté de décorréliser les facteurs d'échelle des biais des accéléromètres. Ainsi, les facteurs d'échelle des accéléromètres doivent être considérés avec prudence.

Les figure 4 à figure 7 montrent l'évolution des biais et des facteurs d'échelle pendant l'expérience. Contrairement aux accéléromètres, la série temporelle des biais gyroscopiques converge vers une valeur constante. Ceci peut s'expliquer par le fait que les biais gyroscopiques sont plus facilement estimés que ceux des accéléromètres. En effet, les angles d'orientation et les biais accélérométriques ne sont pas complètement observables [13].

Analyse du modèle d'erreur de l'EKF

Nous avons ensuite comparé les biais estimés lors de la comparaison de données brutes avec ceux modélisés par l'EKF. Les figure 8 et figure 9 montrent que la différence entre les deux estimations est non significative. Cependant, les écarts-types des différences sont importants ce qui réduit l'interprétation des résultats.

En résumé, la comparaison des données MEMS-IMU et IMU de référence fournit des biais et des facteurs d'échelle. Nous avons vu également que les biais estimés par l'EKF sont équivalents à ceux déduits de la comparaison de données brutes. Mais on peut se demander quels paramètres sont meilleurs pour estimer les paramètres de navigation (position, vitesse, orientation). Serait-il préférable d'utiliser des biais calibrés issus de la comparaison des données MEMS-IMU et LN 200 ?

Nous avons donc étudié la performance des biais et des facteurs d'échelle (des accéléromètres) estimés en calibrant les données inertielles avant de les introduire dans l'EKF. Ceci évite l'estimation de biais et augmente en même temps la surabondance du problème. Quatre intégrations ont été calculées avec

1. Des biais estimés par l'EKF.
2. Des biais estimés par l'EKF appliquant des facteurs d'échelle calibrés aux données MEMS-IMU.
3. Des biais calibrés appliqués aux mesures MEMS-IMU.
4. Des biais et des facteurs d'échelle calibrés appliqués aux mesures MEMS-IMU.

Le tableau 2 montre la différence entre la solution de référence et les quatre solutions calculées avec l'EKF.

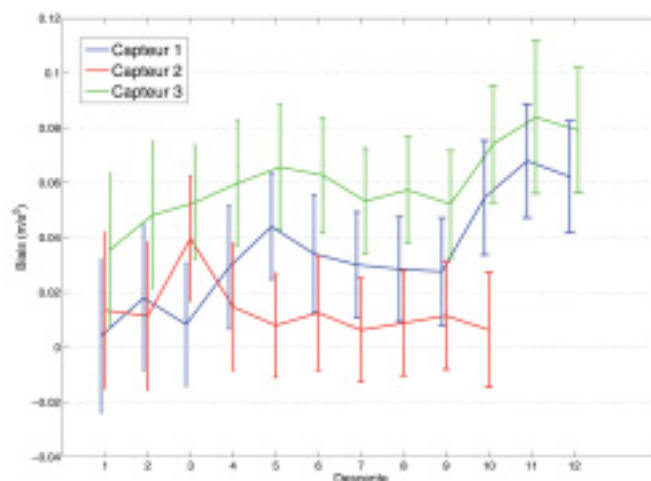


Figure 4 : Biais et écarts-types (1σ) de l'axe X de trois accéléromètres estimés durant la période d'initialisation.

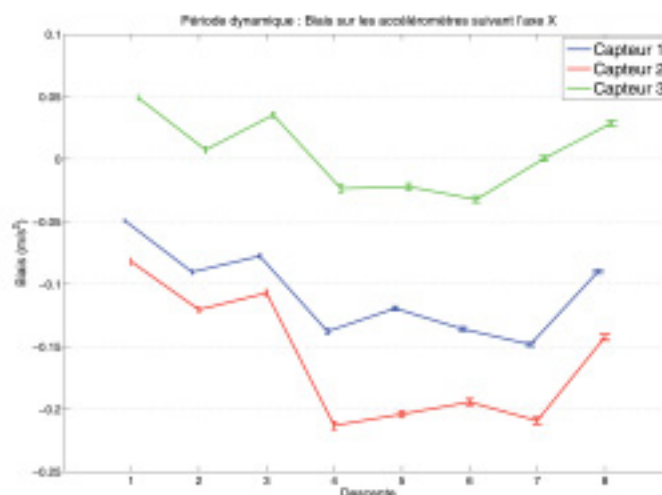


Figure 5 : Biais et écarts-types (1σ) de l'axe X de trois accéléromètres estimés durant les descentes de ski.

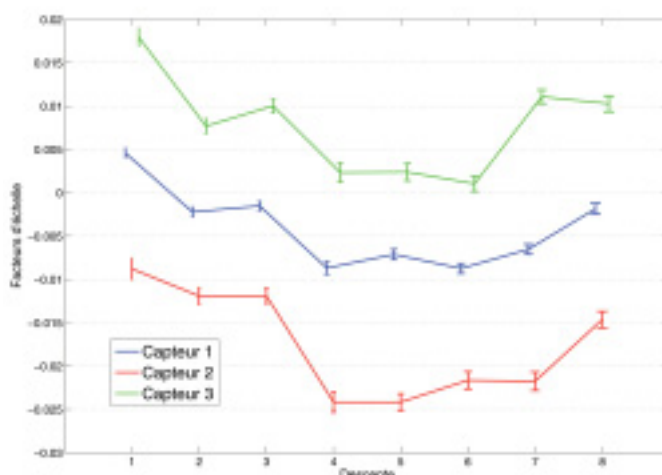


Figure 6 : Facteurs d'échelle et écarts-types (1σ) de l'axe Z de trois accéléromètres estimés durant les descentes de ski.

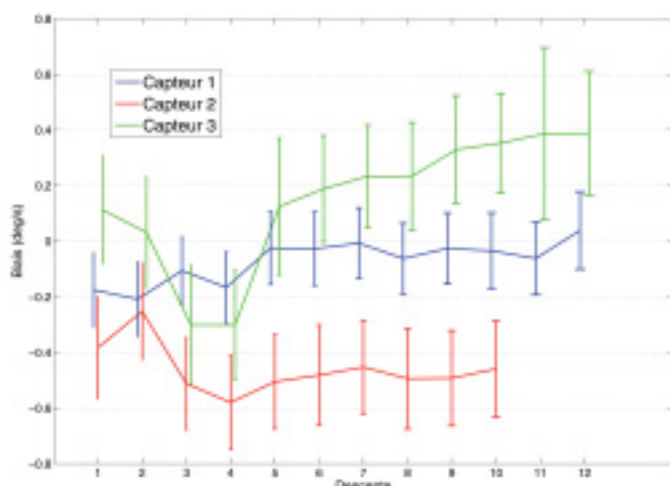


Figure 7 : Biais et écarts-types (1σ) de l'axe X de trois gyroscopes estimés durant les descentes de ski...

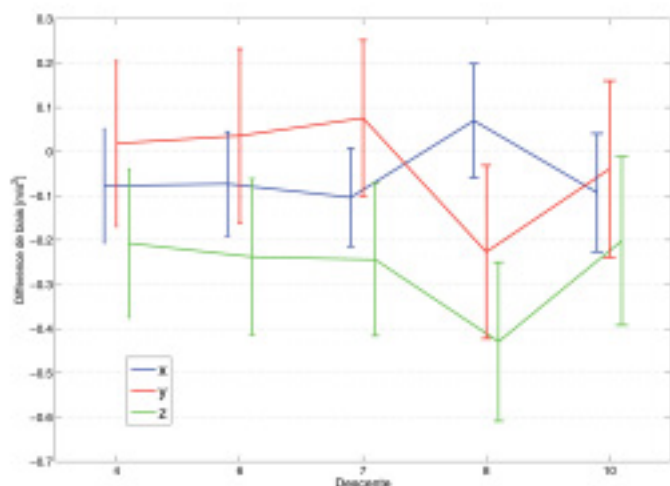


Figure 8 : Différence entre les biais accélérométriques estimés par EKF et ceux déduits de la comparaison de données brutes. L'intervalle d'erreur indique l'erreur moyenne de la différence (1σ).

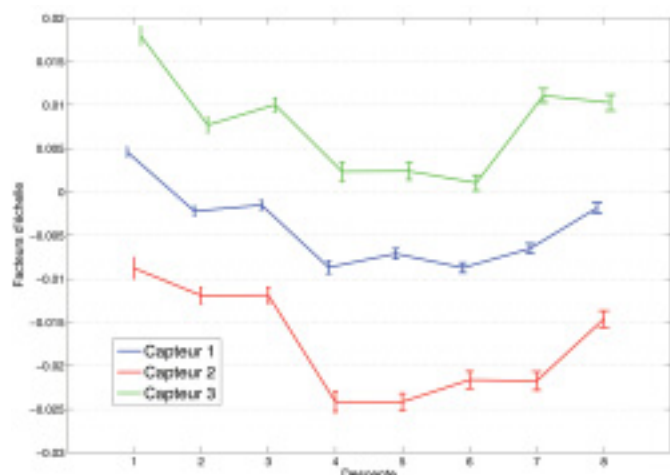


Figure 9 : Différence entre les biais gyroscopiques estimés par EKF et ceux déduits de la comparaison de données brutes. L'intervalle d'erreur indique l'erreur moyenne de la différence (1σ).

Solution		1	2	3	4
Biais estimés avec l'EKF		Oui	Oui	Non	Non
Biais calibrés		Non	Non	Oui	Oui
Facteurs d'échelles calibrés		Non	Oui	Non	Oui
Erreurs moyennes	N [m]	0.18	0.19	0.21	0.19
	E [m]	0.40	0.40	0.49	0.49
	h [m]	0.43	0.43	0.44	0.44
	r [°]	1.10	1.20	2.27	2.81
	p [°]	1.10	1.30	3.39	2.78
	hd [°]	1.32	1.50	2.60	2.90

Tableau 2 : Précision des positions et orientations en fonction des biais et facteurs d'échelle appliqués.

En appliquant les facteurs d'échelles calibrés, les résultats ne sont influencés que de manière négligeable. Les différences sont de l'ordre de quelques centimètres et dixièmes de degrés. Ceci est probablement dû à la corrélation importante entre les biais et les facteurs d'échelle calibrés. Il s'avère donc inutile d'ajouter des termes supplémentaires au modèle d'erreur inertielle MEMS. En appliquant les biais calibrés, la qualité de la solution de navigation est dégradée considérablement, en particulier, la qualité de l'orientation. Le temps de corrélation du processus Gauss-Markov permet un léger ajustement des biais au cours du temps ce qui contrebalance efficacement la réduction de surabondance dans l'estimation de la solution de navigation. Ainsi, le modèle d'erreur choisi pour estimer les erreurs inertielles MEMS semble approprié.

Conclusions et perspectives

La comparaison des données MEMS-IMU avec des mesures faites par une centrale inertielle haut de gamme (LN 200) permet de mettre en avant l'existence de biais et de facteurs d'échelle sur les mesures MEMS-IMU. Pendant la période d'initialisation statique, seuls les biais ont pu être modélisés. Le dynamisme plus élevé au cours de la descente a permis de détecter des biais et des facteurs d'échelle qui restent cependant fortement corrélés.

Parallèlement, l'EKF estime les erreurs inertielles par un modèle simple considérant que les MEMS-IMU sont entachées uniquement de biais. La comparaison entre le modèle d'erreur de l'EKF et les erreurs calculées par analyse des signaux MEMS-IMU et LN 200 confirme la validité du modèle. En effet, les biais calculés par comparaison des signaux en position statique sont équivalents à ceux estimés par l'EKF. Ensuite, des biais et des facteurs d'échelle ont été calibrés sur l'ensemble des descentes. Leur application dans l'EKF permet de s'affranchir de l'estimation des biais, mais n'améliore pas la solution de navigation.

Ce travail est basé sur la comparaison de signaux MEMS-IMU et IMU de référence sur des durées expérimentales assez courtes. Seuls trois types d'erreurs ont été analysés à savoir biais, facteurs d'échelle et dérives. Des mesures de plus longue durée permettraient d'analyser le comportement d'erreur des MEMS-IMU plus profondément. En outre, les conditions



- météorologiques peuvent influencer de manière non négligeable les caractéristiques d'erreur des capteurs.

Remerciements

Cette recherche est soutenue par TracEdge Sàrl, basé à Grenoble (Isère, France). Les auteurs souhaitent remercier particulièrement Pierre Ribot pour l'organisation des tests sur ski et pour ses descentes courageuses.

Contacts

Adrian WAEGLI - adrian.waegli@epfl.ch
Jean-Marie BONNAZ - jmbonnaz@gmail.com
Jan SKALOUD - jan.skaloud@epfl.ch
 Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Suisse.

Bibliographie

- [1] W. Nachbauer, P. Kaps, B. M. Nigg, F. Brunner, A. Lutz, G. Obkircher, and M. Mössner, "A video technique for obtaining 3-D coordinates in Alpine skiing", *Journal of Applied Biomechanics*, pp. 104-115, 1996.
- [2] J. How, N. Pohlman, and C.-W. Park, "GPS Estimation Algorithms for Precise Velocity, Slip and Race-track Position Measurements", in *SAE Motorsports Engineering Conference & Exhibition*, 2002.
- [3] K. Zhang, R. Deakin, R. Grenfell, Y. Li, J. Zhang, W. N. Cameron, and D. M. Silcock, "GNSS for sports – sailing and rowing perspectives", *Journal of Global Positioning Systems*, vol. 3, pp. 280-289, 2004.
- [4] K. Zhang, R. Grenfell, R. Deakin, Y. Li, Jason Zhang, A. Hahn, C. Gore, and T. Rice, "Towards a Low-Cost, High Output Rate, Real-Time GPS Rowing Coaching and Training System",

in 16th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, Portland, 2003.

[5] J. Skaloud and P. Limpach, "Synergy of CP-DGPS, Accelerometry and Magnetic Sensors for Precise Trajectory in Ski Racing", in *ION GPS/GNSS 2003*, Portland, 2003.

[6] J. Skaloud and B. Merminod, "DGPS-Calibrated Accelerometric System for Dynamic Sports Events", in *ION GPS*, Salt Lake City, 2000.

[7] A. Waegli, "Assessment of GPS/MEMS-IMU Integration Performance in Ski Racing", in *ENC*, Geneva, Switzerland, 2007.

[8] A. Waegli and J. Skaloud, "Turning Point – Trajectory Analysis for Skiers", *InsideGNSS*, 2007.

[9] D. H. Titterton and J. L. Weston, *Strapdown inertial navigation technology*: Peter Peregrinus Ltd, 1997.

[10] N. El-Sheimy and X. Niu, "The Promise of MEMS to the Navigation Community", *InsideGNSS*, 2007.

[11] A. Waegli, J. Skaloud, P. Tomé, and J.-M. Bonnaz, "Assessment of the Integration Strategy between GPS and Body-Worn MEMS Sensors with Application to Sports", in *ION GNSS*, Fort Worth, Texas, 2007.

[12] J.-M. Bonnaz, "Analyse du comportement de capteurs inertiels en trajectographie". vol. Travail de fin d'études : Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Suisse, 2007.

[13] S. Winkler and P. Vörsmann, "Multi-sensor data fusion for small autonomous unmanned aircraft", *European Journal of Navigation*, vol. 5, May 2007.

ABSTRACT

Skiers are interested in GPS (Global Positioning System) for performance evaluation. The positions registered during trainings or races allow analyzing trajectories and comparing speed, acceleration with other important parameters (e.g. heart rates). Unfortunately, the technological limits of today's satellite navigation are often reached if not exceeded by the quickly alternating environment, the relatively high dynamics of the skier and ergonomic constraints. Inertial measurement units (IMU) of MEMS (Micro-Electronic-Mechanical Systems) type coupled with GPS receivers provide certain autonomy when the GPS signal is imperfect or denied. However, these MEMS-IMUs are subject to large systematic errors. This article presents an experiment where a skier was equipped with GPS receivers, MEMS-IMU sensors as well as a tactical-grade IMU acting as reference. This experiment permits analyzing the error behavior of the MEMS-IMU and investigating the accuracy of the GPS/MEMS-IMU integration regarding position, velocity and orientation.

Le Quasi-géoïde libanais (QGL06) et la référence d'altitude du NGL (RAL 06)

■ Mohamed ALLOUCHE - Joseph FARAH

Ce rapport porte sur le calcul du Quasi-Géoïde Libanais (QGL06) par la méthode du terrain résiduel (RTM)

à partir d'un modèle global de champ, de mesures gravimétriques et d'un modèle numérique du terrain. Le quasi-géoïde ainsi calculé est basculé sur le géoïde géométrique défini par un ensemble de points GPS nivelés pour déterminer la Référence d'Altitude du nivellement général du Liban (RAL06) sous forme d'une grille permettant de convertir les hauteurs ellipsoïdales en "altitudes" du réseau NGL.

■ mots-clés

Géoïde – GPS – Nivellement

Le quasi-géoïde libanais QGL06

Le calcul du QGL06 est effectué par la méthode du terrain résiduel (RTM) en utilisant le logiciel GRAVSOF. Les données disponibles sont :

- Modèle global de champ : GGM02S.
- Gravimétrie : toutes les mesures gravimétriques sont issues du BGI. Elles comprennent :
 - 1 716 points sur Chypre, la Turquie, la Jordanie et la Syrie,
 - 4 805 points sur la méditerranée orientale,
 - 222 points observés en 1954 sur le Liban,
 - 472 points observés en 1970 par V. Tiberghien sur le Liban.
- Modèle numérique de terrain :
 - Un MNT exécuté par la DAG par digitalisation des planches orographiques de la carte de base du Liban au 1/20 000^e couvrant le territoire libanais (équidistance des courbes de 10 m).
 - Un MNT à maillage 90 m x 90 m du SRTM (Shuttle Radar Topography Mission de la NASA) couvrant la zone $30^\circ \leq \varphi \leq 40^\circ$ et $30^\circ \leq \lambda \leq 40^\circ$.

– Réseau géodésique spatial de 1^{er}, 2^e et 3^e ordre couvrant le territoire libanais (sauf une bande au Sud) avec un maillage triangulaire de côté ≤ 3 km.

Selon la méthode RTM, l'anomalie d'altitude ζ (séparation entre le quasi-géoïde et l'ellipsoïde de WGS84) est scindée en trois composantes :

$$\zeta = \zeta_{GM} + \zeta_{RT} + \zeta_{AgR}$$

ζ_{GM} est la partie issue du modèle global de champ, elle contient donc les grandes longueurs d'onde de la séparation ζ .

$$\zeta_{GM} = \frac{GM}{r^3} \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{a}{r} \right)^n \sum_{m=0}^n \bar{P}_{nm} (\cos \theta) (\Delta \bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \Delta \bar{S}_{nm} \sin m\lambda)$$

ζ_{RT} est la partie issue de la topographie, elle contient les longueurs d'onde courtes de ζ .

Elle est calculée à partir du modèle numérique de terrain après avoir retiré du terrain, par filtrage, ses composantes à grandes longueurs d'onde déjà contenues dans ζ_{GM} , le terrain filtré est ainsi appelé terrain résiduel (RT).

$$\zeta_{RT} = \frac{GR^2}{\gamma} \int_{\sigma} \frac{\rho(H - H_0) d\sigma}{l}$$

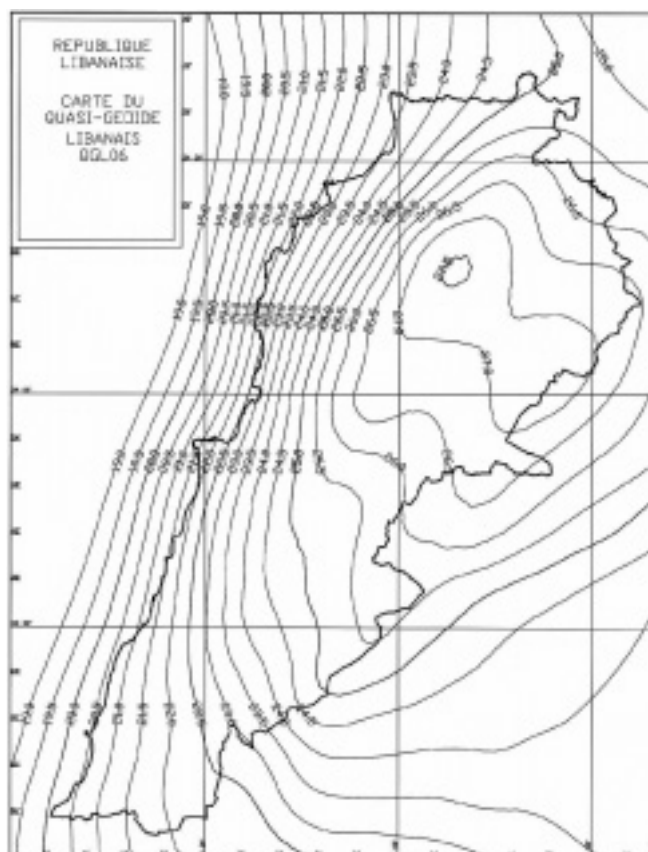
ζ_{AgR} est calculée à partir des anomalies de la pesanteur. Elle contient les longueurs d'onde moyennes. Les anomalies intégrées par la formule de STOKES sont les anomalies résiduelles obtenues en retranchant des anomalies à l'air libre Δg , l'information déjà contenue dans le modèle global de champ Δg_{GM} et dans le terrain résiduel Δg_{RT} .

$$\Delta g_R = \Delta g - \Delta g_{GM} - \Delta g_{RT}$$

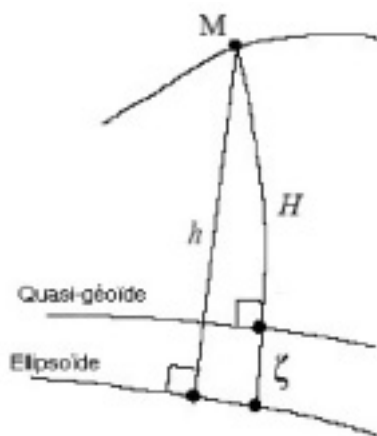
Les anomalies résiduelles Δg_R sont interpolées par collocation aux nœuds d'une grille.

$$\zeta_{AgR} = \frac{R}{4\pi\gamma} \int_{\sigma} \Delta g_R S(\psi) d\sigma$$

La figure ci-dessous est une représentation graphique du quasi-géoïde QGL06 par des courbes isovaleurs de l'anomalie d'altitude ζ noté aussi ζ_{Grv} pour préciser qu'il s'agit d'un quasi-géoïde gravimétrique.



La référence d'altitude du Liban RAL06



■ ■ ■ L'observation par GPS d'un point M donne sa hauteur h au-dessus de l'ellipsoïde du réseau géodésique spatial et le rattachement de ce point au réseau de nivellement général donne l'altitude H au-dessus du quasi-géοide (défini par un point fondamental et un type d'altitude). La quantité $\zeta = h - H$ est donc la hauteur en M de la surface d'altitude zéro au-dessus de l'ellipsoïde.

On peut donc construire point par point un quasi-géοide "GPS" ou géométrique dont la précision serait

$$\sigma_{\zeta} = \sqrt{\sigma_h^2 + \sigma_H^2}$$

fonction seulement des précisions de h et de H . Au Liban (10.500 km^2), 71 points ont été rattachés par GPS au réseau géodésique spatial libanais (bases $\uparrow 3 \text{ km}$) et par nivellement direct au réseau NGL (Nivellement Général du Liban).

Les quasi-géοides gravimétrique et géométrique, qui doivent en principe coïncider, présentent des écarts pour les raisons suivantes :

– "L'altitude" du réseau NGL est la somme cumulée des

dénivelées brutes ($H(M) = \int_0^M dH$)

compensées sans faire intervenir les mesures de gravité. D'autre part, la surface de référence du NGL est fixée par le marégraphe de Saint-Georges (à Beyrouth) où le niveau de la mer ne coïncide pas avec le quasi-géοide gravimétrique.

– Les effets troposphériques produisent des erreurs sensibles sur la composante hauteur ellipsoïdale h . En effet, l'effet différentiel peut être formulé en 1^{re} approximation par : $\Delta h = \Delta d / \cos z_{\max}$; Δd est la différence de retard troposphérique au zénith entre les deux stations d'observation et Z_{\max} est la distance zénithale maximale d'observation ($Z_{\max} = 70^\circ - 75^\circ$), Δd est fonction de la différence entre les profils météorologiques (température, pression, humidité relative) des deux stations (Δd est de l'ordre de $15 \text{ mm}/^\circ\text{C}$, $2 \text{ mm}/\text{mbar}$ et $2 \text{ mm}/\% \text{hr}$) donc Δh est de l'ordre de 3 à 4 fois Δd .

– Les erreurs systématiques et surtout le manque de données gravimétriques au-delà de la frontière libanaise au Nord, au Sud et surtout à l'Est qui affectent le quasi-géοide gravimétrique.

Les écarts entre les quasi-géοides gravimétrique et géométrique, dont la longueur d'onde est plus grande que la taille de la zone d'étude, peuvent être modélisés par une régression linéaire de la forme :

$$\zeta_{\text{GPS}_i} - \zeta_{\text{Gm}_i} = a + b(\varphi_i - \varphi_0) + c(\lambda_i - \lambda_0) \cos \varphi_i + v_i$$

(λ_i, φ_i) : coordonnées géographiques géodésique d'un point GPS nivelé

(λ_0, φ_0) : coordonnées géographiques moyennes de la zone d'étude

Cette fonction linéaire permet de modéliser :

- les erreurs à très grandes longueurs d'onde du modèle de champ,
- les erreurs systématiques à grande distance de corrélation du réseau de nivellement,
- les écarts entre les systèmes de références géodésiques.

Les résidus v_i représentent la partie à courte longueur d'onde des erreurs du modèle de champ ainsi que les parties à courte distance de corrélation ou non corrélées des autres erreurs.

Un premier calcul d'adaptation du quasi-géοide gravimétrique QGL06 au quasi-géοide géométrique défini par les 71 points GPS nivelés a permis de détecter cinq points faux ; ces points avaient les résidus maximaux ou minimaux. Ils ont été réobservés et un deuxième calcul a permis d'améliorer l'écart-type des résidus de 0.21 m à 0.16 m .

A l'issue du 2^e calcul, 2 points ayant des résidus supérieurs en valeurs absolues à 0.25 m ont chacun été réobservés par rattachement à deux points de réseau géodésique spatial (la moyenne quadratique des discordances entre les valeurs de h issues des deux points géodésiques est égale à 0.055 m).

Le calcul final de l'adaptation donne comme écart-type des résidus la valeur $\sigma_v = 0.118$ m.

Les résidus v_i sont ensuite analysés en les séparant en signal (s_i) et bruit (n_i) : $v_i = s_i + n_i$

Le signal représente la partie corrélée des résidus et le bruit représente les erreurs non corrélées dont les fautes éventuelles sur les hauteurs ellipsoïdales (h_i) et les altitudes (H_i). Le signal est une correction alors que le bruit est une estimation de la précision de la référence d'altitude.

Les résultats du calcul final sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Symbole	Signification	Valeur
a	Biais constant	+0.275 m
b	Pente vers le Nord	-0.047 m/100 km
c	Pente vers l'Est	-0.095 m/100 km
σ_{\max}	Résidu maximal	+0.22 m
σ_{\min}	Résidu minimal	-0.28 m
σ_v	Ecart-type des résidus	0.118 m
σ_s	Ecart-type des signaux	0.013 m
σ_n	Ecart-type des bruits	0.117 m

On peut formuler les remarques suivantes :

- Le biais constant montre que le zéro du nivellement, qui est à peu près le niveau moyen de la mer à Beyrouth, est à environ 27,5 cm au-dessus du quasi-géoïde libanais QGL06.
- La partie principale des résidus est non corrélée. En effet, le bruit est pratiquement égal au résidu et cela est probablement dû à des fautes sur les altitudes (repères déplacés) car chaque point GPS nivelé (71 en tout) a été rattaché à un seul repère de nivellement sans que la stabilité n'ait été vérifiée par manque de repères proches.

La référence d'altitude RAL06 est donc calculée à partir du quasi-géoïde QGL06 en ajoutant à l'anomalie d'altitude gravimétrique ζ_{Grv} :

- La correction linéaire de l'écart.
- La partie signal des résidus estimée par interpolation des résidus des points voisins (krigeage).

La RAL06 est livrée à la DAG sous forme d'une grille de maille :

$$\Delta\varphi \times \Delta\lambda = 0.025'' \times 0.025''$$

Soit $\Delta\varphi \times \Delta\lambda = 2.8\text{km} \times 2.3\text{km}$ avec un programme en Visual Basic ayant comme INPUT le triplet de position spatial $[\lambda, \varphi, h]$ et comme OUTPUT le triplet de position classique $[X, Y, Z]_{\text{WGS84}}$

La précision de la référence RAL06 a été évaluée au moyen de 5 points GPS nivelés (trois observés par M. Allouche et 2 par des élèves stagiaires), la moyenne quadratique des écarts calculée est égale à 0.10 m.

Ceci confirme la précision a priori déjà trouvée (11.8 cm). La précision a posteriori sera calculée à partir des discordances qui seront calculées sur l'ensemble de points que la DAG va observer en vue de la vérification de la grille.

Conclusions et recommandations

La RAL06 n'est pas la solution finale pour la référence d'altitude du réseau de nivellement du Liban, ce n'est qu'une première version. Une deuxième version de cette référence peut être nettement améliorée en effectuant les mesures supplémentaires suivantes :

- Rattachement de tous les points GPS nivelés, ayant des résidus supérieurs en valeur absolue à 0.20 m, à un autre repère de nivellement ou vérification de la stabilité du premier repère utilisé (6 points seulement ont des résidus $v > 0.20$ m). Cependant comme la plupart des repères de nivellement ont été perdus suite à l'élargissement des voies de communication au cours des 40 dernières années et n'ont pas été remplacés, il s'avèrera nécessaire de réimplanter et niveler certains tronçons de nivellement.
- Le manque de mesures gravimétriques surtout vers l'Est, en territoire syrien, ne peut pas être comblé. Par contre, il serait nécessaire de densifier les points gravimétriques pour aboutir à une densité de 1 point / 4 km² ce qui revient à observer 2 000 points. M. Duquenne propose que ces points soient les points du réseau géodésique qui ont l'avantage d'être bien définis en planimétrie et uniformément répartis sur le territoire.
- Par contre, il serait très utile de densifier les points GPS nivelés pour arriver à un point par coupure au 1/20.000 (ce qui revient à observer environ 60 points nouveaux). D'autres tronçons de nivellement seraient à observer pour permettre le rattachement de chaque point nouveau à deux points de nivellement ainsi qu'à deux points géodésiques.
- Les "pseudo-altitudes" du réseau NGL doivent être transformées en altitudes normales. Le calcul des altitudes normales pour le réseau de nivellement de 1^{er} ordre a été effectué en 1974 (cf. "Remise en ordre du réseau NGL", M. Allouche, article publié au Journal des Topographes n° 6-2003). Le calcul des réseaux du 2^e, 3^e et 4^e ordre n'a pas vu le jour à cause des événements de 1975. Un effort doit être fait pour retrouver le calcul de 1974, le mener à terme pour tout le réseau NGL et adopter définitivement les altitudes normales pour le réseau de nivellement général du Liban. Nous espérons que la 3^e version du RAL, si ce n'est pas la deuxième, sera calculée sur la base des altitudes normales.
- Le modèle numérique de terrain utilisé pour le calcul du quasi-géoïde QGL06 est exclusivement le SRTM. Le MNT de la DAG fut transformé en grille de 90 m x 90 m dans le référentiel spatial mais son fusionnement avec le SRTM n'a pas été possible à cause de la très grande taille des fichiers SRTM. Nos ordinateurs sont dotés de RAM de 512 MB alors

- ■ ■ qu'une RAM de 2 GB est nécessaire pour manipuler les fichiers SRTM. Cette difficulté n'est pas prioritaire mais devra être traitée dès que les problèmes plus importants (mentionnés ci-dessus) seront résolus. 1

Préparations du QGL06

La mission effectuée en juillet 1998 par Françoise et Henri Duquenne, ingénieurs géographes et maîtres de conférences, fixa comme objectif la mise en place d'un projet de recherche sur le quasi-géοίde du Liban. En octobre 1998, le professeur Michel Kasser, ingénieur géographe et alors directeur de l'ESGT en France, initia les contacts avec le Centre National des Recherches Scientifiques - Liban (CNRSL), la Direction des Affaires Géographiques (DAG) et le rectorat de l'Université Libanaise pour lancer le projet de calcul du quasi-géοίde.

L'ingénieur géographe Mohamed Allouche, camarade de promotion de M. Kasser et ex-chef de service de géodésie à la DAG, fut nommé chef de ce projet.

Dès sa nomination à la direction de la DAG, le général Maroun Kraiche, prit la décision d'inclure ce projet au budget de la DAG et d'effectuer toutes les mesures nécessaires pour combler les données manquantes (modèle numérique de terrain, points GPS nivelés, etc.).

En juin 2005, l'ingénieur géomètre Joseph Farah, suivit l'Ecole francophone sur le géοίde sous la direction de H. Duquenne au LAREG-IGN et se dota de tous les programmes de calcul nécessaires.

Références

Duquenne H. (1999). *Comparison and Combination of a Gravimetric Quasigeoid with a Levelled GPS Data Set by Statistical Analysis.* Phys. Chem. Earth (A) 24:1, 79-83.

Forsberg R., G. Strykowski, J.C. Iliffe, M. Ziebart, P.A. Cross, C.C. Tscherning, P. Cruddace, K. Stewart, C. Bray, O. Finch (2002). *OSGM02: a new geoid model of the British Isles.* In: *Gravity and Geoid 2002*, 3rd Meeting of the IGGC, Ziti Edition, Thessaloniki, Greece.

Kotsakis J. and M.G. Sideris (1999). *On the adjustment of combined GPS/levelling/geoid networks.* J Geod 73: 412-421.

Marti U., A. Schlatter, E. Brockmann and A. Wiget (2001). *The Way to a Consistent National Height System for Switzerland.* In: *IAG Symposia 125: Vistas for Geodesy in the New Millennium*, Springer 2002.

Moritz H. (1989). *Advanced Physical Geodesy.* Wichmann, Karlsruhe, Germany.

Tscherning C.C., Forsberg R., Knusden P., *The GRAVSOF package for geoid computation*, First Continental Workshop on the Geoid in Europe, 1992.

GGM02 – An improved Earth gravity field model from GRACE, JOURNAL OF GEODESY, NOV 2005, Vol. 79, pp. 467 – 478.

Jarvis A., H.I. Reuter, A. Nelson, E. Guevara, 2006, *Hole-filled seamless SRTM data V3*, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT), available from <http://srtm.csi.cgiar.org>.

Contacts

Mohamed ALLOUCHE

Ingénieur géographe de l'Ecole Nationale des Sciences Géographiques (ENSG) – Professeur de l'Université Libanaise.
Tél. : 03.723.823 - allouche@ul.edu.lb

Joseph FARAH

Ingénieur géomètre et topographe de l'Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes - Liban (ESGTL)
Tél. : 03.780.583
josar_sou@hotmail.com
ESGTL – BP 1136175 – Hamra – Beyrouth – 11032100 – Liban
esgt_liban@hotmail.com

ABSTRACT

The QGL06, Lebanese Quasi-Geoid, is calculated by the method of Residual Terrain Model (RTM) using GRAVSOF softwares. This calculation is based on many gravity data like the Global Gravity Model (GGM02S) and the local gravity measurements (2410 terrestrial points and 4805 sea points), two Digital Terrain Model (local and regional DTMs) and about 71 spatial geodetic points. The first and the second type of data are used to create the surface (QGL06) and the third data try to attach this surface to the appropriate ellipsoid, taking in consideration the altitude (H) and the ellipsoid height (h) of the spatial geodetic points. Having a "geometrical" type of altitude (not a normal altitude) in Lebanon is one of the reasons that make the QGL06 different from the Reference of Lebanese Geodetic Leveling NGL. So, the QGL06 is translated and rotated to create the Reference of Lebanese Altitude RAL06. The final calculation of the RAL06 gives like standard deviation of the residues the value 11,8cm. The precision of the reference RAL06 was evaluated by 5 leveled GPS points, the calculated quadratic average of the variations is equal to 0.10m. This confirms the precision a priori already found (11.8 cm). The precision a posteriori will be calculated from the differences which will be calculated on the whole of points that the army will observe for the checking of the grid.

The RAL06 is not the final solution for the reference of altitude of the NGL of Lebanon; it is only one first version. A second version of this reference can be clearly improved

- *by taking some supplementary measures specially on the leveled GPS points having more than 20 cm as residue,*
- *by densification of the gravimetric points to lead to a density of 1point/4km² and the leveled GPS points to arrive to a density of 1 point for every basic chart of Lebanon (1/20.000°)*
- *and by trying to definitively adopt normal altitudes for the general leveling of Lebanon NGL*

Topographie : un demi-siècle d'évolution technologique *partie 4/4*

■ Paul COURBON



L'AVENEMENT DES SATELLITES, LA GEODESIE SPATIALE, LE GPS

Après la seconde guerre mondiale, la rivalité entre Etats-Unis et URSS ne fut pas seulement politique, elle fut aussi technologique avec, entre autres, la mise en orbite des satellites artificiels.

Au cours de l'assemblée générale de l'Union Géodésique et Géophysique Internationale qui se tenait à Toronto en septembre 1957, John O'KEEFE (USA) avait proposé la constitution d'un groupe de travail sur l'étude du mouvement des satellites artificiels que l'on s'appropriait fiévreusement à lancer.

Dans la course au lancement, l'URSS allait "coiffer" les USA, avec la mise en orbite de Spoutnik, le 4 octobre 1957. Les USA allaient suivre le 1^{er} février 1958 avec le satellite Explorer. Tout cela ouvrait un nouveau champ extraordinaire à la science. Dès 1958, l'US Navy concevait et réalisait le système TRANSIT pour le positionnement de ses sous-marins nucléaires.

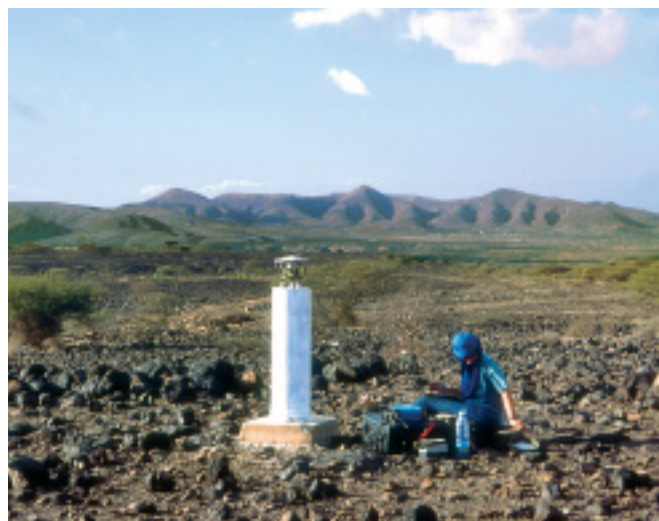
La France s'intéressa dès le début à cette aventure spatiale et, en 1961, était créé le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES). La même année, l'IGN commençait ses études et ses

■ ■ ■ premières déterminations de triangulation spatiale sur les satellites Echo 1 et 2 récemment lancés par les Américains. Après avoir déployé des gros ballons, les satellites de basse altitude (800 à 1000 km) pouvaient être photographiés sur fond d'étoiles avec des chambres balistiques munies d'obturateurs à éclipses. Un comparateur spécial ZEISS permettait des mesures au micron sur les plaques photographiques. La synchronisation des mesures à partir de différentes stations était assurée au millième de seconde par des signaux horaires. Cette méthode servit à rattacher la France à l'Algérie en 1963, puis l'archipel des Açores à l'Afrique et à l'Europe, en 1965. La précision de cette dernière détermination fut d'un peu moins de 40 mètres.

Après 1967, cette méthode expérimentale, fut remplacée par la méthode Doppler qui utilisait la variation des fréquences émises par un corps en mouvement lors de leur réception par un récepteur fixe. L'IGN fit ses premières déterminations sur les satellites Diapason (D1A) et Diadème (D1C, D1D) mis en orbite par la fusée française Diamant à Hammaguir (Algérie) en 1966 et 67, puis sur le satellite Peole mis en orbite en décembre 1970 à Kourou. Ces déterminations Doppler étaient couplées à des mesures de distance laser sur les satellites qui étaient munis de prismes en coin de cube. La lecture de *"Mesurer la terre"* de J.J. Levallois nous montre la complexité de ces mesures pour les chercheurs de l'époque.

Désireuse d'avoir les dimensions exactes de la terre et de déterminer les orbites rigoureuses des satellites, la communauté scientifique internationale coopéra sur plusieurs projets. Il y eut en premier lieu la mesure du réseau "Coast and Geodetic Survey" : après le lancement du satellite ballon Pageos par les Américains, une vaste campagne fut lancée à travers le monde. La France y participa par la mesure du 12° parallèle dans sa traversée de l'Afrique francophone. La mesure d'une longue polygonale avec des telluromètres et des géodimètres fut associée à de nombreuses orientations de Laplace et des observations de Pageos à la chambre balistique BC4 Wild.

Il y eut aussi le programme RCP 133, initié par le CNRS en 1967, avec la coopération de scientifiques étrangers, et qui se proposait d'établir une jonction Europe-Afrique-Amérique du Sud, en utilisant concurremment la triangulation spatiale et la télémétrie laser.



IGN-droits réservés

Géodésie GPS du Yémen réalisée par l'IGN.

On peut encore parler du programme ISAGEX, initié en 1970 par le Centre National d'Etudes Spatiales avec le concours de quatorze autres pays dont les USA. Il proposait une campagne d'observations coordonnées sur les sept satellites disponibles en vue d'apporter à la connaissance du champ terrestre et des autres paramètres géodésiques, une contribution significative.

Après 1967, la déclassification militaire du système TRANSIT allait permettre à la communauté scientifique internationale d'exploiter un système géodésique spatial en tout point du globe. Wild lança le premier récepteur commercial TRANSIT, le MX702CA en 1968.

En 1974, l'IGN faisait l'acquisition de six récepteurs Doppler JMR. La présence de 15 stations fixes réparties sur le globe et chargées de suivre les satellites permettait, désormais, la connaissance des orbites avec une précision métrique.

La méthode du "point isolé" alors expérimentée permettait une précision de 3 à 5 mètres. Elle fut complétée par la méthode des "arcs courts" qui ramenait cette précision à un mètre à une distance d'un millier de kilomètres. Cette méthode fut utilisée en Algérie (1976), en Libye (1977), en Jordanie (1982) où 14 points Doppler permirent de caler au mieux le réseau national de points géodésiques déterminé par triangulation et mesure électronique de distances.

Le GPS

C'est la grande révolution de la géodésie spatiale, aboutissement de tous les travaux entrepris précédemment. Le GPS (Global Positioning System) est un système de positionnement par satellites conçu et mis en service par le Département de la Défense des USA. Il a été développé en vue du remplacement du système TRANSIT qui pêchait par une couverture en satellites insuffisante (5 en 1977) et une faible précision en navigation.

Le premier satellite fut lancé en 1978, à une altitude de 20 200 km permettant de faire le tour de la terre en douze heures sidérales. Il fallut attendre 1985 pour que le onzième satellite soit lancé et que le système soit déclaré "semi-opérationnel". Mais ce nombre insuffisant de satellites rendait de nombreuses périodes inobservables pour les déterminations de précision. Les moyens informatiques et électroniques

n'avaient pas atteint le développement actuel et les observations étaient plus longues et laborieuses. C'est en 1985 que l'IGN fait l'acquisition de son premier GPS, le TR5S, construit par le français SERCEL.

A partir de 1989 et jusqu'en 1993, tous les satellites du programme sont mis sur orbites : 28 au total dont 4 en réserve. En février 1994, le système est déclaré pleinement opérationnel, la visibilité simultanée de 4 à 8 satellites, avec une élévation d'au moins 15°, étant assurée en tout point du monde, au moins 23 heures sur 24. Les 24 satellites sont répartis sur six plans orbitaux ayant tous une inclinaison d'environ 55° sur le plan de l'équateur. La durée de vie de chaque satellite est au maximum de dix ans, ce qui nécessite des remplacements réguliers.

Principe général du GPS

Les satellites sont suivis en permanence par cinq stations fixes au sol, réparties sur le monde, non loin de l'équateur. Ces cinq stations reçoivent en permanence les signaux émis par les satellites. Les éphémérides, paramètres d'horloge, corrections atmosphériques sont ainsi recalculés journalièrement pour être renvoyés aux satellites.

Un récepteur GPS reçoit les signaux émis par les satellites. L'horloge atomique des satellites et l'horloge du récepteur permettent de mesurer le temps de parcours des signaux. La



GPS 300 : Un bifrèquence Leica série 300 acquis en 1995. On laissait le récepteur fixe soit sur un point connu à l'écart des passages, soit sur un toit-terrasse, ou dans un terrain clos pour éviter le vol et la manipulation par un passant. Le récepteur mobile (rover) se déplaçait sur les points à déterminer ou d'autres points connus de calage. Les calculs étaient faits en post-traitement, ce qui ne garantissait pas une fiabilité à 100 % des points observés. Pour les constructeurs, 95 % était la fiabilité à atteindre. Sur la photo, le récepteur est joint par un fil au "contrôleur" qui sert à introduire les paramètres du chantier et à commander les mesures.

détermination de ce temps permet de déduire les distances entre ces satellites et le récepteur. A chaque instant t , la position des satellites étant parfaitement connue, les distances mesurées (pseudo-distances) permettent de calculer la position du récepteur GPS.

De manière très simplifiée, après les différents prétraitements d'amplification, de filtrage, de conversion analogique-numérique des signaux, les temps de parcours sont mesurés au niveau du récepteur par des corrélateurs. Ces corrélateurs déterminent pour chaque satellite le décalage entre le code ou la phase au moment de leur réception et ceux identiques générés par le récepteur.

De nos explications précédentes, on peut déduire que géométriquement, la position d'un satellite étant connue à un instant t , le récepteur GPS se trouve à cet instant sur une sphère dont le centre est ce satellite et le rayon la distance calculée. Trois satellites seraient donc nécessaires pour obtenir un point déterminé par l'intersection de trois sphères. En réalité, la résolution du décalage entre l'horloge satellite et celle du récepteur nécessite un quatrième satellite. Les satellites supplémentaires permettant d'affiner la mesure.

■ Monofréquence et bifrèquence

Chaque satellite émet en continu, sur deux canaux différents, deux fréquences porteuses :

- L1 à 1575,42 MHz (longueur d'onde proche de 19 cm)
- L2 à 1227,60 MHz (longueur d'onde proche de 24,4 cm)

Ce sont des multiples par 154 et 120 de la fréquence 10,23 MHz de l'oscillateur atomique du satellite. Le récepteur reçoit chaque signal satellite sur un canal différent.

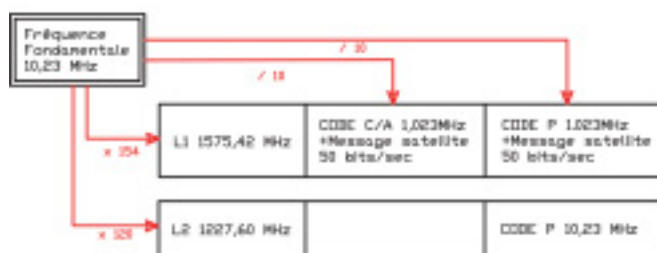
Ces fréquences porteuses sont ensuite modulées en phase par des codes pseudo-aléatoires propres à chaque satellite :

- Le code C/A (coarse acquisition), de fréquence 1,023 MHz modulé seulement sur la fréquence L1.
- Le code P (Precise), de fréquence 10.23 MHz module les fréquences L1 et L2. Ce code est aussi crypté en code Y pour les besoins de l'armée américaine ou des utilisateurs autorisés.

De plus, un message de 50 Hz, qui donne les données concernant l'orbite du satellite, les corrections d'horloge, corrections ionosphériques et éphémérides, se superpose aux codes C/A et P.

Deux types de récepteurs ont alors été conçus :

- **Le Monofréquence** qui a l'immense avantage de coûter 2 à 5 fois moins cher que le bifrèquence (Thalès en commercialise



Structure des signaux GPS.

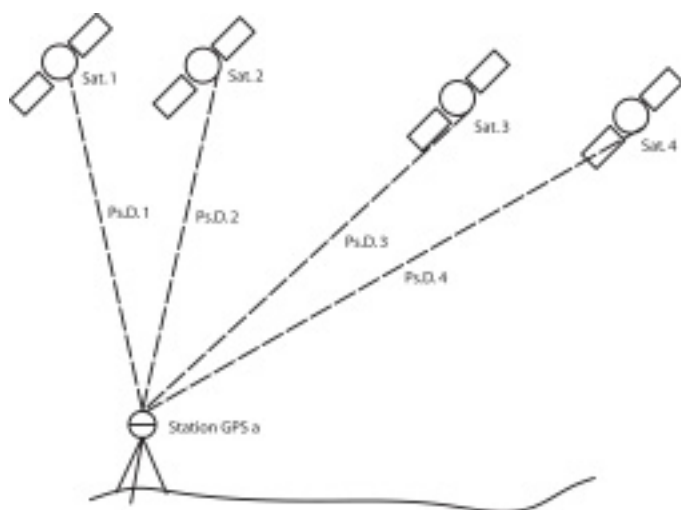


GPS de poche : 120 grammes, 200 euros, moins de deux minutes pour obtenir la position d'un point avec une précision de 5 mètres ! Pour celui qui a fait autrefois de l'astronomie de position pour trouver son chemin dans le Sahara, c'est à chaque mesure un émerveillement renouvelé...

■ ■ ■ à 5800 € HT la paire en 2005). Il peut donc être intéressant en fonction des structures et des types de travaux de l'entreprise. Mais, évidemment, il est moins performant que le bifrèquence.

Tout d'abord, l'absence de L2 ne lui permet pas d'éliminer l'erreur ionosphérique, ni de résoudre l'ambiguïté de phase aussi rapidement qu'un bifrèquence. De ce fait, la durée des observations est beaucoup plus longue et on ne peut avoir les mêmes longueurs de base : au maximum 10 à 15 km en zone tempérée et 5 km quand on se rapproche du pôle ou de l'équateur. Au pôle, l'effet ionosphérique étant plus fort et à l'équateur les effets de rotation de la terre prenant plus d'importance.

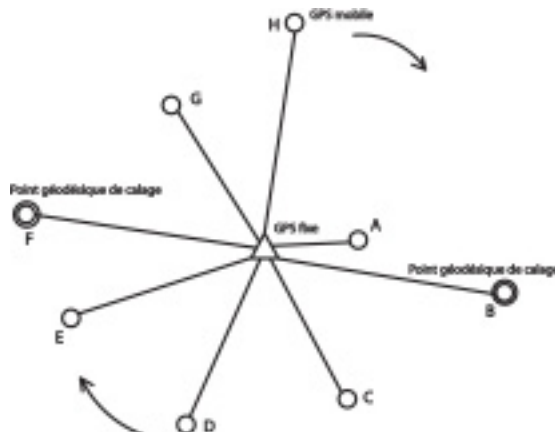
– **Le bifrèquence**, dont la combinaison de L1 et L2 permet d'éliminer l'erreur ionosphérique et de résoudre plus facilement l'ambiguïté, est beaucoup plus performant. Mais, évidemment, il coûte plus cher.



Le positionnement absolu est celui déterminé par un seul récepteur indépendant et captant un minimum de quatre satellites, trois pour le positionnement géométrique et un quatrième pour résoudre le biais entre l'horloge récepteur et celle des satellites.

■ Positionnement absolu, positionnement différentiel

- Le positionnement absolu est celui déterminé par un seul récepteur indépendant recevant les signaux émis par les satellites. Le récepteur encaisse alors toutes les erreurs du système, en particulier les erreurs atmosphériques et troposphériques. De plus, jusqu'à 2001, le système GPS créait des dégradations sur la fréquence de l'horloge des satellites ou sur les éléments du message radiodiffusé pour en limiter l'utilisation par les civils. De ce fait, après deux ou trois heures d'observation, un GPS de précision ne donnait la position qu'à une vingtaine de mètres près. Quant au GPS de poche sa précision était de 50 à 100 mètres. En janvier 2001, la suppression de ces dégradations permet d'atteindre une précision de 2 mètres sur un GPS de précision et de 5 mètres sur un GPS de poche.
- C'est en mode différentiel, c'est-à-dire avec un récepteur fixe et un récepteur mobile, que le GPS donne toute la mesure de



La figure du statique rapide illustre le fonctionnement du différentiel. Les vecteurs joignant le poste fixe (au centre) avec les diverses positions du GPS itinérant (rover) ont une précision centimétrique. Quand cette figure est calculée, il suffit de la caler sur les points connus observés par translation et éventuellement rotation.

ses possibilités extraordinaires. En 1995, en post-traitement, à dix kilomètres on obtient une précision centimétrique sur la position relative du poste fixe et du poste itinérant après 15 minutes d'observation. Il suffit ensuite de placer le récepteur itinérant sur des points connus pour caler la figure sur un réseau existant. Adieu géodésie traditionnelle ! Ce qui paraît normal aux jeunes générations semble inouï à ceux qui se sont échinés durant de longues soirées de tours d'horizon derrière un théodolite, puis qui ont eu à mettre en forme les observations et faire tous les calculs...

Cependant, la merveille et la précision ont leur prix. En 1995, une paire de bons bifréquences, nécessaire à un travail en différentiel, valait 400.000 francs, soit 75.000 euros d'aujourd'hui en tenant compte de l'érosion monétaire. Les prix ont baissé, mais pas de manière significative (-30 % environ) et le GPS de précision n'est pas encore à la portée de tous les géomètres et des petites structures. Je ne parle pas ici des GPS de poche, évidemment !

■ Le format Rinex

Ce format a été créé en 1989. C'est un format standard qui permet de travailler avec des GPS de marques différentes. Principalement lorsqu'on veut travailler avec une station de référence permanente (voir le paragraphe : *Les stations permanentes, le VRS*).

Evolution du GPS

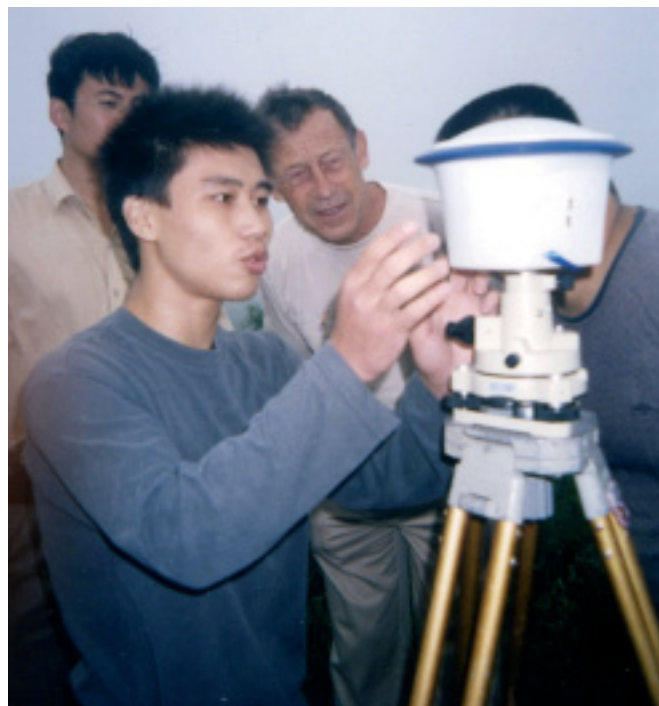
La technologie avance à pas de géants, elle s'emballe, les innovations n'arrêtent pas. En 1995, la carte mémoire d'un bifréquence Leica n'était que de 1 Mo. Elle ne permettait que 8 heures d'observation avec une fréquence de mesures de 10 secondes et 1 h 15 avec une fréquence de 1 seconde. Si une détermination à 1 km du poste fixe demandait moins de 5 minutes en post-traitement, il fallait 10 à 15 minutes à 10 km, 20 à 30 minutes à 20 km.

Aujourd'hui, la capacité des cartes mémoire a été multipliée par 100 ou plus. On trouve des cartes compact flash à 64, 256 Mo et même 1 Go. En cinématique, cela permet de travailler en permanence avec des fréquences inférieures à la seconde. Les algorithmes de calcul ont progressé, l'estimation des modèles atmosphériques aussi. On peut donc dépasser les 20 km qui étaient une limite pour les mesures courantes et leur logiciel de traitement en 1995. Les futurs satellites GPS et l'arrivée de GALILEO en 2010 laissent entrevoir de nouveaux progrès.

Nous rappelons la technique Bluetooth déjà mentionnée à la fin du chapitre sur les stations totales et qui, à partir de 2002 permet de s'affranchir des innombrables fils joignant les appareils électroniques.

■ Le GPS cinématique

La technique AROF (Ambiguity Resolution On the Fly) ou de résolution des ambiguïtés en vol, permet depuis 1995 d'enre-



GPS de construction chinoise, lors d'une intervention de l'auteur en Chine en 2003. Le récepteur et le contrôleur sont réunis en un seul élément. Les calculs se faisaient en post-traitement. La méthode comportait 3 GPS : 2 récepteurs en 2 points connus et un récepteur itinérant. Le schéma de calcul était en triangle et non en étoile. Le coût de ces appareils était entre 5 et 10 fois inférieur qu'en Europe...

gistrer un mouvement en continu. Ses principales applications se sont faites dans le temps réel cinématique et dans le déplacement des véhicules. Elle avait été précédée par la méthode STOP and GO qui permettait, après initialisation du GPS mobile, de se déplacer et d'enregistrer des points après un arrêt de deux périodes (10 secondes si on avait fixé cette période à 5 secondes). Cette méthode STOP and GO permettait de faire des relevés topographiques dans les zones dégagées.

■ Temps réel, temps réel cinématique (Appelé RTK ou Real Time Kinematic en anglais)

Bien qu'il soit apparu en 1993-1994 aux Etats-Unis (Trimble) et qu'il ait suivi peu de temps après dans d'autres pays, l'utilisation du temps réel en France, freinée par la législation des télécommunications, ne s'est généralisée que début 1997. Alors que précédemment, les calculs se faisaient en post-traitement, une liaison radio entre le poste fixe placé sur un point connu et le poste mobile permet maintenant d'avoir directement sur le terrain les coordonnées de ce poste mobile.

En effet, les coordonnées du point de référence (GPS fixe) et celles des satellites étant connues à tout instant, on en déduit les distances géométriques correspondantes. La résolution des pseudo-distances permet d'estimer rapidement le décalage d'horloge de la référence et d'élaborer en

■■■ permanence des termes de correction des satellites visibles. Ces corrections sont transmises à la station itinérante qui les ajoute à ses mesures directes de pseudo-distance et peut calculer sa position sur place après un temps d'initialisation de quelques minutes. L'initialisation faite, grâce à la technique AROF, on peut travailler en cinématique et ainsi faire des implantations à partir d'un fichier de points. Seul impératif : une liaison radio en VHF entre le fixe et l'itinérant, ce qui n'était pas toujours possible en région accidentée ou encaissée.

■ Le GPS submétrique

Avec les Systèmes d'Information Géographique, le GPS submétrique fait son apparition vers 1997-98. D'un coût moindre, il a une précision de quelques décimètres à un mètre. Mais il nécessite un système différentiel, obtenu soit avec un GPS fixe et un mobile, soit par une liaison avec une station permanente. C'est le cas du système en temps réel submétrique RACAL. Un satellite géostationnaire sert de relais entre un ou plusieurs postes fixes et le poste mobile "client" qui peut être associé à un PC portable.



Un bifrèquence de la nouvelle génération, le Leica 1200. Il est évidemment équipé pour les liaisons radios nécessaires au temps réel. Le VRS arrivera avec le réseau Teria... Sur la photo, l'appareil fixe et le mobile (Rover) monté sur sa canne. Pour des raisons d'économie, il n'y a plus qu'un seul contrôleur, placé sur le poste fixe pour initialiser le chantier, il est ensuite placé

■ Les stations permanentes, le VRS (Virtual Reference Station) et le FKP (Flächen Korrektur Parameter)

Depuis longtemps, on pouvait se servir de stations permanentes fixes qui recevaient les signaux satellitaires en continu. Un seul récepteur mobile était alors nécessaire et l'on calculait les points en post-traitement, 24 ou 48 heures plus tard, après avoir reçu les données de la station permanente en format Rinex compressé. Le seul problème est qu'on ne pouvait guère travailler à plus de 20 km de la station de référence avec un bifrèquence.

Les stations permanentes se sont multipliées et depuis 2003 a été mis au point le "mode cinématique multistations de référence" qui exploite les données de plusieurs stations de référence réparties en réseau. On peut conserver la précision centimétrique en temps réel avec des stations distantes les unes des autres de 70 à 100 km. Ceci grâce à l'analyse des erreurs d'observation aux différentes stations du réseau, analyse mise à profit par l'utilisateur. Ce système présente une grande fiabilité du fait de la redondance des stations de référence et il peut générer un temps d'initialisation plus court. En 2005, la France est couverte partiellement par une cinquantaine de stations créées par l'IGN ou les collectivités locales. Dans la région de Toulon Marseille, bien encadrée, on peut actuellement travailler avec un récepteur unique, mais en faisant les calculs en post-traitement, dès le retour au bureau après s'être branché sur Internet. On peut ainsi travailler avec 4 ou 5 stations permanentes situées à 50 km ou plus. Le réseau Teria prévu en 2008 par l'Ordre des Géomètres-Experts devrait couvrir toute la France en complétant le nombre des stations existantes pour atteindre une centaine. Il permettra, si l'on est abonné, de travailler en temps réel avec un seul récepteur.

En 2004, deux techniques avaient été mises au point :

- Le VRS (Virtual Reference Station), qui utilise une communication bidirectionnelle entre le GPS mobile et le réseau des stations permanentes distantes de moins de 70 km. Ces communications sont assurées depuis 2003 par le téléphone portable fonctionnant en GSM (Global System for Mobile), ou GPRS (General Packet Radio Service) lequel permet un débit trois fois plus important, ou encore, CDMA (Code Division Multiple Access). Seule réserve à cette merveille, les portables ne sont pas utilisables partout ! Si en France, les réseaux de mobiles couvrent 98 % de la population, ils ne couvrent que 50% du territoire...

A partir de la position approchée fournie par le GPS mobile, le réseau permanent génère une station virtuelle proche du récepteur et calcule les correctifs locaux, comme le ferait une station fixe traditionnelle située à peu de distance de la zone de travail. Ces correctifs sont renvoyés au récepteur et sont spécifiques à ce récepteur. La majorité de la charge de calcul est donc assurée par le réseau permanent au profit de chaque récepteur GPS mobile (client).

- Le système FKP (Sigle allemand Flächen Korrektur Parameter), différemment du précédent, est unidirectionnel. Les corrections sont valables pour une zone donnée et le récepteur GPS

n'a pas à fournir sa position au réseau pour obtenir des corrections. Celles-ci sont émises par le réseau et la majorité de la charge de calcul est assurée par le récepteur GPS mobile. Le grand atout du VRS réside dans la maîtrise de l'ensemble des calculs par le serveur, alors que les corrections transmises par le FKP peuvent être utilisées par le récepteur mobile avec une modélisation différente. Des réseaux mixtes prennent les avantages des deux systèmes.

Les autres systèmes de géodésie spatiale

- Le GLONASS (GLObal'Naya NAVigatsionnaya Sputnikovaya Sistema). C'est le système russe. Il comprend 3 plans orbitaux inclinés sur l'équateur de 64°,8 et sur chacun desquels 8 satellites tournent à une altitude de 19200 km. Cinq stations au sol suivent les satellites. Le premier satellite fut lancé en 1982, la constellation de 24 satellites était mise en place en 1993. Mais ces satellites n'ayant qu'une durée de vie de deux à trois ans, du fait des problèmes économiques de la Russie, il n'y en avait plus que 12 en 1995, période à partir de laquelle le système n'est plus que semi-opérationnel. Actuellement, une mise à niveau est en cours avec l'Inde, en utilisant des satellites plus performants, d'une durée de vie de sept à huit ans. Le premier a été lancé en décembre 2004. Cependant, la Russie étant intéressée par une coopération au projet Galileo, Glonass pourrait être abandonné dans un futur proche (après 2010). Glonass utilise le système géodésique russe PZ 90, différent du WGS 84, ce qui pose des problèmes de transformation. De plus, comme le GPS à ses débuts, des dégradations sont créées sur les signaux, ce qui limite la précision à 50 m en mode absolu. Les militaires russes ont accès à un code Y précis. Certains constructeurs commercialisent des récepteurs qui peuvent utiliser le GPS et GLOSNASS, c'est le cas du Trimble R8 GNSS.
- Le système EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service). Ce programme lancé par l'Agence spatiale européenne en 1988 est opérationnel depuis le 25 juin 2005. Mais, actuellement en cours de certification, il ne sera acces-

sible aux usagers qu'en 2007. Il comprend un réseau de 30 stations qui analysent les signaux des satellites GPS pour générer des corrections différentielles sur l'Europe. Trois satellites géostationnaires servent de relais pour ces corrections. En temps réel, un monofréquence peut atteindre une précision de 2 m à 95 %.

- Le système GNSS (Global Navigation Satellite System) c'est l'éventuel futur système de navigation mondiale. La première version utilise actuellement GPS et Glonass.
- GALILEO. C'est le futur système supervisé par l'Union européenne et l'Agence Spatiale Européenne (ASE ou ESA en anglais). Il comportera 30 satellites (27 opérationnels + 3 en réserve), répartis sur trois orbites elliptiques présentant chacune une inclinaison de 56° par rapport à l'équateur et un demi grand axe de 23 616 kilomètres, la période des satellites étant de 14 h 22 m. Galileo prévoit l'utilisation de quatre bandes de fréquence, dont deux seront partagées avec le GPS. Un récepteur combiné Galileo-GPS sera en mesure de poursuivre entre 11 et 20 satellites en toute heure et en tout lieu de la planète. Cette caractéristique devrait permettre une meilleure utilisation en mode urbain. La méthode RAIM (Receiver Autonomous Integrity Monitoring) permettra de détecter d'éventuelles anomalies par comparaison de la qualité des données en provenance des divers satellites suivis. Ce qui améliorera grandement le niveau de fiabilité. Le fait de disposer de quatre porteuses permettra d'obtenir un point de précision centimétrique en une seconde !

Galileo devrait fournir cinq types de service :

- Un service ouvert gratuit et sans restriction d'accès.
- Un service sûreté de vie
- Un service commercial
- Un service public réglementé
- Un service recherche et sauvetage.

Le 28 décembre 2005, le satellite expérimental Giove-A a été lancé de la base de Baïkonour (Kazakhstan) par une fusée Soyouz-Fregat. Ce satellite préfigure les suivants dont le dernier devrait être lancé en 2008.

LE GPS à l'IGN

Comme vu précédemment, l'IGN fut l'un des pionniers en matière de Géodésie spatiale. Les GPS furent acquis dès le début, en 1985, pour la création du RRF (Réseau de Référence Français) et du RBF (Réseau de Base Français) appelés à remplacer la NTF, réseau géodésique terrestre moins précis et moins cohérent qu'un réseau géodésique spatial. Les observations des 23 points du RRF furent terminées en 1993, celles du millier de points du RBF en 1995. Les répertoires du nouveau réseau furent mis à la disposition du public à partir de 1997.

Parallèlement aux travaux de terrain, le GPS est utilisé lors des prises de vue aériennes pour guider le pilote au bon recouvrement des bandes. Il est aussi essayé à partir de 1992

pour déterminer la position des centres de prises de vues aériennes, lors des missions photo. Cette nouvelle méthode permet de limiter la stéréopréparation sur le terrain, un petit nombre de points suffisant pour le calage de l'aérotriangulation et le contrôle.

Avec le modèle numérique du géoïde en France mis au point par Henri Duquenne et le remplacement de la NTF par le RBF, la précision altimétrique du GPS a fait un bond en avant. A tel point, qu'en adoptant une technique adéquate on peut atteindre une précision centimétrique et depuis 2002 le réseau de points de nivellement français est entretenu par le procédé NIVAG combinant GPS et nivellement classique.



Le GPS en topographie

Les constructeurs ont longtemps entretenu une ambiguïté qui n'est pas encore totalement résolue à mon sens. C'est celle de l'emploi du GPS en lever topographique.

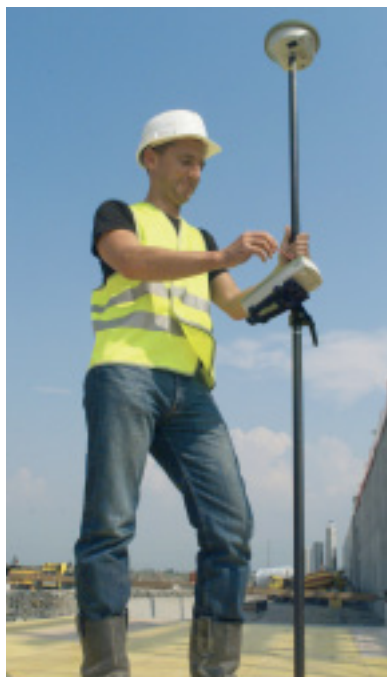


Photo Leica



GPS Smart de Leica. Le GPS est placé sur le théodolite auquel il transmet sa position. Le lever sera orienté à la station suivante, lorsque le GPS en aura déterminé les coordonnées et que le théodolite aura fait la visée inverse. A gauche, implantation d'un point sur un chantier.

En 1995, avec la méthode STOP and GO, j'avais fait un essai de lever en zone très dégagée. Cet essai s'était révélé très concluant. J'avais fait un second essai dans une zone située près d'une rivière bordée de grands peupliers. Bien que la majeure partie de la zone soit dégagée, le résultat avait été désastreux, d'autant plus que les arbres étaient vers le sud !

Aujourd'hui, LEICA a lancé son système SMART, dans lequel un GPS coiffe la station totale à laquelle il est associé. La démonstration que j'ai vue s'est montrée très astucieuse et séduisante. Mais, elle était faite dans une zone d'immeubles bas avec des espaces dégagés. Le résultat serait certainement moins bon en zone urbaine avec des immeubles plus hauts. On ne peut donc assurer que la méthode soit fiable avec la probabilité de 95 % chère aux constructeurs ! De plus, bien que les constructeurs aient fait un effort, l'acquisition d'un matériel matériel coûteux : antenne GPS et station totale adaptée, donne à réfléchir malgré son intérêt. En France, la mise en service du réseau Teria donnera plus d'intérêt à cet investissement.

Quant à TRIMBLE, sa démarche est différente, le GPS n'est pas sur le théodolite, mais sur la canne déplacée par l'opérateur pour la mesure de tous les points à lever. Cette méthode évite le problème de l'orientation et le calage du lever sur un grand nombre de points assure une meilleure cohérence. Leica a repris le même principe avec SMART rover. Mais, la même réserve que pour LEICA doit être faite en milieu urbain et en terme d'investissement.

Par contre, il est certain que l'avènement de Galileo amènera de grandes améliorations dans la fiabilité et dans la généralisation des levés au GPS.

Interférométrie radar satellitaire de précision (IRSP)

L'interférométrie est connue depuis longtemps et, dès 1868, Hippolyte Fizeau envisagea son utilisation pour mesurer le diamètre des étoiles. L'idée fut reprise par Michelson qui, en 1891 puis 1921 mesura le diamètre de plusieurs astres. Mais, la difficulté de réalisation laissa la technique en hibernation jusqu'aux années 1970 où elle ressortit en force dans l'astronomie, puis avec l'interférométrie laser principalement utilisée en topométrie industrielle ou de laboratoire.

Quant à l'IRSP, elle fut mise en œuvre à partir de 1992 avec le lancement des deux satellites ERS1 et ERS2 de l'Agence Spatiale Européenne. Elle a pour objet, non pas la localisation, mais la déformation de structures bien déterminées, le sol en particulier. A partir de séries de tirs radars étalés sur de longues périodes et effectués conjointement à partir de ces deux satellites, on peut obtenir des précisions de quelques dixièmes de millimètre. Les déformations de l'écorce terrestre peuvent être calculées avec une précision qui laisse rêveur. Mais, de multiples autres applications en découlent. Bien que les mesures puissent se faire sans réflecteurs, il est évident

que des précisions inférieures au millimètre nécessitent l'utilisation de cibles stables et bien définies.

Bibliographie

LEVALLOIS J.J., 1988, *Mesurer la terre*, (Chap. XVI, Géodésie spatiale, les premiers pas), A.F.T.-Paris

BOUCHER Claude, 1988, chap. XVII de l'ouvrage précédent : *La géodésie spatiale en France depuis 1971*.

BOTTON S., DUQUENNE F., EGELS Y., EVEN M., WILLIS P., 1995, *GPS localisation et navigation*, Hermès-Paris

TECHNOLOGIE § PLUS, Edition 2-2003 (lettre d'information Trimble) - Galileo.

DUQUENNE Fr., BOTTON S., PEYRET F., BETAÏLE D., WILLIS P., 2005, *GPS*, Lavoisier-Paris.

PUGH Nathan, THOMPSON Carl, WALLACE Daniel, 2005, *Naviguer dans le monde sans fil*, XYZ n° 104



LA PHOTOGRAMMETRIE

On attribue la paternité de la photogrammétrie au capitaine Laussedat qui, en 1859 avait émis l'idée d'une cartographie à partir des photographies aériennes prises d'une montgolfière par Nadar. Il avait aussi émis le principe d'un photo-théodolite pour la photogrammétrie terrestre. Les débuts de la photogrammétrie dans cette seconde moitié du XIX^e siècle et au début du XX^e sont bien décrits à la fin du tome II de l'ouvrage de Jean Hurault (voir bibliographie). Mais, elle connut ses développements décisifs entre les deux guerres, bien avant les percées technologiques des dernières décades.

Cependant, depuis les années 1970, elle a bénéficié de ces percées, en particulier de l'avènement de l'informatique, et a subi les évolutions très importantes qui en découlaient. Il n'y a plus aucun rapport entre le montage d'un couple stéréoscopique sur un écran de PC en 2003 et ce qui se faisait en 1970 sur les encombrants appareils de restitution opto-mécaniques. Le dessin de la carte ou du plan, qui se faisait alors par l'intermédiaire d'une liaison mécanique entre l'appareil de restitution et la table de dessin elle-même mécanique, n'a plus rien à voir avec la numérisation et les logiciels de DAO actuels, associés aux systèmes de restitution.

Stéréopréparation et aérotriangulation

Après la prise de vue aérienne, l'équipement des photographies aériennes en points de calage nécessaires à la mise en place des couples avant leur restitution a complètement changé. Son allègement par l'aérotriangulation avait été envisagé depuis longtemps. L'IGN s'était penché sur le problème dès 1950 et avait mis au point des procédés d'aérocheminement employés à partir de 1952 dans la réalisation de cartes à petite échelle de territoires d'outre-mer. Mais la méthode qui supposait des simplifications, telle l'altitude constante de l'avion manquait encore de précision pour être employée à grande échelle. On employait aussi des méthodes mécaniques telle que la TPFR (Triangulation Par Fentes Radiales) ou la compensation mécanique du réseau altimétrique. En 1956, Paul Herget de l'Ohio State Université, puis à la fin des années 1950, G.H. Schut au Canada avaient développé des systèmes analytiques pour tenter d'y parvenir.

L'apparition de l'informatique amena les progrès décisifs. A l'IGN, Georges Masson d'Autume, puis André Créhange travaillèrent sur un programme qui aboutit en 1964 et fut utilisé dans un premier temps sur la cartographie Outre-Mer. Il fut employé plus tard en France.

En 1968, en France, la restitution de chaque couple demandait la détermination sur le terrain de deux points de mise à l'échelle XYZ, plus quatre points en Z. En 1981, lors de la stéréopréparation en vue de la cartographie 1:25.000 de la Province d'Irbid, en Jordanie, on ne demandait plus qu'un ou deux points XYZ en extrémité de chaque bande et un point en Z toutes les six photos. Aujourd'hui, la centrale inertielle et le GPS embarqué permettent de déterminer la position et l'orientation de la chambre de prise de vue au moment de cette prise de vue. Aussi, la densité de points terrains nécessaire a encore diminué. Il faut ajouter que la détermination de ces points est facilitée par l'emploi du GPS.

Toujours grâce au GPS, et à l'aérotriangulation, toutes les anciennes techniques qui permettaient le calage des missions photos pour les cartes 1/200.000 réalisées par l'IGN outre-mer : astronomie de position, TPFR (Triangulation Par Fentes Radiales), APR (Air Profiles Records), nivellement barométrique sont passées à la trappe ! Il faut dire aussi que de nombreuses cartes à petite échelle sont maintenant réalisées à partir des images satellite souvent géoréférencées.



Restitution

■ Les restituteurs analogiques

En 1970, les ateliers de l'IGN comportaient d'impressionnantes rangées de restituteurs Poivilliers. On était frappé par la lourdeur de tous les dispositifs nécessaires à la reconstitution des faisceaux perspectifs des prises de vue, puis à la transmission des mouvements de l'index parcourant les photos jusqu'à la table traçante accolée. De par leur principe, ces restituteurs étaient dits analogiques.

Ils étaient de deux types. Dans les appareils à observation superficielle des clichés, les faisceaux perspectifs étaient réalisés mécaniquement au moyen de deux tiges métalliques couissant chacun dans une articulation qui reconstituait le point nodal arrière de chaque prise de vue par rapport aux clichés. A l'autre extrémité de la tige, deux microscopes se déplaçaient parallèlement au cliché. Les images vues dans les deux microscopes étant alors renvoyées vers un binoculaire, où leur fusion permettait la vision en relief. C'était le cas du Poivilliers D ou du Wild A 6, remplacé après 1952 par le Wild A 8.

Dans les appareils à observation goniométrique, les faisceaux perspectifs étaient reconstitués par un dispositif optique, dont la réalisation était rendue complexe par le recours à de nom-

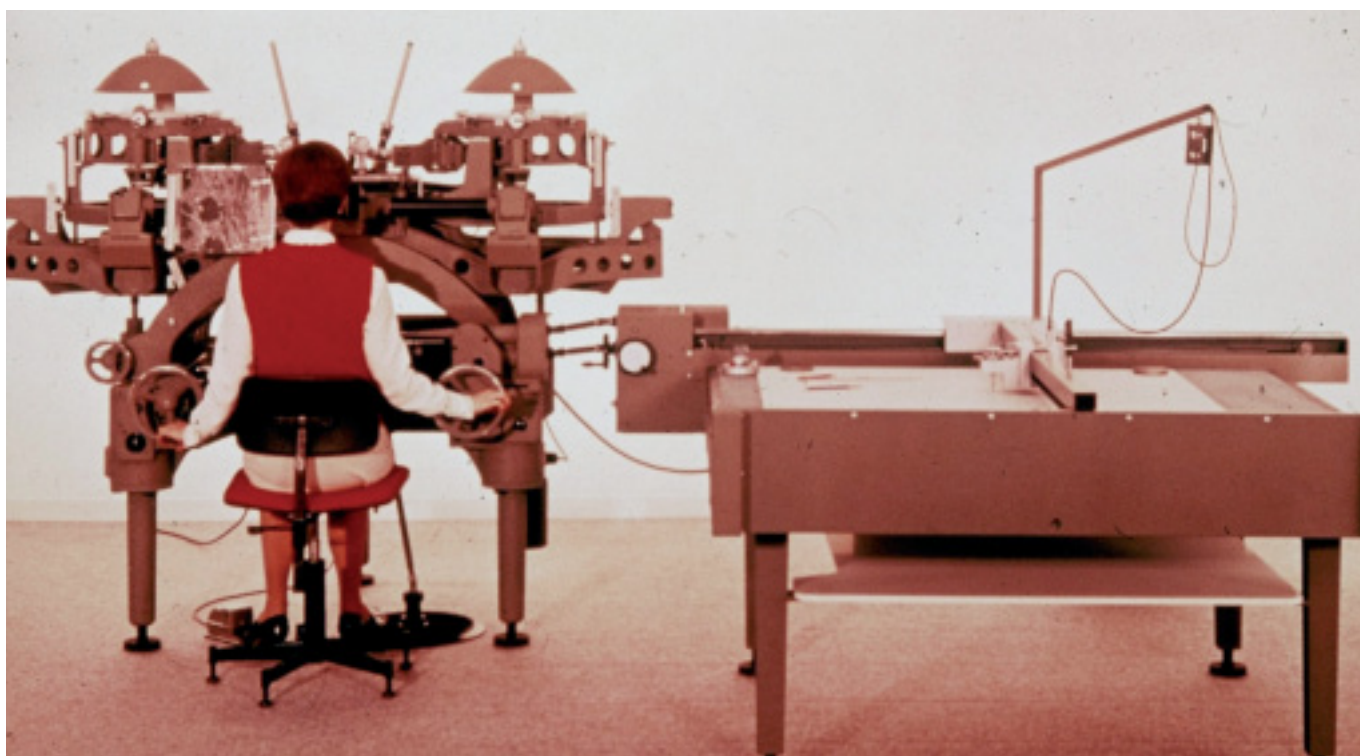
breux organes mécaniques. Mais la précision était meilleure que dans le dispositif purement mécanique précédent. C'était le cas du Poivilliers B.

Il faut aussi citer les remarquables Planimat de Zeiss et A8 de Wild et aussi le Presa qui équipèrent plusieurs ateliers IGN à partir de 1970.

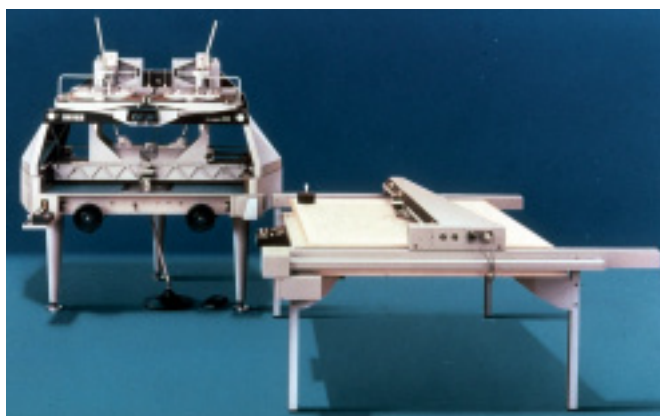
Dans ces deux types d'appareils, les mouvements de l'index visible dans le binoculaire et destiné à "filer" les éléments à restituer, étaient commandés par deux manivelles en X et Y et par un pédalier en Z. Une liaison mécanique par arbres et engrenages se faisait avec une table traçante à plat (coordinatographe) située à proximité du restituteur et qui reproduisait sur une feuille, par l'intermédiaire d'un crayon ou d'une plume, les mouvements de l'index.

■ L'arrivée de l'informatique et les restituteurs analytiques

En 1968, une nouvelle version du Wild A8 permettait d'enregistrer les coordonnées des points déterminés au cours de la restitution. C'était le début de l'informatique en restitution. Informatique qui allait permettre la réalisation des restituteurs analytiques.



Le "must" à partir de 1953 : le Wild A8. Un gros coléoptère peu esthétique pour ne pas dire monstrueux ! L'observation superficielle des clichés a amené la construction de deux tiges d'acier qui matérialisent les faisceaux perspectifs. Le tout donne un ensemble lourd et complexe. Le Poivilliers D était encore pire avec ses câbles et contrepoids ! La restitutrice fait mouvoir l'index qui suit les détails des photos avec les deux manivelles en X et Y et le pédalier en Z constitué d'un grand disque qu'on fait tourner avec le pied droit. Les mouvements de l'index sont transmis au coordinatographe (ou table traçante à plat) par un dispositif mécanique. Le dessin est souvent effectué au moyen d'un crayon et non à l'encre pour obtenir une minute brute (Archives auteur).



La génération suivante, plus esthétique, obéit aux mêmes principes. Ici, le Planimat D2 de Zeiss Oberkochen. La table traçante n'est plus entièrement mécanique : ses mouvements et sa liaison avec le restituteur sont électriques.



Un planimat D2 modernisé des années 1970 : le restituteur est toujours le même, mais, il n'y a plus de table traçante. Les coordonnées et codes de chaque pointé sont enregistrés.

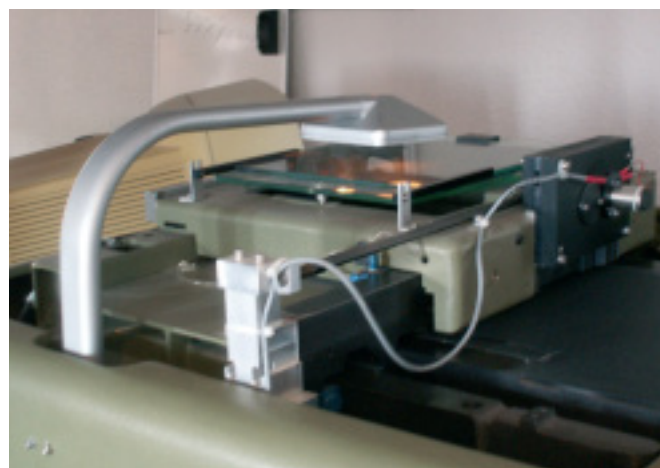


L'AM 2000 est un appareil hybride, qui se rapproche de l'analytique par les deux encodeurs dont on voit le boîtier noir sur les deux chariots portant les clichés. Sur la droite, l'écran qui permet la mise en place des couples, puis le dessin en DAO de la restitution.

Entrevus en 1956, réalisés pour la première fois en 1963 sous forme de prototype, parmi lesquels l'italien NISTRI en 1972, les restituteurs analytiques se sont développés à partir de 1976 avec les systèmes : Planicomp de Zeiss Oberkochen, Traster de Matra, AC puis S9-AP de Wild et DSR de Kern. Cette nouvelle génération bénéficiait des avancées de l'informatique et son but était de remplacer le mesurage tridimensionnel mécanique par le calcul et alléger ainsi les parties mécaniques de l'équipement, entre autres dans la mise en place des couples qui ne nécessitait plus d'intervention manuelle.

Mais les appareils de restitution représentant un investissement lourd, il paraissait difficile de remplacer du jour au lendemain les appareils analogiques par des appareils analytiques. Aussi, de nombreux utilisateurs demandèrent-ils au départ une adaptation de leurs appareils analogiques avec des encodeurs disposés sur les chariots. Ces encodeurs, évidemment, ne suffisaient pas à transformer les appareils analogiques en analytiques, ils permettaient surtout de numériser les points restitués et de créer des bases de données. Sur l'ordinateur associé, des logiciels spécifiques se chargeaient des tâches d'orientation, de calcul et de stockage des coordonnées XYZ déterminées à chaque pointé.

Sur les restituteurs analytiques de la génération suivante, toujours des encodeurs, mais avec une fonction différente. Les clichés argentiques sont placés sur deux chariots transparents nécessaires à leur examen, mais la mise en place des couples se fait numériquement, sur l'écran situé à côté du restituteur. Les opérations de restitution gardent apparemment la même structure mécanique : dans le binoculaire, l'opérateur voit l'image stéréoscopique et il déplace toujours l'index avec des manivelles en X, Y et un pédalier en Z. Mais en réalité, les encodeurs liés aux manivelles transmettent leur mouvement au logiciel qui les traduit et les transmet à son tour aux clichés en s'affranchissant de tous les procédés opto-mécaniques précédents. Chaque pointé est numérisé. La table traçante qui assurait, sur les premiers restituteurs analytiques, le contrôle de la saisie du dessin est remplacée par l'écran de l'ordinateur ■■■



Sur l'AM 2000, on voit bien l'encodeur fixé sur la droite du chariot et qui permet sa liaison avec l'ordinateur.

Clichés P. Courbon au cabinet OPS/A à la Valette du Var).



Le tout analytique : la “merveille” de Leica (Wild), le stéréo digitaliseur SD 2000 apparu en 1996. Bien que plus compact que les restituteurs de la génération précédente, la partie mécanique y reste importante. Toujours les manivelles en X et Y et le pédalier en Z.

où le dessin est exécuté avec un logiciel adapté, Microstation, par exemple.

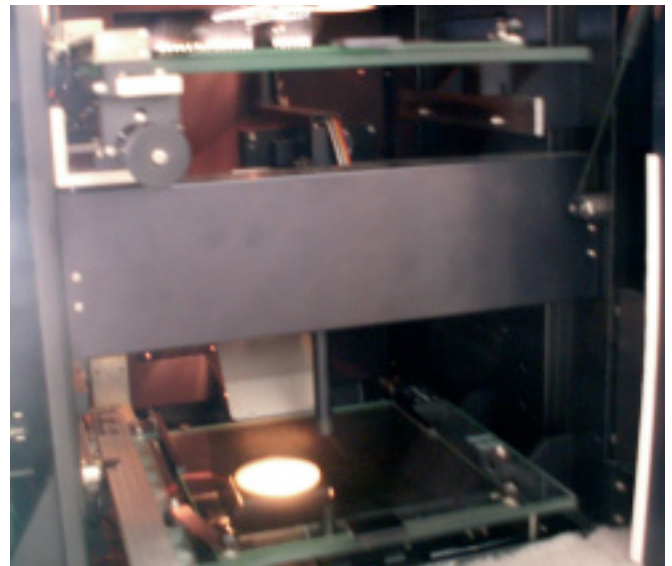
En 1996, avec le SD 2000 de Leica, le restituteur devient un stéréodigitaliseur. Cependant, avec les chariots portant les clichés photographiques et les commandes par manivelles et pédalier, la partie mécanique, bien que diminuée, reste encore importante. Mais, le logiciel tourne sur un PC et contrôle toutes les phases de l'opération de l'analyse jusqu'au transfert des données vers des logiciels d'application tournant sur une station “image”.

■ Le tout numérique

Il fallut cependant attendre la fin des années 1990 pour que la puissance de calcul des ordinateurs permette de s'affranchir totalement du côté mécanique du restituteur.

Le nouveau restituteur met alors deux écrans en parallèle : un écran sur lequel est monté le couple de prises de vue préalablement numérisées et un second écran sur lequel se font les calculs de mise en place du couple, puis le dessin en DAO. Il n'y a plus les manivelles, le pédalier et la grosse mécanique des précédents appareils, seulement une souris “topo mouse” avec une petite molette pour les Z, qui permet de pointer les contours à restituer. Une paire de lunettes spéciales, semblable à des lunettes de soleil est cependant nécessaire pour voir l'image de l'écran en relief. Les courbes de niveau peuvent se faire automatiquement par corrélation, mais aussi d'une manière classique... avec la souris.

A l'IGN, le tout numérique a commencé progressivement en 1996, mais les images utilisées pour la restitution étaient des photos argentiques scannées. La numérisation des chambres de prise de vue aérienne commença en 1996 avec les essais d'une caméra mise au point par l'IGN autour d'un capteur CDD matriciel Kodak de 6 Mégapixels. Les essais se continuèrent en



1997-98 en même temps que commençait la production d'images pour le CNES. Entre 2000 et 2003 est étudiée une technologie multicanal avec d'abord 3 caméras de 6 Mégapixels, synchronisées entre elles et munies de filtres différents. En 2002 un canal proche de l'infrarouge est rajouté pour une mission pilote sur le Tarn. En 2003, on passe du format 6 Mégapixels au format 16 Mégapixels. Les problèmes liés aux filtres, objectifs et post-traitement résolus, on peut aborder la production de masse. En 2005, les chambres de prise de vue numérique ont fini de remplacer totalement les argentiques.

A propos de prises de vue, il est intéressant de rappeler que jusque dans les années 1960, l'IGN n'utilisait que des plaques en verre comme support des négatifs photographiques. La stabilité dimensionnelle de ces plaques les faisait préférer aux pellicules. Les magasins cylindriques associés aux chambres de prise de vue Poivilliers-SOM contenaient 96, ou même



Un appareil de restitution moderne : deux écrans, une souris et un PC muni des logiciels adéquats ! Sur l'écran de gauche, deux photos numérisées ont permis de monter le couple ; sur celui de droite, les calculs de mises en place du couple seront suivis par le dessin en DAO.

192 plaques 19x19. Il fallait des aptitudes de déménageur et du souffle pour changer les magasins en altitude et dans l'espace restreint des avions de prise de vue ! Leur remplacement par des pellicules sonna le glas des restituteurs Poivilliers qui ne travaillaient que sur plaques !

■ Les orthophotoplans

Depuis longtemps on avait pensé à redresser les photos pour obtenir une image dont les qualités métriques se rapprochent de celles du plan. Mais, le redressement opto-mécanique avec des appareils de redressement ne corrigeait que les déformations dues au défaut de verticalité de la prise de vue. Il ne corrigeait pas les différences d'échelles dues aux différences d'altitude. Le redressement n'était donc utilisable que dans les zones ou facettes de terrain très peu accidentées.

Là encore, les progrès décisifs furent apportés d'abord par l'informatique, puis, plus tard, par l'apparition des caméras numériques. L'informatique allait permettre de créer les Modèles Numériques de Terrain (MNT) nécessaires pour corriger les différences d'échelle dues aux différences d'altitude des points du terrain. Peu avant 1970, l'IGN faisait l'acquisition d'un Stéréomat, c'était un B8 Wild muni d'un dispositif qui gardait automatiquement le contact avec le terrain par corrélation lorsque l'opérateur suivait des lignes parallèles en X,Y. La sortie des profils constituant le MNT sur bandes perforées ou magnétiques s'avérait complexe et générait de nombreux problèmes. Vers 1975, l'IGN se lança dans la numérisation des courbes de niveau pour l'armée de l'air. Le résultat, assez médiocre, ne put être employé aussitôt pour la confection de MNT.

L'apparition des MNT maillés avec un semis de points régulièrement disposé est un peu confuse, car ces MNT faisaient appel au début, soit à des profils, soit à des fichiers de courbes. Leur pleine utilité apparut avec la numérisation des clichés en 1982. C'est juste après que l'IGN obtint la cartographie à grande échelle de la ville de Riyadh et qu'il fallut sortir industriellement des orthophotos, ce qui généra de nombreux problèmes. Cependant, mis à part le chantier de Riyadh, la confection des orthophotoplans IGN était insignifiante, alors qu'elle s'était développée dans certains pays, tels le Canada ou l'Allemagne.

Jusque dans les années 1990, les orthophotoplans se faisaient couple par couple, nécessitant la présence prolongée d'un opérateur spécialisé qui en alourdissait le prix de revient. Les orthophotoplans relatifs à plusieurs couples étaient réalisés par assemblage manuel.

A partir de 1988, l'IGN conscient de la lourdeur des procédés utilisés se lança dans l'étude de la confection automatique d'un bloc de plusieurs clichés à partir d'images numériques, cela sans monter de couples. Le programme baptisé Orthomat fut essayé en production en 1993.

Mais, il faudra attendre 1998 pour que l'IGN passe à la phase industrielle et décide de se lancer dans la BD ORTHO (Base de données orthophotographies). Au début, les clichés scannés

au pas de 28 µm et associés à un MNT (modèle numérique de terrain) permirent d'obtenir des clichés orthorectifiés. En 1999, six départements étaient couverts, puis 20 autres en 2000 et encore 23 en 2001. La première couverture a été terminée début 2004. Nous avons vu précédemment qu'à partir de cette date, les caméras argentiques furent remplacées petit à petit par des numériques.

Dans les zones urbaines, on atteint une précision inférieure à 0,5 m, environ 25 cm pour une dizaine de villes. Dans les autres zones, la précision est de l'ordre du mètre. Par contre, en montagne, on tombe dans une fourchette de 1,5 à 3,5 m.

Autre progrès dû à l'informatique : comme pour les logiciels de dessin, l'établissement de documents sur différentes couches permet de les superposer. C'est ce qui est fait dans GEOPORTAL, où depuis 2006, par internet, on peut superposer la carte 1/25.000, l'orthophotographie, le plan parcellaire du cadastre ou la carte géologique.

■ Les images satellites

La télédétection a été leur première application majeure. Avec leur pouvoir de résolution de plus en plus fin, elles sont de plus en plus employées en photogrammétrie pour les cartes de petite échelle. Au début de leur emploi en photogrammétrie, des logiciels de traitement durent être créés, car différemment de l'image photographique argentique prise instantanément, les images satellites étaient enregistrées par un balayage électronique, ligne par ligne et durant un temps beaucoup plus long. On ne pouvait plus reconstituer le faisceau perspectif des prises de vue classiques. Aujourd'hui, les images du satellite Quickbird ont une résolution de 0,6m qui les rapproche de la finesse de la photo !

■ Les images radars en photogrammétrie

Avec les radars à synthèse d'ouverture (RSO ou SAR en anglais), très sensibles aux ondulations du terrain, de nouvelles techniques de photogrammétrie sont actuellement recherchées. Je ne pense pas qu'elles remplaceront la photogrammétrie classique, ou seulement dans certains cas particuliers. Ce sont :

La radargrammétrie RSO

Comme la photogrammétrie classique, elle utilise la parallaxe entre deux images acquises de deux points de vue différents. Une méthode analytique est nécessaire et la vision stéréoscopique est inconfortable.

L'interférométrie RSO

Elle consiste à calculer les différences d'altitude du terrain à partir de la différence de phase entre les échos radars acquis de deux positions très proches de l'antenne.

La radarclinométrie RSO

Alors que les deux procédés précédents utilisent un principe stéréoscopique fondé sur la géométrie de deux images, la radarclinométrie utilise les différences d'intensité et peut travailler sur une seule image.

Conclusion

Dans les années 1950, un ingénieur à l'esprit curieux et ouvert pouvait pratiquer toutes les techniques liées à la topographie et à la cartographie. Aujourd'hui, cela n'est plus possible et il est devenu nécessaire de se spécialiser.

Sans parler de révolution continue, toutes les techniques apparues précédemment évoluent en permanence, les logiciels s'améliorent, de nouvelles applications qu'il serait trop long et fastidieux d'énumérer apparaissent constamment. De nouvelles disciplines issues de la topographie font leur apparition et se généralisent : géomatique, Systèmes d'Information Géographique (SIG). Les mentalités changent. Le GPS fait son apparition dans la vie courante : en voiture, en randonnée. Les cartes sur CD-Rom se démocratisent. Des notions, telles que le géoréférencement, autrefois réservées à un cercle fermé de spécialistes commencent à être perçues par un nombre croissant d'utilisateurs.

Comme beaucoup d'autres, j'aurais tendance à penser que l'évolution technologique est exponentielle, que nous n'en sommes qu'au début d'une évolution folle et que la machine va encore s'emballer.

L'avenir de la nouvelle génération obligée de se remettre en cause constamment, avec des temps de pause de plus en plus courts me paraît peu enthousiasmant. Il y a aussi les problèmes d'investissement : à peine a-t-on acquis un appareil coûteux (la précision est toujours chère) qu'il devient obsolète. J'en avais fait l'amère expérience en 1995 en faisant l'acquisition d'une paire de GPS bifrèquence d'un prix de 400 000F en compagnie d'autres géomètres.

Un an et demi après, le temps réel se généralisait en France, notre appareil était dépassé alors que nous étions loin de l'avoir amorti ! Il faut d'ailleurs ajouter, que produits en plus petit nombre et faisant l'objet de développements incessants, les appareils topographiques de précision n'ont pas connu la baisse spectaculaire de l'informatique de grande série. En dix ans le prix d'un GPS bifrèquence n'a été divisé que par 1,5, comparez ce chiffre à celui des PC !

Quant aux développements continus des appareils, il faut constater qu'ils sont souvent générés par la concurrence sans merci que se livrent les constructeurs.

Michel Kasser pense différemment. Pour lui, cette explosion était prévisible car elle correspond à des technologies en gestation depuis longtemps. Il a fallu plus de trente ans pour que l'on passe des premières expériences de la géodésie spatiale à la généralisation du GPS.

Même constatation pour l'informatique et l'électronique. Nous arrivons au sommet de la courbe et les principes de base vont encore rester les mêmes pendant longtemps. Seules se feront des améliorations de détail ou des applications nouvelles des techniques existantes.

L'avenir tranchera ! 1

Remerciements

En premier lieu, l'Association française de topographie (AFT), dont le comité de lecture a permis l'amélioration de ce travail et en a permis la publication.

Nicolas Balard, enseignant à l'ESTP de Cachan pour sa relecture du chapitre GPS.

Serge Botton, Ingénieur des Travaux (IGN) pour ses réponses sur le GPS.

André Créhange, Ingénieur Géographe (IGN) pour les calculs à l'IGN.
Robert Doustaly, Géomètre-Expert DPLG à Solliès-Toucas (Var) pour l'historique de la première table traçante, François Froment et Lionel Sagnol, du Cabinet Arragon à la même adresse.

Jean Ducloux, Ingénieur Géographe (IGN)

Jürg Dedual qui a réalisé un beau musée virtuel sur la société Wild Heerbrugg.

Françoise Duquenne, Ingénieur Géographe (IGN).

André Fontaine, Ingénieur Géographe (IGN) pour les calculs et la géodésie à l'IGN.

Patrice Gaubert de la société Leica.

Pierre Grussenmeyer, Professeur à l'INSA Strasbourg

Pierre Hecker, Ingénieur des Travaux (IGN) pour la cartographie automatique à l'IGN.

François Hospital, Nicolas Bouad, Audrey Alajouanine de la société Opsia à Toulon, qui m'ont fait visiter leur atelier de photogrammétrie avec les appareils récents.

Jean-Claude Leblanc, Ingénieur Géographe, qui a passé de longues années au service de la logistique IGN et a conservé de nombreux documents qui m'ont été d'une aide précieuse.

Hélène Leplomb, ingénieure commerciale de Leica Geosystems France

David Lhomme et la Société ATM3D pour la lasergrammétrie
Eliane Matter, IGN

Daniel Menet, documentation photographique de l'IGN.

Emmanuel Natchitz qui m'a ouvert la documentation de la section topographique de l'ESTP de Cachan et a même fait démonter deux stations totales pour que je puisse voir de près les procédés de lectures angulaires.

Bernard Piasco, Société SPIRAL à Toulon pour les tables traçantes.
Professeur Rudolf Staiger de Bochum, coauteur du "Instrumentenkunde der Vermessungstechnik" qui a toujours aimablement répondu à mes courriers et demandes de renseignements.

Bibliographie

HURAUULT J., CRUZET J., 1956, *Manuel de photogrammétrie*, IGN

EGELS Y., KASSER M., 2001, *Photogrammétrie numérique*, Hermès-Lavoisier

GEOMETRE, Revue n° 8-9/août-septembre 1995, *l'instrumentation topographique*.

KASSER Michel, 2005, *Vers l'achèvement d'un cycle de modifications majeures dans le domaine de la topométrie ?* XYZ n° 104

Contact

Paul Courbon Ingénieur des Travaux géographiques (IGN)
Géomètre-Expert DPLG - paul.courbon@yahoo.fr

JOURNÉES DE LA TOPOGRAPHIE : Etat et tendances de l'art topographique

■ Mathieu KOEHL

Les Journées de la Topographie de l'INSA de Strasbourg marquent le début en fanfare d'une nouvelle année scolaire, le premier vrai contact des étudiants de 3^e année avec le milieu professionnel tout en permettant aux étudiants de 5^e année de réaliser leur dernière obligation académique avant de pouvoir être diplômés. Ce moment privilégié nous permet de faire un arrêt sur image, un état de l'art en quelques sortes se fondant sur les sujets de Projets de Fin d'Etudes (PFE) choisis et réalisés par les futurs ingénieurs. Ces PFE, même s'ils ne correspondent qu'à un petit échantillon, permettent de dresser un bilan révélateur des préoccupations majeures et surtout des intérêts des futurs professionnels, ils peuvent être considérés comme de vrais indicateurs de tendances dans le milieu de la Topographie.

Un bilan sur six ans

En reprenant l'ensemble de sujets depuis les six dernières années (la liste des sujets est disponible sur le site de l'INSA (<http://www.insa-strasbourg.fr/topographie>), nous pouvons dresser le tableau suivant comprenant des statistiques sur les différentes disciplines et thématiques abordées (figure 1).

Le graphique suivant reprend, en pourcentage, les disciplines principales associées aux différents projets. Il est à remarquer que les limites de ces différentes thématiques ne sont pas rigides. Un autre classement, nous permet de retrouver les thématiques selon leur importance (figure 2).

Comme nous pouvons le voir dans ces différentes classifications, la palette de sujets abordés est très large et couvre l'ensemble des disciplines de la topographie. Néanmoins, il s'agit de nuancer ces différents chiffres en fonction de leur évolution au cours des dernières années.

Ainsi, les technologies SIG (au sens large) tiennent la corde au niveau des

disciplines choisies. Mais en détail, ces deux dernières années ont vu les SIG 3D et les cartographies sur Internet se développer nettement. La photogrammétrie est également une technologie largement choisie. Mais, là encore, ce sont photogrammétrie et lasergrammétrie qui sont combinées pour la constitution de modèles virtuels 3D. La métrologie et l'auscultation restent des disciplines régulièrement choisies, tout comme les traitements d'images et la télédétection. Enfin, le GPS ou plus largement les réseaux GNSS ont fait l'objet d'études récentes avec les déploiements des réseaux permanents tels que le RGP et TERIA.

Le cru 2007 en détail

Mais revenons à l'exercice consistant à dresser un état de l'art à partir des sujets choisis pour la dernière session en date. Ceux-ci sont listés à la fin de cet article et sont consultables à l'INSA de Strasbourg.

■ SIG

En reprenant les différentes classifications, et en commençant par les SIG, la tendance des dernières années se confirme dans l'évolution des "applications SIG basées sur Internet" [1]. En effet, après avoir défini les modes de diffusion de la cartographie sur Internet, ce projet avait pour objectif la mise en place d'une interface permettant de configurer à distance les représentations cartographiques des données fournies par un serveur web, en l'occurrence MapServer. Les fichiers "map" associés sont générés automatiquement d'après les paramétrages de l'utilisateur distant. Ceci lui permet notamment également d'utiliser des requêtes spatiales sur le SGBD de type PostgreSQL / PostGis. En utilisant la même technologie, à base de MapServer, l'"étude de la mise en œuvre d'un Référentiel Foncier Unifié"[2] revient sur les concepts généraux du RFU et sur sa mise en place, ainsi que sur le développement du logiciel SIG extranet "eFoncier", maquette et plate-forme du RFU développée pour



Figure 3 : Interface vierge de "eFoncier".

les besoins de l'Ordre des Géomètres-Experts. Les différents partenaires comme l'OGE, l'IGN, la DGI ou encore l'AMF y sont bien identifiés. A terme, le RFU devrait permettre de gérer et de mutualiser les éléments de mutations foncières sur un outil unique accessible par tous les acteurs du foncier, voire par le grand public (Figure 3).

SIG et 3D

Dans un autre registre, mais toujours dans le domaine des SIG, la 3D refait son apparition dans un contexte assez original traitant des possibilités de "[...] réalisation d'un cadastre du sous-sol en trois dimensions"[3]. C'est en Suisse que la Direction Cantonale de la Mensuration Officielle (DMCO) du Canton de Genève pose des questions sur la faisabilité d'un tel SIG en 3D et surtout sur les possibilités de modélisation des réseaux. Les moyens techniques, informatiques et les données aujourd'hui disponibles peuvent servir de base à un tel SIG, mais le montage de grosses bases de données et le développement de méthodes automatiques de modélisation et d'intégration de données sont encore à réaliser. La qualité, et notamment la précision des données devra également être améliorée avant de pouvoir les utiliser en exploitation (Figure 4).

Un autre domaine a été exploré par les SIG 3D : c'est celui de la production de cartes des nuisances sonores pour les villes de plus de 100 000 habitants et les grandes infrastructures. La création d'un drapage optimisé concernant tous les éléments intervenant dans les calculs acoustiques permet de générer une

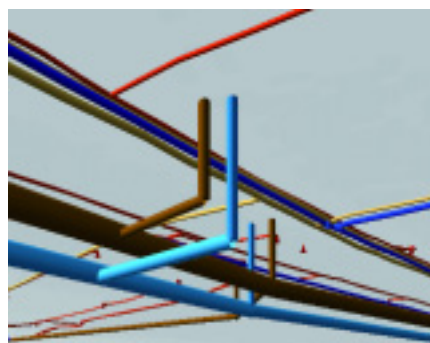


Figure 4 : Vue 3D des canalisations après modélisation.

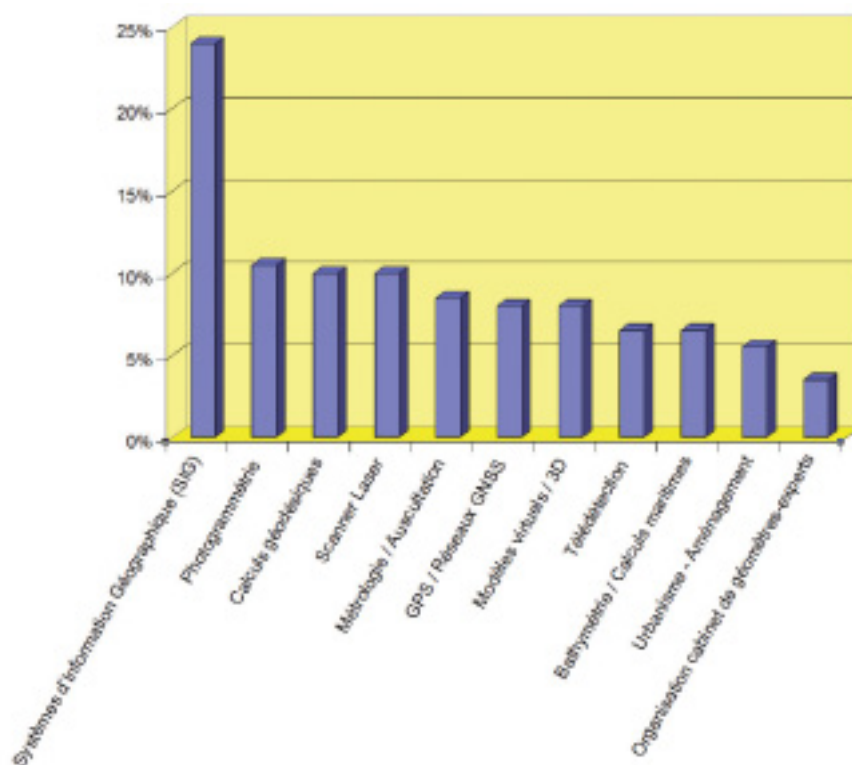


Figure 1 : Disciplines associées aux PFE (état sur les six dernières années).

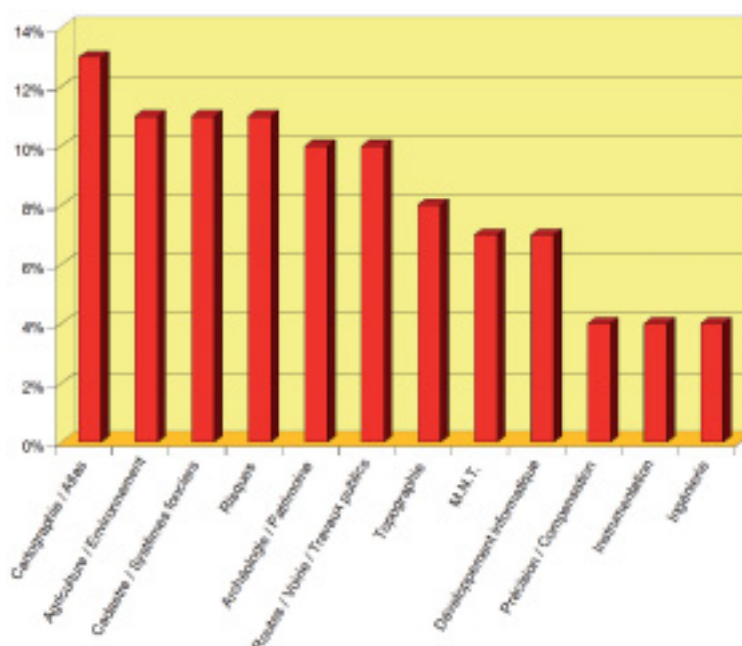


Figure 2 : Thématiques des PFE au cours des six dernières années.

cartographie fort utile aux collectivités. Cette réalisation est une "évolution du logiciel MITHRA-SIG"[4]. (Figure 5) Présente depuis quelques années déjà, la "Mise en place d'un SIG 3D navigable consacré aux monuments historiques"[5] poursuit son évolution.

Après le développement de procédures de modélisation de plus en plus maîtrisées, on retrouve ici la forte volonté de fournir des systèmes d'information interactifs, tournant dans des environnements peu coûteux et accessibles par le plus grand nombre, à savoir un envi-

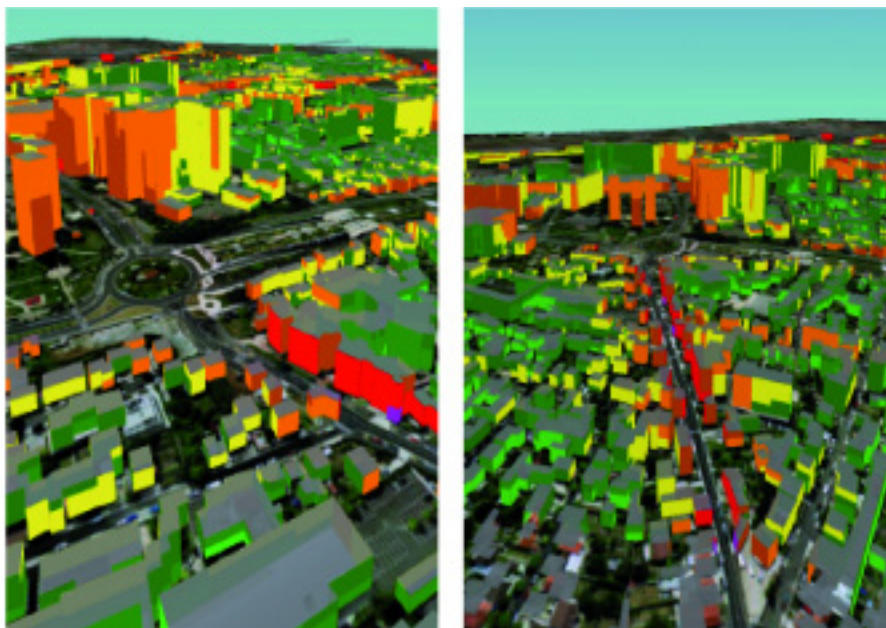


Figure 5 : Carte 3D en façade sur la ville de Bobigny (indice acoustique : Leqn).

ronnement Internet. Les développements les plus récents sont analysés en termes de modélisation 3D, de gestion de données géométriques dans des bases de données spatiales et enfin en ce qui concerne l'affichage et l'interaction avec le modèle. VRML, X3D, PHP, AJAX3D sont les langages que l'on ren-

contre à présent le plus fréquemment dans ce contexte. On les retrouve également dans une thématique voisine, concernant là encore les modes de "représentations bi- et tridimensionnelles interactives"[6] et les "systèmes d'information archéologiques" qui doivent être à même de gérer les impor-

tantes quantités de données produites. Ici sont abordées les problématiques de transformation des plans 2D et des modèles 3D en des interfaces d'accès aux informations d'une base de données sur Internet. Les plans sont ainsi transformés en SVG et les modèles en VRML, alors que les informations reliées sont-elles stockées dans des bases de données. Les sites Web dynamiques réalisés ici utilisent les technologies WAMP (Windows, Apache, MySQL, PHP), ils autorisent une interaction bidirectionnelle, bi- et tridimensionnelle entre les différents types de données (Figure 6).

Toujours pour les archéologues, les techniques de "redressement et mosaïquage [...]"[7] sont développées pour être utilisées dans de nouvelles approches de modélisation et de redressement d'objets plans. Là encore, les propriétés du langage VRML et le contexte 3D sont mis à profit pour simplifier les techniques et pour accélérer la chaîne de production incluant mosaïquage et mappage de texture. Par ailleurs, et en tant que prestataire de services cette fois, il est important d'effectuer des analyses de marché pour répondre au mieux aux besoins des clients. Ainsi, l'"Analyse des besoins en modèles 3D"[8] comporte trois objectifs : déterminer les besoins des clients en modèles 3D, proposer une méthodologie de conception des modèles 3D et qualifier la LIDARgrammétrie comme nouvelle technologie d'acquisition de données 3D. Même s'il en ressort que le segment communication est le plus demandeur de modèles 3D, de nouvelles propositions méthodologiques sont avancées pour améliorer les processus de confection de maquettes 3D.

■ GNSS

Comme à l'accoutumée, les GNSS ne sont pas en reste. En effet, alors que des nouvelles "méthodologies de traitement GPS cinématique en mer"[9] continuent à être développées, notamment pour les besoins en géophysique et en tant que technique complémentaire à l'altimétrie satellitaire dans le temps et l'espace, "[...] GLONASS et

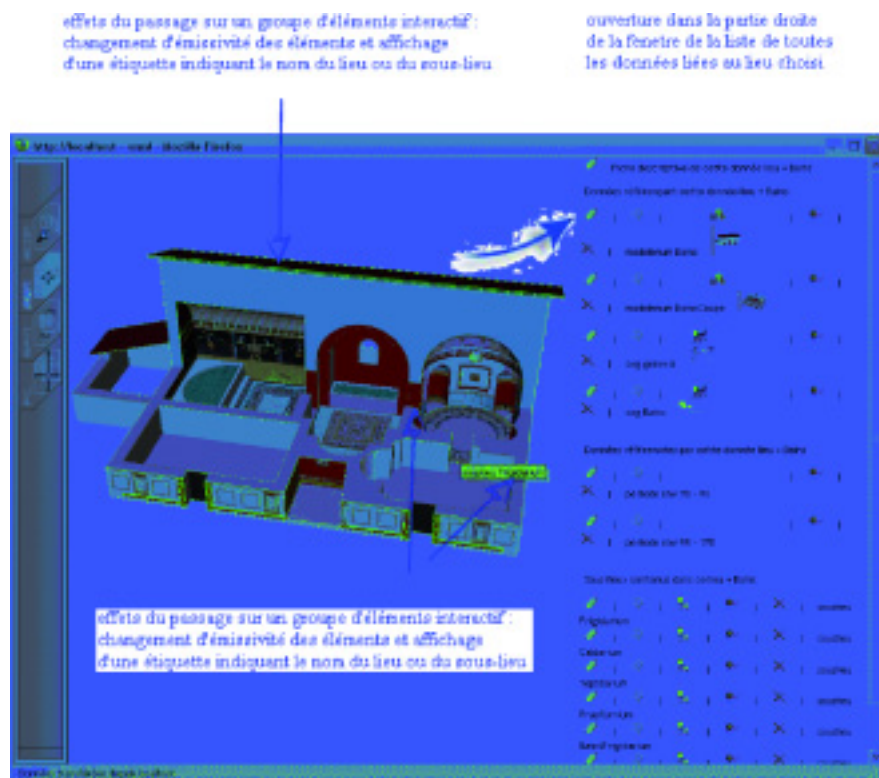


Figure 6 : Interface 3D interactive pour l'accès aux données liées aux lieux modélisés.

■ ■ ■ **GALILEO en complément du réseau GPS** [10] sont analysés pour en connaître les apports futurs. En effet, alors que le dynamisme de certaines nations dans l'objectif de créer leur propre système global de positionnement semble réel, que les débouchés sont importants, surtout dans le domaine de la topographie, l'avance du GPS semble irrattrapable... sauf pour les fenêtres de tir qui pour des besoins d'exploitation accrue ou de grandes précisions devraient être largement agrandies par la combinaison de plusieurs GNSS. A suivre donc.

■ Haute précision

La topographie a toujours permis de se distinguer dans le domaine de la mesure précise. Et qui dit mesure, précise de surcroît, pense immédiatement à compensation. La *"compensation d'un réseau gravimétrique"* [11] nous le rappelle à juste titre et nous renvoie à nos tablettes ! Et quand il s'agit du *"positionnement de puits déviés"* [12], le niveau d'intégration des notions de corrections géodésiques fondamentales à sa trajectoire dans une projection cartographique, devrait être majeur.

La même haute précision est requise dans le cas des auscultations. Souvent, les sites n'offrent pas des accès faciles et les méthodes d'*"auscultation sans prismes ni repères"* [13] sont les seules solutions envisageables.

■ Lasergrammétrie, nouvelle technologie d'acquisition

La lasergrammétrie fait partie des nouvelles méthodologies d'acquisition et de mesure. Elle est comparée à la tachéométrie et à la photogrammétrie pour une *"Adaptation potentielle [...] au sein de la SNCF"* [14]. Alors que les différents scanners sont testés, l'étude propose de comparer les résultats obtenus avec des méthodes traditionnelles comme la tachéométrie, tout en explorant et en dotant l'entreprise d'une solution complète en photogrammétrie. En fonction des besoins, chaque application particulière est associée à un type d'instrumentation et à des processus de mesure redéfinis. Cette étude montre

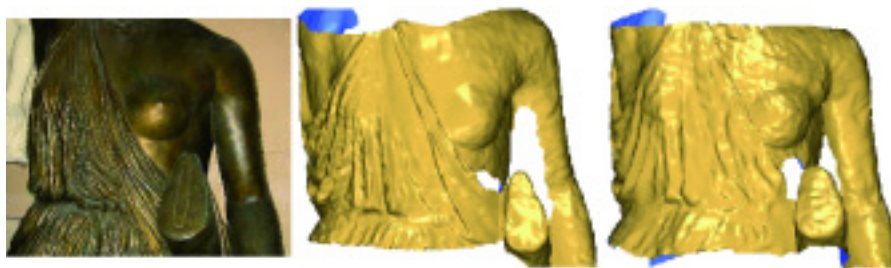


Figure 8 : Amazonne de type "Mattéi", différents modèles.

ainsi le potentiel de la lasergrammétrie dans le domaine des mesures, mais conserve à la tachéométrie sa supériorité en termes de précision et donc son utilisation dans le domaine des auscultations fines.

Le tachéomètre reste donc toujours d'actualité dans le domaine de la haute précision et surtout lorsqu'il est possible de mettre en place des *"auscultations automatisées"* [15] à l'aide de tachéomètres robotisés. Les asservissements sont optimisés et les méthodes de traitement des résultats améliorées, voire entièrement automatisés.

Mais, les mesures ne portent que sur quelques points, bien identifiés. Dès qu'il s'agit d'évaluer des déplacements d'ensemble, de structures complètes, d'ouvrages entiers, la tachéométrie montre ses limites. Il faut alors faire appel à la lasergrammétrie. Les points en nombre limité sont remplacés par des nuages de points. Ceci est le cas lors de l'*"utilisation combinée de la photographie aérienne et de la lasergrammétrie dans la surveillance d'ouvrages en terre"* [16]. Ainsi, en associant

les potentiels d'un lever scanner et d'une campagne de prises de vues aériennes, il est possible de créer le photomodelle de tout ouvrage en terre. Ce photomodelle, sur lequel figurent les polyèdres découpés par les intersections des directions structurales avec le massif, sert alors d'outil de prise de décision pour la mise en sécurité des sites. Les photographies aériennes proviennent ici d'un drone, pour lequel les procédures d'exploitation des clichés ont été mises à l'épreuve. D'autres *"mise en œuvre [18], étude de précision et recherche d'applications"* [17] de la lasergrammétrie font l'objet de travaux intéressants et débouchent, là encore, le plus souvent sur des cas extrêmes comme la détermination des déformations comme aide au diagnostic des pathologies d'un ouvrage (Figure 7).

Des ouvrages de grandes dimensions, comme les barrages et les tours de réfrigérants demandent également à être surveillés de près. Après la topographie classique, puis la photogrammétrie, c'est autour de la lasergrammétrie que se focalisent les plus grandes attentions. L'étude de la précision de l'instrument a été effectuée en prenant en compte d'autres facteurs comme les conditions atmosphériques, les types de cibles, le nombre de tirs, l'angle d'incidence. Il en ressort, une fois de plus, que la lasergrammétrie n'offre pas encore les mêmes précisions que les méthodes proposées précédemment. Néanmoins, la mesure laser comporte des atouts : rapidité, densité d'informations, possibilité d'inspection visuelle...

A d'autres échelles, dans d'autres domaines d'activités, la lasergrammétrie trouve également des applications originales. C'est le cas, lorsqu'il s'agit

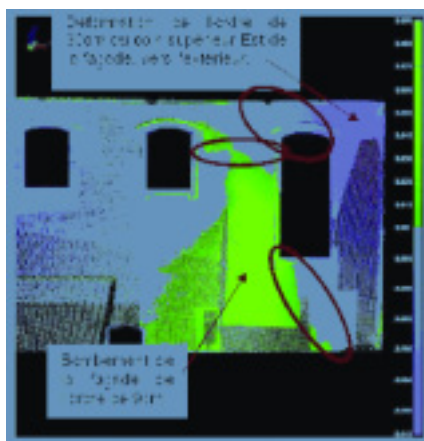


Figure 7 : Cartographie de déformations.

5^e Journées de la Topographie

Cet article commence par une remarque sur le départ en fanfare d'une nouvelle année scolaire. En effet, ces Journées de la Topographie (JT2007) furent un nouveau succès et furent très appréciées par tous les participants. Comme d'habitude, elles s'étendaient sur trois journées – du 24 au 26 septembre 2007 – très instructives.

Alors que les matins étaient réservés aux soutenances de PFE, l'après-midi du lundi a été consacré à un salon des exposants riche de 19 partenaires. L'occasion pour les exposants de montrer leurs dernières nouveautés, l'occasion pour les étudiants et les visiteurs d'approcher et d'échanger sur les nouvelles technologies entre et avec les professionnels.

Le Conseil régional de l'Ordre des Géomètres-Experts (OGE) a également tenu une commission sur le prochain Congrès des Géomètres-Experts, qui sera le 39^e. On en retiendra :

- le thème principal : "Prospectives et perspectives : le rôle du géomètre dans l'économie et la société européenne".
- les dates : 17-19 septembre 2008.
- le lieu : Strasbourg
- mais également que les 6^{es} Journées de la Topographie se fonderont dans cette manifestation.

Le mardi après-midi était réservé à la tribune des spécialistes. La thématique retenue cette année était : "l'ingénieur topographe sur la scène internationale". L'occasion était donnée aux intervenants, Alain GAUDET pour l'OGE, Bernard FLACELLIERE pour sa carrière chez TOTAL, Claude MICHEL pour son expérience à la direction de FUGRO-GEOID et à Marc DAEFFLER d'évoquer les expériences enrichissantes de leurs rapports à l'international. Nul doute que toute l'assistance, et surtout les étudiants sont sortis convaincus de ces conférences, animées par Jacques LEDIG, de l'importance de l'ouverture à l'international pour les futurs professionnels. Il ne restait plus qu'à se rendre à l'Hôtel de ville de Strasbourg, où M. DEBS, vice-Président de la Communauté Urbaine de Strasbourg et Maire d'ENTZHEIM a accueilli tous les participants au nom de Madame le Maire Fabienne KELLER.

Le mercredi après-midi, Vincent PICARD et Alain GAUDET (OGE) ont expliqué avec force présentation en quoi consistait la profession de géomètre-expert. Le point de vue des professionnels actifs est très complémentaire à celui des professeurs habituels, et les questions n'ont pas manqué en fin de séance. Une majorité de mains se sont soulevées lors du questionnement sur l'état du choix des étudiants à se diriger vers l'exercice de la profession de géomètre-expert.

Les JT2007 se sont alors terminées par le point d'orgue consistant en la remise des attestations de diplôme des nouveaux ingénieurs. Après le message appuyé de Mme Creton, Directrice de l'INSA sur les opportunités offertes par un tel diplôme, après les remerciements à tous les participants, organisateurs des Journées, les ingénieurs se sont vus remettre leur diplôme accompagné d'un bel ouvrage sur les *"Paysages ruraux – un perpétuel devenir"* [P. Cheverry et P. Clergeot – Editions Publi-Topex 2005] offert par l'OGE et remis par M. Alain GAUDET représentant M. Pierre BIBOLLET, Président du Conseil Supérieur de l'OGE. Pierre GRUSSENMEYER, vice-Président de l'AFT et professeur à l'INSA a également remis une plaquette et un numéro de la revue "XYZ" de l'Association Française de Topographie à chaque récipiendaire. Enfin, une petite attention particulière, remise par les professeurs au nom de la spécialité Topographie, a complété cette cérémonie. Cette année elle était couverte par une énigme à la *"Père FOURAS"* : *"Avec 'de' au milieu il pourrait s'agir d'une parcelle"*. Eminemment de circonstance, il fallait bien évidemment (!) ne pas en perdre la tête et y deviner une boussole (bout-de-sol !) flanquée aux armes de l'INSA.

Chaque nouvel ingénieur fraîchement diplômé a eu l'occasion d'adresser ses premières paroles au public très nombreux venu assister à cet événement. Le verre de l'amitié a conclu cette cérémonie au cours de laquelle un petit sondage avait révélé que près de 75% des nouveaux diplômés poursuivaient, ou commençaient leur activité au sein d'un cabinet de géomètres-experts.

Nous leur souhaitons une belle carrière professionnelle.

du "relevé et du traitement des nuages de points de moulages d'une gypsothèque" [19]. [Figure 8]

Les scanners existent avec différentes caractéristiques telles la portée, la vitesse, la précision et les nuages de points qui en découlent sont plus ou moins denses, bruités. On peut alors préconiser des filtrages permettant d'obtenir des modèles dont la qualité est "acceptable".

■ Géomètre-Expert

Avec la mise en application de nouvelles lois, de nouvelles normes dans le

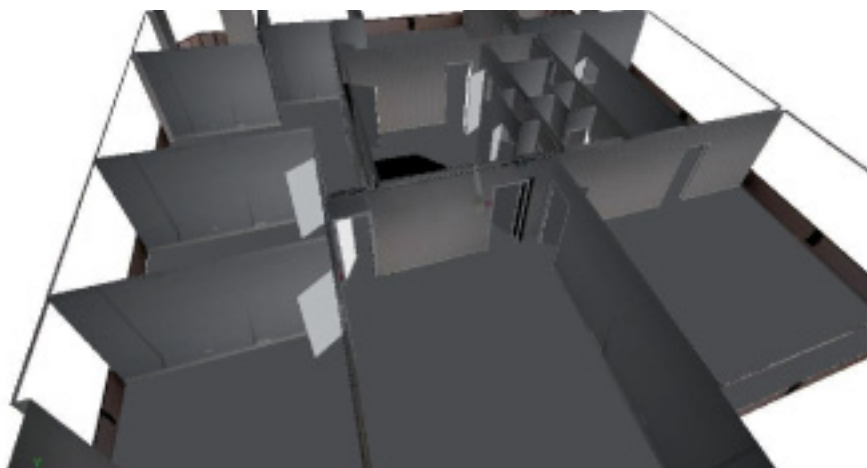


Figure 9 : Maquette 3D d'un niveau.

■■■ domaine foncier, les études de "mise à jour des plans d'alignements" et de "mise aux normes" [20] font partie des améliorations continues obligatoires et imposées pour les services de l'Etat. Mais, les cabinets de géomètres-experts comportent également des besoins forts dans le domaine de la gestion. L' "adaptation d'un progiciel de gestion intégré à un cabinet de géomètres-experts" [21] propose ainsi une ouverture vers les outils les plus modernes de localisation de chantiers. En effet, à partir d'un logiciel de gestion largement éprouvé, de nouveaux liens vers AURIGE, puis GoogleEarth ou GoogleMap sont proposés.

La recherche d'un gain de productivité sur le terrain étant l'un des objectifs principaux, la troisième dimension et sa représentation sous forme de photo-modèle faisant également partie des demandes croissantes des clients, un cabinet de géomètres-experts s'est donné les moyens pour mettre au point un outil alliant la "topométrie et la photographie" pour la "modélisation 3D d'intérieurs" [22]. [Figure 9]

Enfin, pour répondre à la Direction Générale des Impôts qui a mis au point un format d'échange de Documents d'Arpentages (D.A.) numériques, une "fonction de division parcellaire et d'export D.A. numériques" [23] a été incluse dans une solution logicielle.

Comme autre solution logicielle, pour les besoins des travaux routiers et les échanges de projets numériques, c'est le "format de données LandXML" [24] qui convient le mieux.

Comme nous pouvons le voir, ce point sur les projets de fin d'études montrent la grande diversité des applications dans le domaine de la topographie au sens large du terme, mais également les centres d'intérêts qui se confirment pour certains et qui sont en émergence pour d'autres. La qualité des mémoires présentés permet de les rendre diffusables auprès de toute personne intéressée sauf dans certains cas de confidentialité*. 1

(*) PFE classés confidentiels

Contact

Mathieu KOEHL

Maître de Conférences à l'INSA de Strasbourg - Coordonnateur de la Spécialité Topographie
mathieu.koehl@insa-strasbourg.fr

Bibliographie

[Joël JOSEPH] 1 - Etude et développement d'une application SIG basée sur Internet.

[François FOREAU] 2 - Etude de la mise en œuvre d'un Référentiel Foncier Unifié à l'aide d'un outil SIG extranet pour le géomètre-expert.

[Aurélien LECOMTE] 3 - Etude sur la réalisation d'un cadastre du sous-sol en trois dimensions.

[Jean Benoit DUFOR] 4 - Gestion et évolution du logiciel MITHRA-SIG en prenant en compte la norme 2002/49/CE.

[Nadège GRUAU] 5 - Mise en place d'un SIG 3D navigable consacré aux monuments historiques.

[Céline PIACENTILE] 6 - Réalisation de représentations bi- et tridimensionnelles interactives pour un Système d'Information Archéologique sur le Web.

[Clément BROSSARD] 7 - Redressement et mosaïquage : mise en place d'une chaîne de production et nouveau procédé.

[Jennifer EMILY] (*) 8 - Analyse des besoins en modèles 3D. Applications au sein de GeoPhenix.

[Delphine GUILLON] 9 - Développement d'une méthodologie de traitement GPS cinématique en mer pour les besoins de la géophysique.

[Maxime MOST] 10 - GNSS théorie et réalité. Apport actuel et futur des réseaux GLONASS et GALILEO en complément du réseau GPS.

[Jérémy VIENNE] 11 - Compensation d'un réseau gravimétrique mesuré par le Service de Géodésie et de Nivellement de l'Institut Géographique National.

[Antoine BILLAULT] 12 - Positionnement de puits déviés : Implémentation des corrections à envisager lors de la représentation des trajectoires de puits déviés en projection

cartographique ; Propositions et analyses de trois méthodologies possibles.

[Alban VUILLEMEY] (*) 13 - L'auscultation des structures sans prismes ni repères.

[Jérôme BAERT] 14 - Comparaison de trois systèmes de mesures : Tachéométrie, Lasergrammétrie, Photogrammétrie. Adaptation potentielle de ces méthodes au sein de la Division de topographie SNCF.

[Julien MACCAGNAN] 15 - Mise en place d'auscultations automatisées au sein de l'entreprise S.E.G.C. TOPO.

[Ingrid PEEL] 16 - Utilisation combinée de la photographie aérienne et de la lasergrammétrie dans la surveillance d'ouvrages en terre.

[Pierre JESSE] (*) 17 - Mise en œuvre de la lasergrammétrie au sein de la société SITES, étude de précision et recherche d'applications.

[Carine HONORE] (*) 18 - Etude relative aux méthodes de mise en œuvre et à la précision du scanner laser RIEGL LMS Z420i dans le cadre des travaux topographiques d'EDF.

[Cyril CALLEGARO] 19 - Relevé lasergrammétrique et traitement des nuages de points de moulages de la gypsothèque de l'Université Marc Bloch de Strasbourg.

[Céline RENEVRET] 20 - Mise à jour des plans d'alignement de la ville de Belfort & Mise aux normes réglementaires dans le domaine de la topographie.

[Sébastien CARME] 21 - Adaptation d'un progiciel de gestion intégré à un cabinet de Géomètres-Experts de moins de cinq salariés.

[Philippe GANTZER] 22 - Mise en place d'un outil de modélisation 3D d'intérieurs adaptable alliant méthodes topométrique et photographique au sein de la SELAS Legorgeu.

[Sylvain ROBART] 23 - Mise en place d'une fonction de division parcellaire et d'export de Document d'Arpentage numérique sous le logiciel GéoVisual de la société ATLOG.

[Zein RACHIDI] 24 - Etude et développement d'une interface logicielle sur le format de données LandXML.

Impact des évolutions technologiques actuelles sur les levers cadastraux

■ Michel KASSER

Les méthodes de levers topographiques ont énormément évolué depuis une décennie, d'une part avec la pleine disponibilité du GPS, d'autre part avec la capacité de production massive et à bon marché des orthophotographies. Ces méthodes entraînent avec elles des modèles d'erreurs totalement différents de ceux des méthodes classiques avec lesquelles tous les levers cadastraux ont été menés dans le passé. Les différents systèmes cadastraux ont été dimensionnés pour s'adapter à des spécifications variées, incluant évidemment les modèles d'erreurs acceptables, et la transition avec les nouvelles méthodes nécessite souvent une réflexion approfondie pour pouvoir en tirer le plein bénéfice. Le problème posé par les systèmes géodésiques de référence est donc devenu subitement très important, essentiellement parce que d'une référence à caractère relatif nous sommes parvenus à une référence désormais absolue. Diverses conséquences de cette importante évolution sont évaluées ici en ce qui concerne les activités cadastrales, en particulier en suivant les développements récents en France.

■ mots-clés

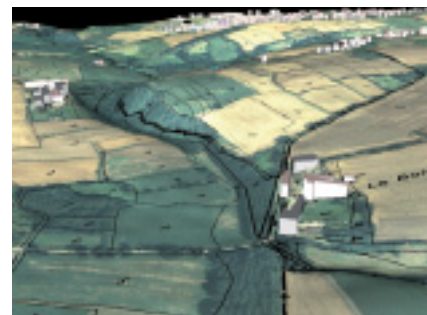
Cadastre, levers cadastraux, système géodésique, RGF 93, BD parcellaire

Un regard rapide sur les rapports entre le Cadastre et l'information géographique

Il est toujours utile de le rappeler : en France, comme dans tous les pays bien administrés, la "paix foncière" est la principale base de la paix civile, et lorsque l'activité cadastrale fonctionne bien, peu de citoyens sont conscients de son importance dans les fondements de nos sociétés. Mais qu'on jette un œil sur des pays sortant de longues guerres civiles, maintenant ou il y a longtemps : on trouve presque toujours une nouvelle définition de la propriété et de l'exploitation des terres parmi les réformes jugées prioritaires. On désigne par "cadastre", en termes grand public, un ensemble très complexe et peu connu de réglementations, qui permettent à chacun de savoir exactement où commencent et où s'arrêtent ses droits, lui permettant en retour de se projeter dans l'avenir et d'investir en toute connaissance de cause. Les différentes sociétés ont créé des corpus réglementaires assez différents, selon leurs cultures, leurs traditions,

leurs religions... et les "cadastres" qui en découlent sont donc des compromis entre les attentes régaliennes de l'Etat et les usages, ceux-ci étant presque toujours prééminents dans les choix finaux. La France a ainsi hérité d'un système foncier avec un cadastre non pas juridique mais orienté vers une bonne justice fiscale, et un ensemble de textes permettant une remarquable optimisation de l'exploitation agricole. Le terme "cadastre" lui-même est assez délicat à traduire dans d'autres langues du fait de la diversité des systèmes cadastraux : par exemple le terme "cadaster" en anglais a une très forte connotation de lever à très grande échelle, au sens technique du terme, ce qui n'est pas le cas en France. Et le métier de géomètre privé est lui-même très largement dimensionné par le système cadastral de chaque pays, ce qui rend aussi les comparaisons internationales assez difficiles pour ces activités.

L'un des outils du Cadastre est le plan cadastral. Ce plan à très grande échelle, donc très détaillé, a nécessité dans chaque pays des travaux très impor-



tants. Mais quelle que soit l'organisation nationale en la matière, ce plan a toujours été aussi utilisé comme outil de gestion par les collectivités locales, allant très au-delà de la fonction première d'établissement de l'impôt, voire de définition officielle des contours des parcelles selon les pays. Bien évidemment, ce plan n'a pas été conçu en fonction de cet usage dont l'importance n'a beaucoup progressé que récemment (en France, depuis deux décennies environ), et il manque parfois des éléments importants pour un gestionnaire (en France, le plan cadastral ne lève pas le domaine public, ne comporte pas d'altimétrie, etc.), mais il rend déjà ainsi d'immenses services.

■ ■ ■

■ ■ ■ La prise en compte officielle par l'État de l'importance capitale de cet emploi du plan cadastral est très variable selon les pays. En France, malgré les efforts de la communauté technique nationale, il a fallu attendre l'an 2000 pour atteindre cette reconnaissance, alors que d'autres administrations étrangères avaient déjà reçu cette extension de mission depuis plusieurs décennies. La France, pourtant pionnière en matière cadastrale, a donc agi avec une sage lenteur en la matière, mais se trouvant devant la situation de deux grandes administrations compétentes en matière d'information géographique (la DGI et l'IGN) mais totalement différentes, elle a reculé devant les obstacles sociaux d'une unification, et elle a opté pour des activités séparées mais coordonnées, au contraire de la Suède ou du Royaume-Uni par exemple.

Le plan cadastral, comme évoqué ci-dessus, n'est que l'un des outils du Cadastre : et selon l'état d'avancement d'un cadastre national, certaines phases du travail peuvent s'avérer bien plus importantes et coûteuses que l'établissement du seul plan. Le plan exige un travail purement technique, et les techniques disponibles ont énormément progressé dans les dernières décennies. Il s'avère donc assez peu complexe de mener des levés à très grande échelle, sur des régions entières au besoin (peu complexe à spécifier mais encore très coûteux à produire, bien évidemment), les levés portant sur tous les objets apparents. Le problème majeur pour les cadastres en cours d'édification est généralement plutôt l'enquête foncière qui doit être menée afin de s'assurer que les droits en cours d'enregistrement ne donnent pas lieu à des contestations. Entre l'enquête de terrain, puis la décision d'attribution (parfois par un véritable tribunal foncier¹), on se trouve confronté à un travail énorme, et si les lois ont été écrites sans trop se soucier de la dépense, on se trouve parfois devant des coûts d'exécution difficilement surmontables, ce qui conduit à des temps

d'exécution réhilitaires (un ou plusieurs siècles à la vitesse actuelle dans certains pays). L'extension récente de la panoplie des outils techniques disponibles ne conduit donc pas aux mêmes optimisations dans des pays cadastrés depuis longtemps (p. ex. l'Europe occidentale), ou dans des pays en cours de cadastration, qui sont fort nombreux actuellement. Pour ceux-ci, tout ce qui facilite l'enquête parcellaire est essentiel, et à cet égard la récente généralisation de l'emploi des orthophotographies a représenté une avancée technique fondamentale.

Mentionnons enfin, pour les collectivités locales, l'importance nouvelle accordée aux données sous forme numérique, bien plus faciles à manipuler que les plans papier classiques compte tenu des performances de la micro-informatique moderne. Ceci a néanmoins conduit à des contraintes nouvelles sur les données géographiques, qui par un hasard heureux (mais tout à fait indépendant) se sont trouvées compatibles avec les nouveaux outils techniques disponibles, comme le GPS précis par exemple.

Parmi ces contraintes, on peut citer :

- le besoin d'une référence géodésique unique, très précise et très facile d'accès, afin que tous les partenaires professionnels fournissent des données qui soient toutes dans cette même référence. C'est ce qui permet ensuite à toutes les "couches" d'informations géographiques diverses de pouvoir être "empilées" aisément dans un même SIG, afin de tirer le meilleur parti des informations fournies par des acteurs différents.
- le besoin de disposer des données sous une forme parfaitement continue (pas de hiatus entre des "feuilles" différentes). Ce besoin était sans intérêt à l'époque du plan papier, avec des levés caractérisés essentiellement par leur consistance interne, et les discontinuités au passage d'une feuille à une autre ne posaient alors guère de problème pratique pour les usagers. Mais dans une logique informatique, il en est tout autrement, puisque à partir du moment où on gère les données avec comme "clé" leurs seules

coordonnées, on ne sait plus traiter des lacunes ou des recouvrements entre deux feuilles contiguës.

On note, ici comme partout, que la rançon d'une gestion de données géographiques sous forme informatique et donc beaucoup plus facile, c'est une complication nouvelle dans le formatage de ces mêmes données, dont le modèle d'erreur se doit d'être complètement différent. Donc il y a bien plus de travail à faire en amont chez le fournisseur de données, mais en contrepartie le nombre d'utilisateurs peut croître de façon très importante, sans avoir le besoin particulier de compétences très poussées comme par le passé. Le prix à payer pour la démocratisation de l'information géographique est donc là, mais par chance le contexte technique a évolué de façon très favorable, et ce prix n'est pas très élevé.

Ces nouveaux besoins évoqués ci-dessus ont ainsi nécessité des quantités d'actions nouvelles, que nous allons analyser dans le cas précis de la France. Mais ce cas particulier est assez représentatif de celui de nombreux autres pays, dont les pays occidentaux.

Le Cadastre et la modernisation des références géodésiques

Comme nous l'avons vu, la modernisation des références géodésiques est un élément essentiel pour que l'information géographique fournie par un acteur soit facile d'emploi et surtout immédiatement compatible avec celle fournie par toutes sortes d'autres acteurs : c'est une condition nécessaire pour que toute la plus-value disponible dans les travaux de fournisseurs différents puisse être dégagée facilement par un usager quelconque : c'est pratiquement une condition sine qua non pour que des SIG puissent être employés dans de bonnes conditions. Examinons donc tout d'abord la nature des références employées dans les levés anciens, et la différence avec la référence géodésique actuelle.

La référence géodésique ancienne était le résultat de longues opérations de

(1) Par exemple, en Tunisie, il faut réunir six juges fonciers pour statuer sur l'attribution d'une seule parcelle...

mesures terrestres (triangulation), caractérisées uniquement par une précision locale, typiquement de 1 cm/km. L'enchaînement de décennies de mesures locales successives a permis de couvrir la France en un siècle, en fournissant des coordonnées cohérentes au niveau local sur des repères variés (points naturels ou bornes). Mais ces coordonnées, considérées par rapport à la référence mondiale actuelle (l'ITRF, dont la cohérence est de l'ordre de 1 cm !), présentaient des erreurs atteignant plusieurs mètres en périphérie du pays. Ceci d'ailleurs ne gênait personne, puisque les professionnels n'effectuaient que des mesures à caractère local. De sorte que si nous prenons une planche cadastrale quelconque en France, et que nous faisons des mesures GPS très précises par rapport à la référence mondiale ITRF sur quelques points caractéristiques de la feuille, nous trouverons que les coordonnées sont à corriger des mêmes valeurs sur l'ensemble des points, mais que ces corrections seront assez différentes (typiquement de l'ordre de 1 mètre) dans une feuille située à 100 km de là.

Ce type de coordonnées anciennes n'était déjà pas d'un usage très commode avec les méthodes classiques et exigeait de bonnes compétences techniques. Mais il est paradoxalement devenu encore un peu plus difficile d'emploi avec les mesures GPS de topographie (qui sont toujours différentielles), puisque désormais le point servant de référence peut être localisé n'importe où, y compris à de grandes distances, là où les erreurs du réseau sont très différentes de celles de la zone de travail. C'est pour cette raison que les systèmes géodésiques nationaux anciens ont progressivement été tous remplacés par une référence géodésique considérablement plus précise, qui peut assez largement être considérée comme une référence absolue à la surface de la Terre. La référence mondiale ITRF², entretenue par l'IGN (laboratoire



Figure 1. Vue d'artiste de la constellation de satellites européens Galileo, système de positionnement spatial de nouvelle génération qui, aux côtés des anciens GPS américain et Glonass russe, offrira vers 2010 des capacités de localisation particulièrement appréciables en zones urbaines.

LAREG³) par délégation de nombreux laboratoires géodésiques issus du monde entier, est obtenue par synthèses de mesures issues de 4 méthodes différentes (radioastronomie interférométrique VLBI, télémétrie laser sur satellites, GPS, DORIS⁴). Ceci permet de doter de coordonnées homogènes (ainsi que des vitesses de variation de ces coordonnées dues aux mouvements tectoniques) au niveau de précision de 1 cm, plusieurs centaines de points très bien définis. On extrait ensuite de l'ITRF des sous-ensembles de points ayant les mêmes vitesses (même plaque tectonique), ce qui permet de produire une référence géodésique invariable (coordonnées fixes) pour tous les points d'un même continent, par soustraction générale de la vitesse de ladite plaque tectonique. Pour l'Europe, on a ainsi défini le système EUREF, avec laquelle la référence géodésique française est directement compatible au niveau du centimètre : le RGF93, rendu obligatoire au début 2001 en France.

Il faut d'ailleurs bien préciser que l'accès à cette nouvelle référence officielle

a été rendu extrêmement facile :

- Les stations GPS permanentes, dont l'IGN anime l'un des sous-ensembles (le RGP⁵), et dont l'Ordre des Géomètres-Experts pilote depuis peu un vaste réseau temps réel (réseau Teria), fournissent directement des coordonnées dans la référence RGF93 officielle.
- La plupart des anciens repères de géodésie (80 000) et de nivellement (400 000) font l'objet d'un contrôle de présence sur le terrain, la base de données géodésiques de l'IGN est ainsi mise à jour régulièrement, et elle est consultable gratuitement sur Internet : ceci encourage évidemment les usagers à l'interroger pour chaque nouvelle opération, et bien évidemment les coordonnées diffusées sont fournies dans la référence RGF93.
- Le site Internet de l'IGN (www.ign.fr) fournit en outre de nombreuses explications techniques et un logiciel gratuit téléchargeable (Circé 2000) permettant la conversion de coordonnées.

Le point important dans cette révolution technique est donc lié à l'emploi de méthodes de positionnement spatial, GPS jusqu'ici et Galileo en plus dans quelques années (figure 1), pas tellement parce qu'elles ont rendu certaines phases du travail beaucoup moins onéreuses, mais surtout parce qu'elles ont

(2) ITRF = International Terrestrial Reference Frame

(3) LAREG = Laboratoire de Recherches en Géodésie

(4) Système mis en place par le CNES et l'IGN pour mesurer des orbites très précises de satellites, et qui forme un réseau mondial de stations au sol de très grande précision.

(5) RGP = Réseau GPS Permanent, une cinquantaine de stations GPS permanentes opérées par l'IGN et par divers partenaires (collectivités locales, chercheurs, météorologues, ...)

rendu obligatoire de s'adapter à des modèles d'erreurs complètement différents : erreurs locales proportionnelles aux distances autrefois, erreurs absolues maintenant.

Il a bien entendu fallu transposer cette nouvelle donne dans les textes réglementaires spécifiant les précisions des levés, l'arrêté de janvier 1980 dans le domaine étant devenu obsolète. Le nouvel arrêté qui le remplace a été pris en septembre 2003, il fait une nette distinction entre les erreurs locales (erreurs internes à un réseau, rattaché ou pas à la référence officielle) et les erreurs absolues (erreur totale sur des coordonnées fournies, incluant les erreurs internes et les erreurs de rattachement).

Ceci dit, si GPS a servi de précurseur en la matière, il est clairement apparu qu'il ne remplacerait pas l'ensemble des méthodes de topométrie terrestre, qui elles aussi avaient beaucoup progressé. Jusqu'ici par exemple, le GPS n'est pas fonctionnel de façon sûre dans des environnements urbains, les bâtiments cachant une grande partie du ciel et empêchant la réception d'une partie des signaux. La nécessité d'être en visibilité directe de 4 satellites au minimum n'est pas toujours remplie. En outre il est très imprudent de mesurer avec seulement 4 satellites, car cela ne permet pas de détecter les fautes liées aux réflexions parasites des ondes sur diverses surfaces voisines (bâtiments, sol...). De ce point de vue, les topographes attendent avec intérêt le lancement du système européen Galileo, qui sera utilisable simultanément avec GPS vers 2008-2009, ce qui doublera le nombre de satellites utilisables en un lieu donné. Par ailleurs, la remise à niveau du système russe Glonass, lancé en même temps que GPS mais très incomplet faute d'entretien, est de plus en plus une hypothèse réaliste, ce qui conduira ainsi à tripler le nombre de satellites disponibles dans quelques années par rapport à maintenant. Ceci rendra beaucoup plus rares les zones de travail où la réception ne sera pas satisfaisante, et facilitera encore un peu plus le travail des géomètres.

On peut ainsi, après ces grandes vagues récentes de modernisations

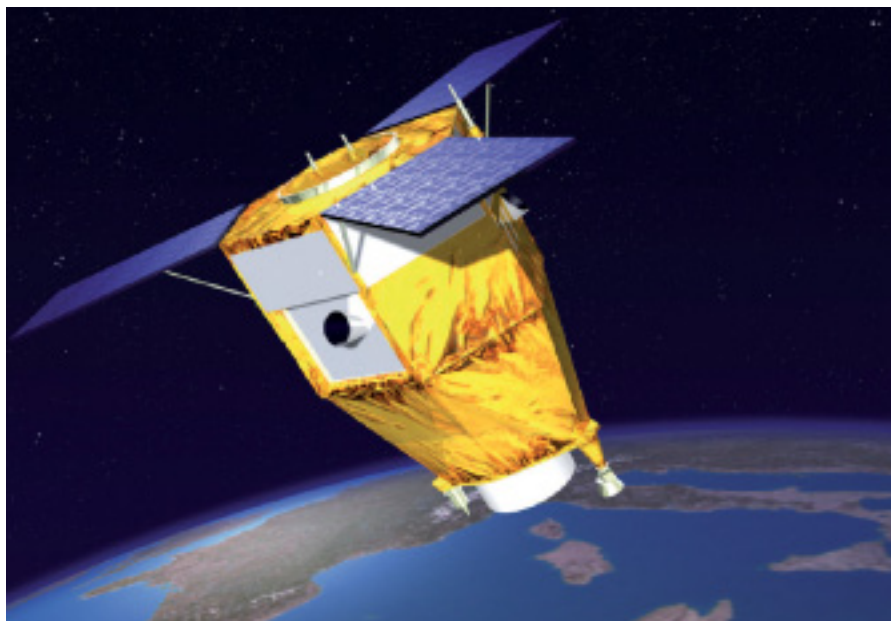


Figure 2. Les futurs satellites Pléiades, qui seront lancés par le CNES en 2009, auront une capacité d'acquisition d'image à pixel de très haute résolution qui en fera un complément, voire dans certains cas un substitut, de la prise de vue aérienne classique.

techniques qui ont entraîné une complète réorganisation réglementaire, voir venir une période où les bouleversements techniques seront moindres, et où les évolutions resteront du domaine de l'ergonomie et de la facilité du travail. L'outillage du topographe va sans doute se stabiliser autour de la combinaison GPS + Glonass + Galileo (avec réception de données de stations permanentes) avec un tachéomètre (avec ou sans pointé automatique), ainsi qu'un puissant système de gestion des données sur le terrain, le tout pouvant être intégré dans un seul instrument.

La nouvelle importance de l'imagerie aérienne ou spatiale en matière cadastrale

L'orthophotographie est une photographie (en général aérienne), qui a été déformée par calcul afin d'être en tout point superposable à une carte, donc avec une échelle parfaitement contrôlée. Les images voisines ainsi déformées sont ensuite assemblées en une image unique, qui peut couvrir une région ou un pays entiers. La généralisation de l'emploi de ce produit est liée

à une amélioration considérable de la facilité de fabrication depuis les années 90, et cette production est actuellement très largement automatisée.

L'orthophotographie combine en fait les intérêts de deux produits différents :
– L'image aérienne, qui est un document particulièrement facile à employer par tout le monde, sans besoin de formation spécifique : chacun y reconnaît les terrains qui lui sont familiers, chemins, maisons, mobiliers urbains, détails de la végétation, etc.

– La carte, sur laquelle les techniciens savent faire des mesures, mais qui exige entraînement et capacité d'abstraction pour en tirer pleinement parti, ce qui ne la rend pas accessible à grand monde.

On a donc assisté dans les dernières années à la création d'orthophotographies sur des pays entiers : par exemple en France, début 2004 était disponible la BD Ortho sur tout le pays avec un pixel de 50 cm, et un cycle d'entretien de 5 ans.

En matière cadastrale, l'orthophotographie a été particulièrement utile pour les travaux nouveaux, dans des pays en train de créer ou de moderniser leur cadastre : les coordonnées de chaque

point de l'image étant parfaitement compatibles avec les mesures faites sur le terrain par GPS par exemple, le volet lever topographique des enquêtes parcellaires devient extrêmement facile à traiter. Mais elle s'est également trouvée très utile pour l'intégration de planches cadastrales anciennes, avec des référentiels pas toujours très cohérents, dans une base de données moderne. A titre d'exemple, on pourra citer des travaux menés au Liban pour ré-employer des leviers cadastraux menés plus d'un demi-siècle auparavant, et les intégrer dans une référence moderne unique. On pourra d'ailleurs aussi bien citer le cas de la France, où la BD Ortho sert à faciliter l'assemblage des planches cadastrales traditionnelles et à traiter des problèmes de jonction entre feuilles voisines.

Enfin il faut bien noter que de plus en plus, les images du sol ne seront pas fournies par les seuls avions, puisque au fil des ans une offre spatiale en images à pixels petits (50 cm à 80 cm) se fait jour progressivement (figure 2). Ces images offrant de plus une dynamique excellente, comparable aux images aériennes obtenues par les toutes nouvelles caméras numériques, et peuvent très bien être employées pour des orthophotographies de type BD Ortho, pour autant que leur coût d'accès soit concurrentiel. Ce n'est qu'un complément de moyens dans un pays bien équipé comme la France, mais ceci pourra devenir le moyen nominal dans quelques années pour des pays commençant seulement leur cadastre ou leur entretien à partir d'orthophotographies. Et puis il convient de bien évaluer l'impact futur des nouveaux outils Internet permettant de diffuser des données géographiques en ligne pour le grand public, parmi lesquelles le rôle de l'imagerie est absolument essentiel : en 2005 ont été lancés plusieurs sites comme GoogleEarth, ou WorldWind de la NASA, en 2006 c'est le tour du Géoportail français de service public opéré par l'IGN. Ces sites qui permettent à chacun un accès direct à l'image spatiale ou aérienne sont en train de bouleverser durablement la relation entre les citoyens et l'image détaillée du terrain.

Conclusions

Nous avons assisté depuis quelques décennies à une entrée progressive des outils spatiaux dans deux domaines de l'information géographique : le positionnement et l'imagerie. La révolution due au positionnement spatial est d'ailleurs en partie derrière nous, au contraire de l'imagerie à haute résolution qui n'a pas encore eu d'impact significatif. Dans ces deux cas, ces outils sont sur la première ligne des moyens utilisables pour les enquêtes et les leviers cadastraux. Par ailleurs certaines facilités apportées par l'informatique ont certes permis de démocratiser l'accès à l'information géographique mais, en contrepartie, des exigences complètement nouvelles ont dû être prises en compte, ce qui a obligé les fournisseurs de données à beaucoup de travaux supplémentaires. Au total, on assiste donc à une activité dont l'impact économique ne cesse de croître.

Mais au-delà des moyens techniques nouveaux, c'est surtout de l'apparition de nouveaux "modes de pensée technique" que nous devons être conscients : données continues, ayant une position absolue bien spécifiée, avec des méta-données bien renseignées. L'impact en matière cadastrale est majeur, parce que le rôle de gardien de la paix foncière du Cadastre est désormais obligé de composer avec le rôle de pourvoyeur de données géographiques à très grande échelle, rôle pour lequel il n'a généralement jamais été conçu à l'origine. Nous vivons donc un moment de transition technique particulièrement intéressante ! 1

Bibliographie

Quelques articles de l'auteur pour compléter le propos :
Les stations GPS permanentes en France. Fiche technique du CNIG n° 49.
Les systèmes RGF 93 et Lambert 93. Fiche technique du CNIG n° 50.
Les caméras numériques aéroportées. Géomètre n° 11, Novembre 2001.
Les nouvelles bases géodésiques françaises. Mensuration, Photogrammétrie, Génie rural, 1/2002.
Avec le RGF93, les éléments d'un bornage virtuel sont réunis. Géomètre n° 5, Mai 2002.

L'orthophotographie institutionnelle. Géomètre n° 11, Décembre 2002.

Les nouveaux textes français en matière de précision des leviers. XYZ, n° 96, 3^e trimestre 2003.

L'IGN, service public, sait aussi être gratuit. Géomètre n° 12, Décembre 2003.

Les résultats... Rien que des résultats. L'arrêté du 16 septembre commenté.

La circulaire de mise en œuvre. Géomètre n° 12, Décembre 2003.

La géodésie française est l'affaire de tous. Géomatique Expert, n° 35, mai-juin 2004.

La géodésie française et mondiale : une évolution considérable en 25 ans. XYZ, n° 100, 3^e trimestre 2004.

Article publié avec l'aimable autorisation du Comité pour l'Histoire économique et financière de la France.

Il constitue un des actes du colloque organisé par le Comité en 2005 :

"De l'estime au Cadastre en Europe : les systèmes cadastraux aux XIX^e et XX^e siècles", à paraître prochainement.

ABSTRACT

The methods of topographic surveys evolved a lot in the last decades, on the one hand with the full availability of the GPS, on the other hand with the capacity of massive and cheap production of orthophotographies. These methods imply new error models, completely different from previous classic ones. The different cadastral systems have been adapted to varied constraints, obviously including the models of acceptable errors, and the transition with new methods often requires deep reflections. The problem put by the geodesic reference is now very important, essentially because we arrived to a quasi absolute ultra precise reference, from a purely relative one. Various consequences of that important evolution are valued here in what concerns the cadastral activities, in particular following the recent developments in France.

Les modalités de constitution du cadastre napoléonien

■ Pierre CLERGEOT

Conférence donnée à l'occasion de la manifestation organisée par la Direction générale des Impôts au Sénat, le vendredi 9 novembre 2007, sous le haut patronage de M. Eric Woerth, Ministre du Budget, des comptes publics et de la fonction publique, point d'orgue de la célébration du bicentenaire du Cadastre.

De 1780 à 1807, la France est devenue un véritable laboratoire de recherche cadastrale tant au niveau de l'arpentage que de l'expertise ou de l'évaluation. Ces recherches répondaient au besoin exprimé par la Nation d'établir un nouvel impôt qui soit juste et équitable. Le cadastre napoléonien, appelé également cadastre de 1807 ou ancien cadastre, peut être considéré comme une forme d'aboutissement de ces travaux mais il ne doit pas être appréhendé comme étant un produit entièrement fini. Les transformations qu'il va connaître, en particulier dans le domaine des plans, entre 1807 et 1810 et au-delà nous le rappellent. Un système cadastral pour être fonctionnel doit évoluer avec les besoins de la société au sein de laquelle il est né. Le cadastre napoléonien en est un bon exemple.

Deux mois après le vote de la loi du 15 septembre 1807, Gaudin, ministre des Finances, réunit à Paris du 7 au 17 novembre une commission présidée par Delambre pour étudier le mode d'exécution du cadastre parcellaire qui devait couvrir l'ensemble du territoire français.

Les hommes qui composent cette commission connaissent très bien les problèmes cadastraux. On y trouve d'abord Delambre, membre de l'Institut, qui suit depuis 1792, date de son admission à l'Académie des sciences, les problèmes soulevés par l'établissement des plans cadastraux en particulier ceux qui sont de nature géodésique.

Il travaille d'abord avec de Prony, Directeur du bureau du cadastre de 1791 à 1801. Puis avec Gaudin dont il est, à plusieurs reprises, le conseiller scientifique.

Il y a aussi Hennet, commissaire du cadastre depuis 1802 et Oyon, chef du bureau du cadastre. Mais également Laprade qui a participé avant la Révolution à l'établissement de cadastres parcellaires en Haute Guyenne en suivant les recommandations de Richeprey, qui lui-même, quelques

années auparavant, avait étudié le cadastre piémontais.

En fait nous retrouvons dans cette commission une partie des cadres de la jeune administration des contributions directes avec qui Gaudin a l'habitude de travailler.

La commission va répondre à de nombreuses questions qui vont donner lieu à des échanges fructueux et parfois animés car les positions sont souvent divergentes voire opposées. Tous sont unanimes pour dire qu'un cadastre parcellaire est faisable. Mais pour y arriver les avis diffèrent :

- Il y a Delambre qui d'un point de vue scientifique considère qu'il faut partir de la grande triangulation pour arriver au plan des communes puis des sections, puis des parcelles. C'est le seul moyen de procéder si l'on veut établir entre les communes une solution de continuité. Mais Delambre reconnaît que c'est une solution coûteuse dont on peut, peut-être, se passer pour un cadastre établi pour mieux répartir l'impôt.
- Il y a la position de Laprade qui considère qu'il faut lever chaque section comme une commune et que si les sections sont levées avec soin, le raccordement sera aussi exact que le plan général de la commune.
- Il y a une 3^e solution intermédiaire présentée par Hautier, professeur de géométrie, qui consiste à faire d'abord une triangulation calculée de la commune, à lever le périmètre de cette commune, celui des sections, à lever en outre les chemins et ruisseaux, etc.

Les délibérations de cette commission donnent naissance à la rédaction d'une Instruction sur la mise en place du cadastre parcellaire (1^{er} décembre 1807) puis à un rapport établi par le Ministre qui l'adresse à l'Empereur le 27 janvier 1808.

Mais comme vous pouvez le deviner pour avoir entendu son nom à plusieurs reprises, l'homme "clé" de la situation, c'est Gaudin, le ministre des Finances. Né en 1756, il appartient à l'administration des finances de l'ancien régime puis devient en 1789 membre du comité des finances de l'Assemblée constituante où il s'occupe de la répartition de l'impôt entre les départements. Il accepte le poste de ministre des Finances après le coup d'état de 18 Brumaire an VIII (1789) et le garde jusqu'en 1814 et pendant les Cent jours. Napoléon dans ses propos d'exil dit de lui : *"tout ce qu'il fit et proposa dans ses premiers moments, il l'a maintenu et perfectionné pendant quinze années d'une sage administration."*

Gaudin est le véritable père du cadastre napoléonien. Dès 1802, il comprend que le cadastre ne peut être que général et

parcellaire. Mais soucieux des finances publiques et respectueux des décisions prises par le Gouvernement, le Conseil d'État et l'Empereur, il sait attendre tout en mettant progressivement en œuvre les opérations qui vont conduire à la loi du 15 septembre 1807 et à la nécessité d'avoir recours au parcellaire par arpentage pour l'ensemble des communes. Ainsi, dès la fin de l'année 1805, il fait réaliser des expertises parcellaires sur des plans par masse de culture. Les résultats obtenus sont encourageants et prouvent que seul un cadastre parcellaire permet d'établir une véritable justice fiscale entre propriétaires. Il établit également que le parcellaire par arpentage avec la présence des propriétaires sur le terrain est de loin préférable au parcellaire déclaratif qui ne permet pas de faire concorder les surfaces mesurées et les surfaces déclarées.

En mars 1807, Hennet informe les directeurs départementaux des contributions directes de deux changements importants voulus par le ministre :

- Le premier consiste à séparer les propriétés bâties des autres biens-fonds : ... *"Les bâtiments ne peuvent participer à un des principaux avantages du cadastre, celui d'un allivrement fixe et immuable..."*
- Le second porte sur la communication à donner au contribuable et Hénnet conclut en mars 1807 : *"vous verrez bientôt, Messieurs, du moins je l'espère, le cadastre recevoir ses derniers développements et sa législation définitivement complétée. Vous verrez toutes les mesures partielles prises jusqu'ici se rattacher et former un ensemble important."*

Nous retrouvons là les éléments les plus importants de la loi du 15 septembre 1807. Elle vient donc renforcer les mesures prises six mois plus tôt par Gaudin et qui sont déjà en partie mises en œuvre par son administration. Mais dans cette loi rien n'est dit sur le parcellaire ni la cadastration générale. D'ailleurs Gaudin ne la mentionne pas dans son introduction du Recueil méthodique de 1811. Par contre cette loi assoit l'autorité de l'État et les compétences de l'administration en soustrayant aux maires et aux municipalités communales ce que la Constituante leur avait accordé, c'est-à-dire la capacité à répartir la contribution foncière entre les citoyens au sein d'une commune. Ainsi, nous comprenons mieux la discrétion du Ministre.

En janvier 1808, Gaudin est très confiant dans l'avenir. La loi du 15 septembre 1807 permet à l'administration des contributions directes d'agir en toute liberté ; les expériences passées et les travaux de la commission Delambre de novembre 1807 autorisent le ministre des Finances à s'appuyer sur des arguments solides pour convaincre l'Empereur du bien-fondé d'un cadastre parcellaire étendu à l'ensemble des communes de l'Empire.

Le cadastre sera un élément de justice fiscale et de paix sociale. Il fera diminuer les innombrables conflits portant sur les limites des propriétés.

Par ailleurs l'état des finances de la France est bon. L'après Tilsitt laisse espérer une période de paix et donc de prospérité. Dans le rapport adressé à l'Empereur, le 27 janvier 1808, Gaudin lui propose que les communes n'aient plus à leur charge l'arpentage parcellaire : *"La dépense en sera acquittée*



A l'occasion des manifestations de célébration du bicentenaire du cadastre napoléonien, découvrez l'ouvrage réalisé par Pierre Clergeot et Publi Topex, en partenariat avec la Direction générale des impôts et l'Ordre des géomètres-experts. Très illustré, ce livre est consacré aux débats et travaux (aux XVIII^e et XIX^e siècles) qui ont conduit à la création du cadastre napoléonien.

► **Edition Publi Topex 124 pages, 30 €
ISBN 2-9519379-5-4**

par une imposition additionnelle à la contribution foncière de tous les départements, le trésor public continuant de se charger des frais de l'expertise et de ceux de la confection des matrices cadastrales". Après six ans de fonctionnement et 16 000 plans réalisés, le cadastre par masse de culture est alors abandonné. Gaudin est persuadé que la réalisation des cadastres parcellaires se fera rapidement et qu'en 1815 la couverture cadastrale de l'Empire sera réalisée. Il invite les directeurs départementaux des contributions à lui fournir rapidement la liste des communes à cadastrer et à inciter les maires à aller vers le parcellaire.

"l'État, écrit-il, a prévu suffisamment d'argent pour couvrir tous les besoins de 1808".

La seule contrainte semble être celle du personnel qualifié disponible même si l'arrêt des cadastres par masses de culture libère des géomètres.

Le ministre est par ailleurs assuré que l'expertise et l'évaluation se feront beaucoup plus rapidement que par le passé et demanderont, par commune, deux à trois mois après la fin de l'arpentage parcellaire.

Mais l'embellie sera de courte durée. Le début de la guerre d'Espagne restreint les budgets cadastraux et quelques mois plus tard Gaudin n'est plus en mesure de satisfaire les besoins qu'il a lui-même suscités. Il demande à ses directeurs départementaux des contributions directes de tout faire pour garder le personnel géomètre qui avait été formé pour lever les plans par masse de culture. En effet depuis leur interruption, les hommes de l'Art se trouvent au chômage et Gaudin craint une hémorragie de ces derniers, ce qui condamnerait son projet

■ ■ ■ d'arpentage parcellaire. Il se souvient des difficultés de 1802 et des problèmes posés par l'absence de bons géomètres.

Finalement la situation va se stabiliser. Le nombre annuel d'opérations cadastrales sera inférieur à ce qui était prévu et l'objectif de tout terminer pour 1815 sera définitivement abandonné.

Par ailleurs Gaudin s'aperçoit que l'expertise et l'évaluation continuent à poser des problèmes qui se révèlent être souvent plus importants que ceux, techniques, liés à l'arpentage. Mais le mot d'ordre reste l'économie. Économie sur le papier et sur son format... Économie sur le nombre de parcelles : les géomètres sont payés à la parcelle. Il faut donc veiller à ce qu'ils ne forment pas trop de parcelles... Économie sur les tableaux d'assemblage : quand les plans par masse de culture le permettent, ils peuvent être repris pour former les tableaux d'assemblage des cadastres parcellaires... La rupture avec la période antérieure est moins nette que prévu.

Malgré tout, les années 1808 et 1809 sont riches en expériences de toutes sortes mais le besoin d'une harmonisation étendue à l'ensemble de l'Empire se fait de plus en plus sentir aussi bien au niveau de l'évaluation, de l'expertise que de l'arpentage et du dessin des plans. Or beaucoup de directeurs des contributions sont restés dans la logique de la période expérimentale des années 1805-1807. Pour le ministre, cette attitude risque de retarder l'avancée de la production. Il décide d'y mettre fin en promouvant la nécessité d'un travail rapide et de qualité. C'est ce qu'il exprime dans une lettre adressée aux préfets, datée du 24 mai 1810 et dont je vous cite un passage : *"Je renouvelle ici à tous les agents de la direction et du cadastre la défense la plus expresse de faire imprimer aucuns rapports, mémoires, discours, compte-rendu ou projets sans avoir obtenu de moi l'autorisation spéciale... Il ne faut plus que des idées de perfection seulement spéculative viennent embarrasser et ralentir la marche d'une opération qui, malgré les imperfections dont il n'est pas donné aux hommes d'affranchir entièrement tout ce qui sort de leurs mains, apportera du moins une amélioration incontestable dans la répartition de l'impôt et mettra un terme aux injustices particulières que l'ignorance ou la passion pourraient multiplier à leur gré, sans que le gouvernement eut aucun moyen d'y apporter remède."*

Le ton du ministre des finances n'est plus celui du dialogue ni de la réflexion, ni des conseils et des encouragements, comme cela a pu être le cas auparavant. Les règles sont désormais fixées. Il n'y a plus de place pour l'expérimentation. L'administration du cadastre doit agir, produire et devenir exemplaire. Cette attitude ferme aura des résultats positifs. En contrepartie, l'administration cadastrale perdra une certaine capacité d'écoute, d'innovation et d'adaptation. Mais cette volonté serait restée lettre morte si Gaudin n'avait pas doté son administration d'un véritable code cadastral.

Depuis 1804, le chef du bureau du Cadastre, Oyon, avait réuni dans une collection en cinq volumes toutes les instructions sur le cadastre. Gaudin confie alors aux 12 inspecteurs généraux du cadastre de refondre en un seul volume et dans un ordre méthodique les instructions contenues dans la collection

d'Oyon en faisant disparaître tout ce qui concernait uniquement les cadastres par masse de culture. Le travail demandé par Gaudin fut publié en 1811 sous le nom de Recueil méthodique des lois, décrets, réglemens, instructions et décisions sur le cadastre de la France. Il se présente sous la forme de deux volumes : le premier est constitué de textes (1 144 articles) et le second, intitulé "Modèles", illustre le précédent.

Beaucoup d'articles, en particulier ceux concernant l'expertise et l'évaluation, sont antérieurs à 1806. Pour l'arpentage, la situation est inverse. Le Recueil Méthodique s'est enrichi au fil des années de textes réglementaires nouveaux. Il a été utilisé pendant tout le XIX^e siècle et l'est encore parfois aujourd'hui. Il a fait l'objet de nombreuses publications sous forme d'extraits. Il a servi de référence dans beaucoup de pays. Il reste indispensable pour comprendre l'esprit et le contenu du cadastre français, mais il doit être lu en gardant en mémoire le travail fait par Oyon.

En marge de cette présentation du Recueil nous pouvons faire deux remarques. Les articles sur les enclaves et les problèmes posés par la limite des communes ont presque disparu dans le Recueil (2 pour les enclaves et 16 pour les limites de communes) alors qu'ils sont au cœur de très nombreuses lettres, circulaires et instructions au cours de la première décennie du XIX^e siècle et de la période révolutionnaire. Certes, la délimitation des communes est de la compétence du ministre de l'intérieur et Gaudin s'est heurté à plusieurs reprises à l'opposition de la Commission de l'intérieur, au Conseil d'État, sur ses projets de simplification des contours communaux. Mais on peut également penser qu'en 1811 une bonne partie des limites communales sont reconnues de façon contradictoire par les maires concernés.

Le second point concerne la mise à jour des documents cadastraux. Celle-ci n'est prévue que pour les matrices de rôle et les états de section. Les plans ne sont pas mis à jour. Il ne s'agit pas d'un oubli mais d'une volonté clairement affirmée qui découle de la décision prise par l'Assemblée constituante en 1790 de répartir par égalité proportionnelle la contribution foncière sur toutes les propriétés à raison de leurs revenus nets sans autres exceptions que celles déterminées par les besoins de l'agriculture. Dans cette optique, l'allivrement d'une terre doit être fixe, ce qui doit inciter les propriétaires à améliorer la productivité de leurs parcelles. Pour Gaudin, la mise à jour du plan risque de remettre en cause cette fixité de l'allivrement. Il s'oppose donc à cette procédure – mais il n'exclut pas qu'au bout d'une longue période, la refection d'un cadastre d'une commune puisse devenir nécessaire.

Après des débuts relativement difficiles mais prometteurs et la mise en place d'une administration de plus en plus efficace, aidée par la publication du Recueil méthodique, on pouvait penser que la production cadastrale allait prendre un rapide essor. Il n'en fut rien car la situation financière de l'Empire se dégrada très rapidement à partir de 1812 entraînant un effondrement de la cadastration des communes.

Le retour de Louis XVIII relance alors les débats sur l'intérêt du cadastre parcellaire. Certains veulent l'arrêter au profit du

cadastre par masse de culture, d'autres veulent tout simplement la suppression de toute forme de cadastre. Finalement, le cadastre parcellaire continua grâce à l'action de ministres libéraux comme Decaze ou de défenseurs à la Chambre comme Gaudin, devenu Duc de Gaëte depuis 1809, mais également à l'intérêt que lui portaient beaucoup de membres de la société civile ou militaire (commission Laplace). Mais cette continuité ne peut se faire qu'avec l'adoption de la loi du 31 juillet 1821.

Cette dernière limite l'objectif du cadastre à la répartition individuelle de l'impôt : *"le cadastre cessait d'être une œuvre d'État pour devenir une opération départementale et surtout communale. Les évaluations passent des mains de l'expert agent du gouvernement à celle des classificateurs choisis parmi les propriétaires fonciers de la commune et nommés par le Conseil municipal."*

Avec cette loi, beaucoup pensaient que le cadastre parcellaire allait disparaître. Ses administrations centrale et départementale étaient amputées d'une partie de leurs membres. Mais dans leur majorité, les Conseils généraux se montrent favorables à sa continuité et bon gré mal gré, il sut traverser les années 1820 jusqu'en 1827, date d'une certaine "résurrection", au moins dans la qualité des plans.

Par contre au cours de cette période difficile (1821-1827) la valeur géométrique des plans cadastraux fut souvent de très mauvaise qualité. Les géomètres souvent mal payés et mal contrôlés fournirent, parfois, des travaux médiocres.

C'est dans ce contexte et à partir de 1817 que fut élaborée la seconde tentative de rapprochement entre la carte et le cadastre. La première avait eu lieu entre 1791 et 1800 – mais Bonaparte avait souhaité y mettre fin. En 1815, la France retourne à ses limites traditionnelles et le Dépôt de la guerre, réduit à l'inaction, réactive un projet de seconde carte de France. Une Commission royale est créée en 1817. Elle est présidée par l'astronome Laplace et est chargée d'examiner le projet d'une nouvelle carte topographique répondant aux besoins des services publics et de l'armée. Elle doit être également combinée aux opérations cadastrales.

Finalement un accord intervient entre le service du cadastre et le dépôt de la guerre. Ce dernier doit assurer la triangulation de premier et deuxième ordre, le cadastre celle de troisième ordre. Mais cette organisation ne pourra pas dépasser le stade du papier. En cette période de remise en question, le cadastre n'a ni les moyens financiers, ni humains, ni matériels, ni la volonté psychologique pour mener à bien cette collaboration. Mais ces échanges vont se révéler utiles. En 1825, le Service du cadastre va fournir au Service de la Carte de France des tableaux d'assemblage spécifiques où ne figurent pas les limites des sections ou des lieux-dits. Par contre, les principales masses de cultures sont mentionnées, les chemins et le bâti sont dessinés avec précision. Ainsi, on estime que 80 à 90 % de la planimétrie figurant sur la carte d'état-major proviennent des plans cadastraux napoléoniens.

Nous atteignons alors 1827. Le cadastre parcellaire a survécu. L'opposition est devenue beaucoup moins active et la volonté



© Marcel Pajot

La consultation

Le bicentenaire du Cadastre a été l'occasion pour la DGI de mieux faire connaître au grand public et aux partenaires de l'administration la réalité du travail et l'engagement des femmes et des hommes du Cadastre au service de la collectivité. Pour associer plus encore les agents concernés, la DGI a organisé un concours des talents sur le thème bien évidemment du Cadastre dans les domaines de la peinture, de la photographie et de la poésie. Plus de trois cents personnes ont participé et les lauréats ont été récompensés en clôture du colloque. XYZ félicite les gagnants et particulièrement Marcel Pajot, fonctionnaire et peintre, pour son tableau "La consultation". L'œuvre restitue une atmosphère du passé, à une époque où le Cadastre était perçu comme une relique précieuse voire mystérieuse en trahissant l'attitude directive du géomètre car il semble dire "Votre limite est là !", un titre auquel Marcel Pajot a d'ailleurs pensé.

d'obtenir des plans de meilleure qualité est partout exprimée. Le règlement du 15 mars 1827 sur les opérations cadastrales marque un progrès notable en imposant une véritable triangulation faite au théodolite et en prescrivant une obligation d'étalonnage des appareils de mesure. Compte tenu des décisions prises, la qualité géométrique des plans réalisés à partir de 1828 s'est améliorée.

La mise à jour du cadastre napoléonien devint alors une question de plus en plus pressante. Divers projets furent conçus en 1828, 1830, 1832, 1836 mais le plus élaboré fut celui du Ministre des finances Lacave-Laplagne qui chargea, en 1837, une commission d'étudier un nouveau projet de conservation du cadastre. La mise à jour de plans parcellaires semblait plus facile si ces derniers recouvraient par feuille qu'une petite partie de territoire mais à grande échelle. Il fut proposé de réaliser alors trois types de plans pour chaque commune non cadastrée, un plan

■ ■ ■ général à l'échelle du 1/10 000^e ou 1/5000^e, des plans sectionnaires qui portent les traces des périmètres des lieux-dits et qui serviront aux travaux d'aménagement du territoire et des plans parcellaires par lieu-dit à une échelle de 1/1000^e ou 1/2000^e.

La commission conclut positivement aux propositions du ministre et ce dernier demanda aux préfets et aux directeurs départementaux des contributions directes de prendre rapidement les dispositions pour appliquer les nouvelles mesures de conservation du plan. Lacave-Laplagne quitta le pouvoir le 4 mars 1839... sans que la loi fût votée. On revint avec son successeur à la situation antérieure à l'exception des nouvelles échelles des plans parcellaires qui seront conservées. Quelques cadastres furent réalisés respectant les directives du ministre entre 1838 et 1839.

En 1846, le même ministre, revenu au pouvoir, étudia un nouveau projet de loi sur le renouvellement et la conservation du cadastre mais ce projet ne fut pas soumis aux chambres et le ministre quitta le ministère...

Par contre, quelques années auparavant, en 1841, Humann, Ministre des finances, *"dans le but de donner satisfaction aux demandes les plus pressantes et de corriger les vices de la répartition crut pouvoir, malgré les observations de la commission du budget de 1840, autoriser la réconfection du cadastre dans les communes les plus anciennement cadastrées"*. 1 796 communes profitèrent de cette autorisation. Mais le Conseil d'État jugeant au contentieux condamna dans un arrêt du 15 mai 1848 la décision du ministre et il devint indispensable de provoquer une mesure législative.

Le gouvernement proposa alors de laisser l'initiative de la reconstitution du cadastre soit aux Conseils généraux soit aux Conseils municipaux en mettant, suivant les cas, les frais de l'opération à la charge des départements ou des communes. La loi du 7 août 1850 régularisait ainsi les reconstitutions de cadastres réalisées depuis 1841 et permettait d'en faire de nouvelles. Mais elle ne réglait pas le problème de la mise à jour du plan.

En 1850, la plupart des plans napoléoniens ont été levés et publiés à l'exception de ceux de la Savoie, du comté de Nice et de la Corse.

Entre 1808 et 1850, contrairement à une idée reçue, les aspects des plans du cadastre parcellaire napoléonien ont constamment évolué. En 1808, beaucoup de tableaux d'assemblage évoquent les anciens plans par masse de culture. Les bâtiments non soumis à l'impôt sont encore lavés au carmin. En 1811, les plans linéaires sont rendus facultatifs. Dans les atlas, *"les copies des parcellaires ne seront plus lavées en couleurs [...]. Les propriétés non imposables seront lavées en bleu"* (Gaudin). En 1825, une copie du tableau d'assemblage est prévue pour la carte de France. Son cartouche est simplifié, son plan porte l'indication des natures de culture, le méridien et le parallèle passant par le clocher sont tracés mais la boussole peut disparaître... En 1837, les échelles des plans changent : les 1/1 000^e et 1/2 000^e remplacent les 1/1 250^e ou 1/2 500^e. En 1840, le vocabulaire républicain du système métrique s'impose définitivement.

Ces plans qui étaient dès le départ condamnés à disparaître sont devenus un des éléments précieux de notre patrimoine cartographique et historique. Leur histoire nous apprend à être prudents vis-à-vis des prévisions humaines. Elle nous révèle également que le travail réalisé est celui d'une équipe dont les membres se sont relayés sur presque un siècle entre la seconde partie du XVIII^e et 1850.

Mais rien n'aurait pu être fait sans la présence d'une administration centrale qui a su être à l'écoute de ses antennes départementales - tout en se faisant respecter par celles-ci. Quel chemin parcouru entre 1802, où le ministre des Finances ne connaît pas le nom de toutes les communes en France, et 1845 où, dans une lettre adressée aux directeurs départementaux des contributions directes, le Directeur général s'inquiète du devenir du personnel de la partie d'Art après la fin des travaux cadastraux :

- Quelle a été la qualité de leur travail ?
- Ont-ils des enfants ?
- Où habitent-ils ? etc.

L'histoire du cadastre napoléonien c'est aussi cette histoire. 1

Publié avec l'aimable autorisation des organisateurs du colloque.

Contact

Pierre CLERGEOT

pierre.clergeot@wanadoo.fr

■ Vers un plan cadastral ouvert à tous www.Cadastre.gouv.fr

L'achèvement des travaux de dématérialisation du plan cadastral a naturellement conduit la Direction générale des Impôts (DGI) à prévoir la mise en ligne dudit plan sur Internet : www.Cadastre.gouv.fr est un nouveau service qui sera opérationnel dès le **28 décembre 2007**, l'administration ayant tenu à mettre en œuvre une évolution significative du dispositif pour marquer son bicentenaire. Ainsi, dès cette date, tout internaute pourra effectuer une consultation gratuite du plan cadastral sur tout le territoire à partir d'une même base incluant les six mille feuilles existantes. Les recherches pourront s'effectuer par référence cadastrale, par nom de propriétaire et par adresse de la parcelle. Ainsi l'utilisateur sera en mesure d'imprimer gratuitement un extrait du plan ou de commander, en payant en ligne, une ou plusieurs feuilles de section. Il sera possible d'opter pour un support papier ou plastique ou bien encore choisir un support numérique (CD-Rom ou DVD-Rom) voire demander le téléchargement en ligne depuis le site.

Incontestable avancée technologique, le plan cadastral sur Internet viendra compléter l'offre de services à distance développée par la DGI.

► Pour plus d'information : www.impots.gouv.fr

Hélicoptère et Géodésie en Antarctique

■ Jean-Jacques DERWAELE

Sous le titre "Histoire de l'hélicoptère" la revue XYZ n° 111 a publié un article dans lequel Jean Tariel écrit :

- Tout au long de cette année la naissance de l'hélicoptère est commémorée... C'est en effet en 1907 que Louis Breguet expérimenta son "Gyroplane" et que Paul Cornu réussit le premier vol libre d'un homme à bord de ce type d'aéronef.
- C'est après la seconde guerre mondiale que se développèrent les premières applications pratiques de cet appareil... Aujourd'hui il est devenu d'usage courant dans de nombreux domaines y compris dans différentes disciplines de la topographie.
- Prises de vues dans les terres australes et antarctiques françaises (TAAF)...
- Pratique de l'hélicoptère dans le domaine des sciences géodésiques...

Il y a 50 ans les géodésiens des Expéditions Antarctiques Belges (1957-1968) disposaient d'un hélicoptère pour effectuer leurs missions. Mais malgré l'hélicoptère la façon d'exécuter les travaux de géodésie était bien différente qu'actuellement !

Et ce principalement du fait que la composante électronique n'avait pas encore fait son apparition dans les instruments de mesure. Les exemples qui suivent illustreront les activités du "géodésien hélicoporté" d'il y a 50 ans.



Antarctique ■ Terre de la reine Maud.

La tradition établie par l'expédition antarctique de la "Belgica" (Adrien de Gerlache de Gomery 1897 – 1899) fut reprise par les Expéditions Antarctiques Belges (1958-1959-1960) et par les Expéditions Antarctiques Belgo-Néerlandaises (1964-1965-1966).

Gaston de Gerlache de Gomery chef de l'expédition 1957-1958 écrit : "...j'estime qu'il nous faut un hélicoptère ...". Il emportera un hélicoptère biplace Bell 47 H et en sera le pilote.

Lors de la campagne d'été 1964-1965 le brise glace "Magga Dan" était équipé d'une plate-forme d'atterrissage pour l'Alouette II piloté par le lieutenant Bernard de Biolley.

En débarquant le 26 décembre 1957⁽¹⁾ sur la côte de la Princesse Ragnhild – Terre de la reine Maud les membres de l'expédition étaient les premiers à fouler cette partie de l'Antarctique. Ils y construisirent la base Roi Baudouin (latitude 70°26' S et longitude 24°19' Est)



**Expédition Antarctique Belge 1957
Hélicoptère Bell 47 H.**

située sur l'ice-shelf à environ 11 km au sud de la Baie Roi Léopold III.

Détermination astronomique de position

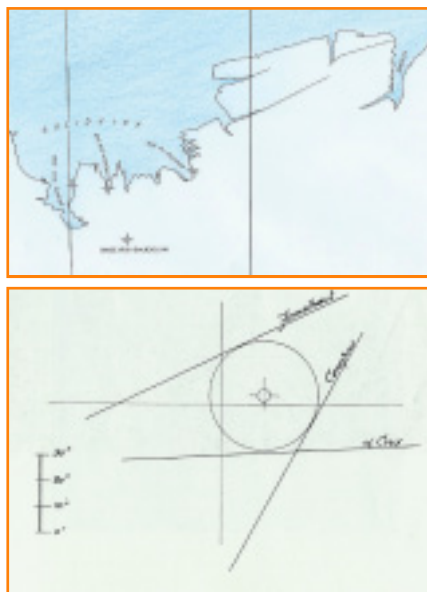
En dehors des vols de reconnaissance l'hélicoptère permit au géodésien Jacques Loods d'effectuer un point astronomique dans la baie du Polarhav. On ne peut atteindre cette baie que par



Expédition Antarctique Belgo – Néerlandaise 1965 Hélicoptère Alouette II.

la voie des airs car elle est entourée de falaises abruptes, sans aucune descente⁽²⁾.

– 20 octobre 1958. L'hélicoptère est chargé au maximum. Il est à la limite de sa puissance. Je transporte d'abord l'équipement, puis J. Loods⁽³⁾ et L. Cables⁽⁴⁾. Le matériel trop encombrant pour la cabine, comme tente et trépieds des instruments, est ficelé aux patins... Le blizzard se lève il dure



Détermination astronomique de position : point situé dans la Baie du Polarhav.

■■■

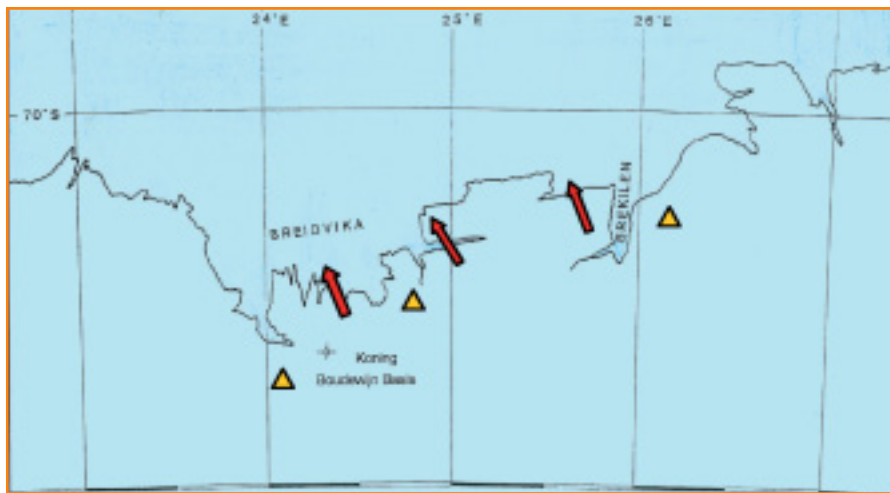
quatre jours... Le 24 le temps s'éclaircit. Nous mettons plusieurs heures à déneiger l'hélicoptère. J'atterris avec beaucoup de difficultés dans la baie. Les pales de l'appareil soulèvent, à l'approche, des tourbillons de neige qui m'empêchent de voir le sol.

Nous devons nous hâter, car le temps se gâte. Vite nous rassemblons le matériel scientifique que je viendrai chercher lors d'un second voyage ...

La position de ces points au sol, identifiables sur les photos aériennes, devait servir à dresser les cartes de cette région inexplorée. Le système GPS était encore inexistant, le géodésien devait avoir recours à l'astronomie pour déterminer les coordonnées géographiques d'un point. Toutes les déterminations astronomiques de position ont été principalement exécutées par observation d'étoiles ; mais au cours de l'été antarctique seul le soleil est visible alors il fallait avoir recours à lui !

Position du point dans la Baie du Polarhav : lat. 70°18'26" Sud – long. 24°40'50" Est (20.10.1958). La méthode⁽⁵⁾ employée est celle des "droites de hauteur" elle fut exécutée au moyen d'un théodolite Wild T3 et d'un chronomètre Ulysse Nardin.

Trois étoiles sont observées (Canopus, Fomalhout et Alpha Crux) les mesures



Réseau de triangulation sur l'ice - shelf:

- Points situés sur des collines (Ice - Rise).
- Direction du déplacement de l'ice - shelf.

Côte de la Princesse Ragnhild

durèrent une heure par -18°C. C'était un travail minutieux car il fallait déterminer simultanément la distance zénithale de l'étoile et l'heure marquée au chronomètre.

Venaient ensuite des heures de calculs fastidieux : corrections du chronomètre, recherche dans les tables d'éphémérides, interpolations dans les tables de valeurs naturelles (7 décimales) et ce avec comme outil de calcul une machine à calculer Facit (mécanique à la main !). La précision était de l'ordre de grandeur de 1" à 2" d'arc.

Réseau de triangulation sur l'ice-shelf⁽⁶⁾

A la demande du géologue T. Van Autenboer le mouvement et la déformation de l'ice-shelf (situé entre la base Roi Baudouin et la baie Brekilen) furent déterminés.

Du mois de février au mois de décembre 1965 un réseau de triangles fut implanté (balises en acier) et mesuré par triangulation. L'aire de travail d'environ 1.000 km² était située entre 24°E et 26°E de longitude et entre 70°05'S et 70°30'S de latitude.

Mesures angulaires au théodolite Wild T2 ou T3, mesures de distances avec la Stadia Invar Wild de 2 mètres (mesure

avec deux bases auxiliaires) et en vue d'orienter la triangulation détermination d'azimuts (mesure d'une direction en plusieurs points par la méthode de l'azimut par l'heure, effectuée sur le soleil).

Le réseau avait comme point d'origine le pilier astronomique de la Base Roi Baudouin mais il fut également raccordé à trois points situés sur des collines (Ice-Rise). Un de ces points était inaccessible par voies terrestres (crevasses) ce fut néanmoins possible de le matérialiser grâce à l'hélicoptère.

En janvier et février 1967 la position des 100 points balisés fut remesurée, ceci afin de pouvoir calculer le déplacement de chacun d'eux et de déterminer ainsi la déformation de l'ice-shelf. Il apparut

- (1) 1957-1958 : Année Géophysique Internationale (IGY-1957-58) qui coïncide avec la 3^e Année Polaire Internationale.
- (2) Gaston de Gerlache de Gomery - Retour dans l'Antarctique - Edition Casterman - 1960.
- (3) ir Jacques LOODTS géographe à l'IGN (B) – géodésien des Expéditions Antarctiques Belges 1958, EABN 1964 et CE 1959-1960 - "IRIS 1960".
- (4) ing Luc CABES – géomagnéticien des Expéditions Antarctiques Belges 1958 et 1964.
- (5) ir. J. Loodts – Géodésie – Résultats Scientifiques Volume VIII – Expédition Antarctique Belge 1957 - 1958.
- (6) J.-J. Derwaël - Mesure du déplacement de la glace Terre de la Reine Maud, Antarctique Revue "Géomètre" Union Belge des Géomètres – n°1 Janvier – Février 1972.

que l'ice-shelf se déplaçait vers le Nord à raison de plusieurs centaines de mètres par an.

Mesures de vitesse d'écoulement de glace

Des profils⁽⁷⁾ de vitesse et d'épaisseur de glace ont été mesurés sur les glaciers ouest des Sor – Rondane. Les coordonnées des balises étaient déterminées par relèvement sur des points d'appui (sommets de montagnes environnantes) de coordonnées connues.

Lors de la Campagne d'été 1964-1965 le camp de base en montagne "Vengen" était situé à quelques kilomètres de l'endroit où sera construit la nouvelle base Belge⁽⁸⁾.

Les géomètres K. Blaiklock et J.-J. Derwael devaient implanter et mesurer des balises sur deux glaciers⁽⁹⁾ situés à l'extrême ouest des Sor-Rondane⁽¹⁰⁾. Au départ du camp de base le géomètre, ses instruments, une tente, un sac de couchage, une caisse de nourriture et la balise étaient déposés en hélicoptère sur les lieux du mesurage, le travail terminé l'hélicoptère le déposait sur le point suivant. Ce mode d'opération représentait un gain de temps important et s'avérait très efficace.

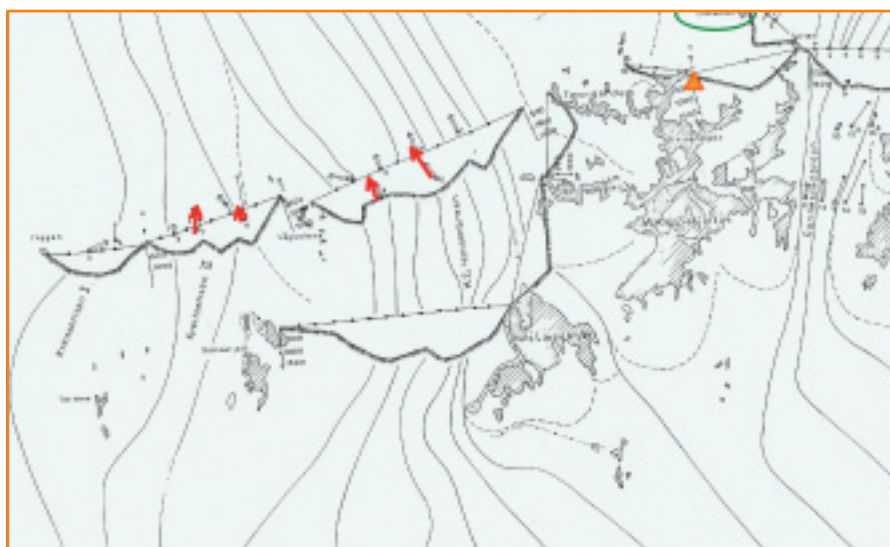
Conditions atmosphériques




Le froid intense qui règne dans les régions antarctiques ne présente pas un inconvénient majeur pour le géodésien il rend les observations pénibles, mais pas impossibles⁽¹¹⁾.

Mais parfois tout va mal!⁽¹²⁾ Lors de la campagne d'été 1966 – 67 les géodésiens entreprennent le rattachement géodésique Base Roi Baudouin construite sur



Point sur la colline Baie Brekilen.



 "Utsteinen" Base Princesse Elisabeth 2007 - 2008.
 "Vengen" Camp de base – Campagne d'été 1964-65.
 Vecteur de déplacement.

l'ice-shelf mouvant et le piton rocheux le plus proche : Romnoes situé à 120 km de la BRB. Malheureusement le mauvais temps empêchera la réalisation de ce travail. "Dès la fin des reconnaissances, les deux topographes restant seuls avec l'hélicoptère, son pilote et son mécanicien, nous fûmes pris dans un très mauvais temps qui dégénéra en blizzard, nous forçant à une immobilisation et une inactivité de soixante-douze heures".

Remerciements

Si le but principal de cet article est de montrer l'importance de l'hélicoptère pour les travaux de géodésie en Antarctique je tiens à rendre hommage à deux pilotes : le baron Gaston de Gerlache de Gomery⁽¹³⁾ et le vicomte Bernard de Biolley⁽¹⁴⁾ en leur exprimant mon admiration et ma gratitude.

J'aimerais également remercier le prof.

dr T. Van Autenboer (géologue) et le prof. dr H. Decler (géographe) de m'avoir confié les travaux géodésiques relatifs à leurs recherches scientifiques. [1](#)

Contact

Jean-Jacques DERWAELE

jj.derwael@skynet.be

Géomètre – Géodésien des Expéditions Antarctiques EABN 1965, CE 1966-67, EABSA 1967-68

(7) T. Van Autenboer and K.V. Blaiklock - Ice-Flow and Thickness Measurements in the Sør –Rondane, Dronning Maud Land, Antarctica – Journal of Glaciology, Vol. 6, n°43 February 1966

(8) Base Princesse Elisabeth 2007 - 2008

(9) T. Van Autenboer and H. Decler - Mass Transport Measurements in the Sør-Rondane, Dronning Maud Land, Antarctica – Ministère des Affaires Economiques et de l'Energie B – Professional Paper 1974 n°6

(10) Hansenbreen balises 5 (34,27 m/an) et 6 (28,83 m/an) => mesurées en janv. 1965 - remesurées en nov. 1966 Kreiserisen balises 6 (8,94 m/an) et 7 (20,40 m/an) => mesurées en janv. 1965 - remesurées en nov. 1966.

(11) ir J. Loodts – Géodésie et Topographie dans l'Antarctique– Ciel et Terre – mars - avril 1966.

(12) ir J. Mousset - Géodésie et Topométrie en Antarctique – Ciel et Terre – juillet – août 1968.

(13) Commandant de l'expédition Antarctique Belge 1957-1958 - pilote.

(14) Pilote des Campagnes d'été 1964-65 et 1965-66.



Point sur la colline Baie du Polarhav.

Un ventilateur à nuages

(Imprévus et imprévoyance)

■ Robert CHEVALIER

Le récent article de notre collègue Jean Tariel a évoqué chez moi de vieux souvenirs de l'époque héroïque où l'hélicoptère a commencé à être utilisé dans les Travaux Publics, essentiellement comme moyen de transport, sur les chantiers difficiles d'accès.

Voici sur un plan purement anecdotique, le contexte de notre première expérience en topographie :

Dans les années 1968 / 1970, l'entreprise est consultée par EDF pour l'étude d'un projet de ligne THT à 225 Kv, liaison internationale reliant les postes de Cornier en France et Chatelard en Suisse. Le tracé, modeste par sa longueur (30 – 40 km) s'avérait au vu de la carte, redoutable par ses difficultés physiques. Il se déroulait en effet dans une zone dont l'altitude culminait à 3 000 mètres, située entre les vallées de Chamonix et de Samoëns, aux abords du mont Buet. Ce devait être le plus haut ouvrage jamais réalisé en France et même en Europe !

Je me rends sur place pour évaluer les difficultés. Mais je vois tout de suite que les accès sont impossibles avec des moyens normaux. Une tentative de survol aérien, avec le concours d'un aéro-club local tourne court à cause du mauvais temps ; il faudra se contenter d'examiner les photos IGN au stéréoscope. Par des discussions avec les gens du cru et en particulier avec les guides, j'apprends cependant que les temps d'accès pédestres sont de l'ordre de sept heures sur les secteurs les plus élevés.

Hors de question donc pour les géomètres de monter le matin et redescendre le soir. Hors de question aussi d'installer des campements comme nous l'avons déjà fait, car le sol est rocheux et très accidenté. Je ne vois qu'une solution : la photogrammétrie, qui n'avait jamais été utilisée en France à cette époque dans ce domaine bien particulier. Il faut dire qu'économiquement, ce n'était pas très rentable de photographier et équiper des surfaces considérables pour n'en tirer qu'un profil en long, c'est-à-dire une bande filiforme... Cette technique ne pourra de toute façon être mise en œuvre qu'avec l'utilisation de l'hélicoptère, seul moyen d'acheminer hommes et matériel.

J'établis donc le devis dont le montant se trouvera très alourdi par le coût d'utilisation de cet engin. Bref, nous sommes retenus pour ce marché, mais comme toujours avec EDF il faut tout justifier, et comme nos interlocuteurs, bien qu'ils sortent



Sur un des sommets du tracé.

de Supélec, n'ont aucune connaissance en photogrammétrie, il faut tout expliquer. Ce que je fais durant deux jours pleins devant le chef de la région Alpes-Sud-Est, personnage important, qui très dubitatif, a du mal à se laisser convaincre. Enfin, grâce la réputation de notre société, spécialiste des travaux en montagne, et à mon engagement personnel quant au succès de la mission, le marché est conclu.

N'ayant ni le matériel ni l'expérience, nous avons pris pour partenaire la SGPT, société de photogrammétrie ayant pignon sur rue. La prise de vues au 1/10000^e sera confiée à l'IGN. Pour l'hélico, nous faisons appel à la société Héli-Union, basée à Grenoble et très aguerrie aux opérations en montagne.

La SGPT détache mon vieil ami Pierre L. que je connais de longue date et qui nous propose un panneautage aux abords du tracé, excellente solution, car il y a peu de points caractéristiques identifiables.

Vu le côté novateur des opérations, je décide de participer à cette première phase du travail, afin aussi de reconnaître de visu la configuration du terrain.

On nous fournit une Alouette III (et son pilote bien sûr !) qui me semble surabondante et bien chère, mais c'est le seul appareil disponible sur le secteur, et on nous affirme que c'est mieux côté sécurité... mais ce n'est pas ce qui était prévu dans le devis.

En quelques jours nous arrivons à équiper la zone du tracé, sans souci particulier, mais avec quelques surprises. Il s'avère, du fait des très fortes pentes, que l'hélico ne peut pas toujours se poser où nous le souhaitons. Il nous dépose où il peut, et il faut souvent faire pas mal de marche à pied, dans des conditions difficiles. Ce sera le deuxième imprévu... Un jour sur une zone particulièrement chahutée, il nous jette, façon commando et nous convenons d'un horaire pour la récupération. Mais comme souvent en montagne, les nuages descendent sur nous et on se retrouve dans un brouillard à couper au couteau. A l'heure dite, on entend l'hélico tourner au-dessus de nos têtes, mais nous ne le voyons pas ! et vice-versa... Au

bout d'un temps non négligeable, mais qui nous semble une éternité, l'angoisse nous prend, car on craint de passer la nuit là, sans vêtements chauds ni équipements spéciaux (nous étions un peu inconscients !). Enfin, on voit émerger dans la brume un patin de l'hélico, on s'y accroche et on arrive péniblement à grimper à bord, avec une agilité dont je ne me croyais pas capable (la peur donne des ailes !) ce sera le troisième imprévu... Mais ce n'est pas fini. Le jour suivant, au petit matin, les nuages (encore eux) se sont abattus sur la vallée, à Samoëns où nous logeons. Impossible de décoller de la DZ que la Gendarmerie a mis aimablement à notre disposition. Encore un imprévu ! Ça dure toute la journée et pendant ce temps-là les heures d'immobilisation tournent, la facture s'alourdit et les délais courent...

Le lendemain, même topo. Consterné, je discute avec le pilote pour voir ce qu'on peut faire. Il me propose de partir quand même en naviguant aux instruments et me dit qu'avec le rotor, il pense pouvoir chasser les nuages devant nous, tel un immense ventilateur. Ça me semble bien risqué, mais nous n'avons pas le choix. Ça fonctionne plutôt bien, mais c'est très impressionnant, car malgré une allure des plus réduites, on voit soudain et au dernier moment les parois rocheuses à quelques mètres devant nous. Silence total à bord du cockpit... Tout le monde est un peu tendu. Enfin, le résultat est là. Nous arrivons péniblement au-dessus des nuages, le temps est très clair et on peut opérer. Merci et bravo au pilote ! Il nous fera d'autres démonstrations de ses compétences, mais cette fois pour le plaisir. Comme nous passons la nuit dans un hôtel-chalet d'altitude, les clients entourent évidemment l'appareil posé dans la cour et supplient presque pour que nous les emmenions, ce qui est naturellement impossible. Mais quand nous partons le lendemain matin, pour les saluer et surtout pour frimer, le pilote fait un piqué sur l'hôtel, presque à la verticale. (j'appris par la suite qu'il avait été pilote de chasse !). J'ai l'estomac qui me remonte dans la gorge et manque de défaillir sous l'effet de l'émotion... Parfois, il pose un patin sur le rebord d'une falaise ou sur le sommet d'un piton, et reste un long moment en stationnaire, pour s'exercer dit-il. En fait je pense que ça l'amuse, nous beaucoup moins ! De toute façon, les vols en montagne sont toujours très impressionnants, ils n'ont rien de commun avec la navigation en plaine. C'est vraiment un outil incomparable, qui permet en outre de voir les paysages sous un jour totalement insolite.

A ce propos, alors que nous rejoignons Grenoble en fin de mission, nous faisons un passage autour du sommet du Mont-Blanc. Nous ne nous y poserons pas, mais le ferons au dôme du Goûter, un peu plus bas... Je ne sais toujours pas si tout ça était bien réglementaire, mais on ne peut pas empêcher les pilotes d'en faire un peu trop... C'est souvent dans leur nature !

Pour moi qui n'avait fait que quelques visites de chantier à bord de petits hélicos Bell, ces exploits sont enthousiasmants. Mais bêtement, j'en fais l'éloge au directeur d'Héli-Union, qui à ma grande surprise me révèle que pour lui, notre pilote est connu pour être le plus casse-cou et le plus dangereux de son équipe... Ça fait plaisir à entendre !

Pour les opérations de stéréopréparation, qui nécessiteront des journées de travail, je demande pour réduire les coûts, qu'on utilise une Alouette II beaucoup moins onéreuse. Il n'y en a toujours pas sur la région. On me propose d'en faire venir une de Paris, à nos frais, bien sûr. Comme je veux être là pour le démarrage de ces travaux, je profite de l'hélico pour descendre sur place, ce qui représente un beau périple. Voulant me rendre utile, je prends la carte et assure la navigation, ce qui n'est pas bien compliqué, car on vole à vue. Ça épate le pilote, qui ne doit pas savoir qu'un géomètre sait en principe lire les cartes...

Autre machine, autre pilote. Celui-ci serait plutôt du genre opposé. Prudent à l'extrême et ne prenant aucun risque, il dépose encore et souvent les géomètres à une bonne distance de l'endroit voulu, ce qui les fait pester à cause de l'obligation de marcher avec armes et bagages en terrain difficile. Enfin, les opérations se déroulent normalement, rien de notoire à raconter.

Tout ne se passe pas toujours aussi bien. Lorsque nous obtiendrons ensuite le marché de construction, les hélicoptères seront utilisés de façon intensive pour le transport des matériaux et du personnel. Ce seront des Lamas, version plus puissante et plus adaptée que les Alouettes. Mais un jour, un contrôleur de travaux EDF, qui participe à plusieurs rotations par jour tombe raide mort à la descente de l'appareil. Son cœur fragile n'avait pas résisté aux changements d'altitude incessants. Ce fut encore un imprévu, mais de taille...

Un autre accident, sur ce même chantier : un pilote qui vient de procéder au déroulage des câbles – là aussi l'hélico rend d'immenses services – heurte avec sa machine les conducteurs à la mise en place desquels il venait lui-même de participer. Crash immédiat, l'hélico détruit. Par chance, le pilote grièvement blessé survit, mais dans quel état !

La mission terminée, on apprend qu'en 20 ans, il y a eu 17 accidents d'hélicoptères dans cette région, la plupart causés par



Préparatifs de stéréopréparation (au fond, l'hélico dans la brume).

■ ■ ■ des câbles à foin ou à bois installés de façon sauvage par les autochtones, et qu'on voit toujours trop tard... Frayeur rétrospective !

Encore un petit incident tragi-comique : Bien plus tard, lors de la réception des implantations de pylônes par le client, avec l'hélico d'EDF, cette fois, nous emmenons le maire de Sixt, un des principaux opposants au tracé pour qu'il se rende compte sur place. Mais ce maladroit, très corpulent, s'accroche malencontreusement en montant dans l'appareil, à une petite manette de sécurité qui a pour objet de larguer la porte en cas d'urgence. C'est ce qui arrive instantanément ! Nous ferons donc la suite de la visite sans porte, avec le derrière au ras du vide... Personnellement, ça m'impressionne beaucoup, comme quoi une simple cloison en verre, peut psychologiquement donner une impression de sécurité !

Beaucoup de premières sur cet ouvrage : plus haute altitude de tracé de ligne électrique, première utilisation de la photo et de l'hélico pour ce type d'étude, et un autre exploit : la plus grande portée entre deux pylônes : 3 000 mètres à hauteur de Sixt (le premier hiver, les pylônes s'écrouleront sous l'effet de la surcharge due au givre, sous-évaluée). J'ajouterai que malgré les craintes des ingénieurs EDF, la qualité du profil en long s'avèrera excellente. Un seul hiatus : un petit rocher émergeant hors axe, oublié par le restituteur, qui risquait de créer



Alouette, gentille alouette...

un amorçage électrique et qu'il fallut détruire au marteau-piqueur (avec l'obligation de monter un compresseur...)

On voit, à travers ces quelques lignes, que l'hélicoptère est un engin remarquable, mais non sans danger, quand il est utilisé dans des conditions extrêmes, même par des pilotes professionnels chevronnés. Le risque et l'imprévu sont toujours présents. Qu'on se rassure, ça n'arrive pas tous les jours et on améliora nos méthodes de travail..

N'oublions jamais en contrepartie, les immenses services rendus en matière de sauvetage en montagne.

Tout va bien, merci ! mais que de souvenirs et d'émotions... ! 1

Olivier Reis

*Ingénieur géomètre-topographe ENSAI Strasbourg
Diplômé de l'Institut de traducteurs et d'interprètes (ITI) de Strasbourg
9, rue des Champs F-57200 SARREGUEMINES
Téléphone : 03 87 98 57 04 Télécopie : 03 87 98 57 04 E-mail : o.reis@infonie.fr*

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

Reinhart Stölzel

*Ingénieur géomètre-topographe
Interprète diplômé de la Chambre de commerce et d'industrie de Berlin
Heinrich-Heine-Strasse 17, D-10179 BERLIN
Téléphone : 00 49 30 97 00 52 60 Télécopie : 00 49 30 97 00 52 61 E-mail : reinhart.stoelzel@eplus-online.de*

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

Paul Newby

*Membre de la Royal Institution of Chartered Surveyors (RICS)
Diplômé des universités de Cambridge (géographie) et de Londres (photogrammétrie)
9 Merrytree Close, West Wellow, Romsey, Hants SO51 6RB GB
Téléphone : 00 44 1794 322 993 Télécopie : 00 44 1794 324 354 E-mail : paulnewby@onetel.net.uk*

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

Des topographes traducteurs à votre service

Maria-Carmen Perlingeiro

■ Jean-Pierre MAILLARD

En révélant généralement la personnalité de leur propriétaire ou de leur animateur, toutes les galeries d'art sont bien différentes. Pourtant depuis plus de cinquante ans, la présentation de l'art contemporain semble répondre au standard du "white cube" à savoir un local aux murs du blanc le plus neutre qui soit auxquels sont accrochés un éclairage approprié et des cimaises cachées par la même couleur. C'est pourquoi tout lieu d'exposition dont la présentation s'écarte du standard se remarque.



© Catherine Rebois

A Paris, le quartier du Marais⁽¹⁾ concentre des musées et dans leur sillage de nombreuses galeries. Elles s'ouvrent le plus souvent dans des boutiques abandonnées par le commerce de quartier avec leurs façades largement vitrées ou encore dans des hôtels particuliers spécialement réaménagés. A l'intérieur, plongé dans la blancheur des lieux, on oublie l'environnement, le regard uniquement attiré par l'expression plastique présentée. Mais une galerie de la rue de Thorigny fait exception.

L'Espace Topographie de l'art

Outre son nom qui suscite a priori l'intérêt d'XYZ, l'Espace Topographie de l'art se caractérise par son implantation dans un atelier désaffecté, volontairement d'une réhabilitation très sommaire. La sauvegarde du caractère de la

construction initiale est le fait d'Adon Peres qui a ouvert la galerie en octobre 2001. On pourrait penser valorisante l'opposition entre un local d'activité avec ses fermes de fer, ses murs bruts, son toit de verre armé et des œuvres abouties. Au contraire, dans un tel cadre, les pièces doivent avoir suffisamment de force pour exister, pour dépasser un environnement défavorable. La programmation de la galerie montre que le caractère "topographique" de l'espace procède de la métaphore. Tout comme les plans et cartes représentent les lieux et le terrain, l'Espace Topographie de l'art souligne par le nom un rôle de médiateur entre les créateurs et le public.

Dans son domaine Adon Peres, par ailleurs historien de l'art, apparaît également comme un trait d'union entre Genève, Lisbonne, Paris et Rio de Janeiro.

Le "Monde merveilleux des objets flottants"

Tel est le titre de l'ensemble des pièces exposées en début d'automne à l'Espace Topographie de l'art. Pour le géomètre il apparaît d'abord comme une forêt des fils parallèles, la matérialisation multiple de la verticalité tant recherchée dans la mise en place, sur leurs trépieds, des appareils de mesure justement topographiques. L'ensemble des pièces est comme dressé sur une table virtuelle ou transparente qui malgré son absence matérialise un plan rigoureusement horizontal en opposition avec les supports tombés du zénith. La rigueur du positionnement en hauteur accentue la perception d'une lévitation onirique. De géométrie abstraite par les formes circulaires aux volumes réguliers, la composition prend une dimension figurative dans une recherche d'équilibre et d'har-

la légèreté de l'albâtre

nie. En effet, elle peut-être également vue comme des plats et des vases, des brûle-parfums et des soucoupes, des colonnettes et des abat-jour, toutes pièces qui procèdent de la main d'un tourneur avant d'être celle d'un sculpteur, d'une sculptrice en l'occurrence.

Celle-ci s'exprime par le nombre, la répétition et la série. Si elle voit dans l'albâtre une pièce de monnaie et la façonne, c'est un trésor qu'elle produira et amassera. Si de la pierre translucide elle dégage la forme d'un livre, c'est une collection qu'elle empilera pour le plaisir des yeux. Sa volonté de multiplication la distingue des autres artistes tel Constantin Brancusi qui, avant elle, a recherché la poésie dans les formes minimalistes. Mais multiple ne veut pas dire identique car le matériau choisi, l'albâtre, par la diversité de ses veines et de ses couleurs donne toujours un caractère unique à chaque pièce d'une série.

Avant de parvenir à son expression actuelle que l'on peut qualifier de figuration géométrique, Maria-Carmen Perlingeiro a beaucoup travaillé les formes entre le corps et la structure. Elle a ainsi extrait de la pierre des pétales qui ne faneront jamais, des gouttes d'eau sans risque de se déformer, des points de rosée pas prêts de s'évaporer. Dans un élan poétique, Ronaldo Brito voit dans ces gouttes des larmes qui *"surgissent tout à coup, pour un oui ou pour un non, pour l'amour ou pour la mort"* en les plaçant délibérément dans *"le registre pur du sentiment, un peu à contresens du cynisme quasi officiel qui domine la culture artistique contemporaine"* et conclut *"A l'ère de la consommation absolue, la sculpture de Marie-Carmen entreprend une rééducation esthétique spontanée et sans prétention, une tâche étonnement simple : refaire notre contact amoureux avec les choses"*.

Maria-Carmen Perlingeiro

Née en 1952 à Rio de Janeiro et après des études générales, Maria-Carmen Perlingeiro suit à partir de 1971 les cours de l'Ecole des Beaux-Arts de la ville avant de partir pour celle de Genève où elle obtiendra son diplôme. Son parcours artistique s'initie dès 1975 puisque cette année-là, puis en 1977, elle participe aux biennales de Sao Paulo. En 1982, une série de ses œuvres est exposée au Musée d'art moderne de Rio de Janeiro. Dans cette période, elle travaille sur papier, principalement par l'utilisation de la sérigraphie, et par l'agencement d'objets. Ensuite elle ferme son atelier d'art et part pour New York où elle fait un pas décisif vers la sculpture. A Brooklyn, au Pratt Institute, elle parfait sa connaissance des trois dimensions à travers la terre avant de la remplacer par le marbre à l'Art student's league de New York.

Après avoir longuement travaillé le marbre, Maria-Carmen Perlingeiro marque progressivement sa préférence pour l'albâtre, autre roche naturelle connue depuis l'Antiquité et largement utilisée pour l'ornementation. Précisément elle emploie l'albâtre calcaire qui, bien poli, fait justement penser au marbre. L'albâtre est plus facile à sculpter car il est tendre. Comme il est poreux, on peut aussi le peindre ou le dorer et l'artiste ne s'en prive pas chaque fois que cela est nécessaire, en n'oubliant pas qu'il se fissure et casse facilement.

Après ce cycle de formation académique et personnel, elle retourne définitivement à Genève où, à son tour, elle enseigne à l'Ecole des Beaux-Arts. Son action de professeur va de pair avec une production de sculptures facilitée par la proximité de l'Italie notamment Carrare et de leurs carrières millénaires. Ronaldo Brito résume bien l'évolution

de Maria-Carmen Perlingeiro : *"Vingt ans de travail lourd, de dur labeur, réussissent enfin à produire une sculpture légère, presque diaphane ; vingt ans de chocs quotidiens contre la matière finissent par la rendre immatérielle"*.

Le minéral n'est pas le seul mode d'expression de l'artiste puisqu'elle intervient aussi dans le paysage. Son *"Projet végétal"* retenu sur concours a été réalisé à Genève devant le siège d'Uni Dufour. Aussi épurés que ses albâtres, les trois cyprès soigneusement ordonnés habillent la placette aménagée devant l'entrée de l'immeuble en dialoguant avec les lignes quadrillées du bâtiment.

De même, son *"Open heart"* agrément le jardin genevois de l'Organisation mondiale de la santé (OMS). Les pieds de vigne, de pommiers et de cornouillers méticuleusement agencés dessinent justement un cœur qui s'inscrit dans un carré de six mètres de côté que Michaël Jakob qualifie de sculpture vivante car la diversité du vert des arbustes et des arbres, celle du rouge des fruits participent à la composition dont la perception évolue au fil des saisons.

S'agissant de la pierre, Michaël Jakob souligne surtout que l'albâtre doté d'une translucidité étonnante et d'une dureté relative – sa transparence et ses couches ondoyantes laissent apparaître la profondeur – semble suggérer, sous les doigts de la sculptrice, la matière vivante sous l'épiderme.

Qu'elles soient minérales et végétales, Maria-Carmen Perlingeiro n'a qu'une seule recherche : donner vie à ses réalisations. 1

► Pour plus d'information : www.maria-carmenperlingeiro.com

(1) voir Art et géométrie - xyz n° 104.

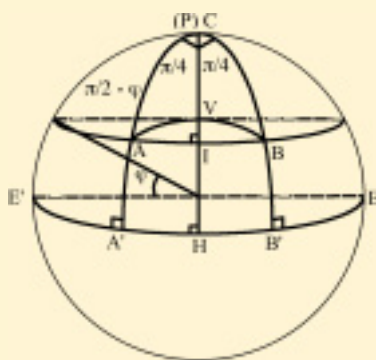
■ par Raymond D'HOLLANDER

On considère un tétraèdre régulier OABC où toutes les arêtes sont égales et la sphère de centre O passant par A B C. Soit ABC le triangle sphérique équilatéral, dont on désigne les angles par A B C et les côtés par a b c , $A = B = C$; $a = b = c$.

- 1) Quelle est la valeur des côtés a b c ?
- 2) Démontrer que dans un triangle sphérique équilatéral on a : $\cos A = \frac{\tan \frac{a}{2}}{\tan a}$.
- 3) En déduire la valeur des angles du triangle sphérique ABC.
- 4) Montrer géométriquement que la valeur α de l'angle du tétraèdre est égale à A.

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

Solution de la récréation mathématique du n° 112 d'XYZ



Désignons le pôle terrestre par C. Joignons CA et CB et traçons l'orthodromie AVB. On matérialise un triangle sphérique rectangle en C, auquel on applique la règle mnémonique de Néper : $\cos c = \cos PA \cdot \cos PB$

$$\text{soit } \cos s_0 = \cos^2\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) = \sin^2 \varphi \quad (1)$$

$$\text{D'où } s_0 = \arccos(\sin^2 \varphi)$$

En prenant le rayon de la sphère pour unité le rayon du parallèle \widehat{AIB} est : $r = \cos \varphi$ et la longueur de la loxodromie $\widehat{AIB} = \frac{\pi}{2} \cos \varphi$ $s_1 = \frac{\pi}{2} \cos \varphi$ (2)

Il en résulte que la différence Δ entre s_1 et s_0 a pour valeur : $\Delta = s_1 - s_0 = \frac{\pi}{2} \cos \varphi - \arccos(\sin^2 \varphi)$

Il faut que Δ soit maximum. Pour cela annulons sa dérivée par rapport à φ .

On rappelle que si $z = \arccos x$ on a $z' = -\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$; si $z = \arccos y$, $z' = -\frac{1}{\sqrt{1-y^2}}$, soit ici pour

$$z = \arccos(\sin^2 \varphi) \quad z' = -\frac{2 \sin \varphi \cos \varphi}{\sqrt{1 - \sin^4 \varphi}} \quad \text{On a donc } \Delta' = -\frac{\pi}{2} \sin \varphi + \frac{2 \sin \varphi \cos \varphi}{\sqrt{(1 - \sin^2 \varphi)(1 + \sin^2 \varphi)}}$$

Une 1^{re} solution

correspond à $\sin \varphi = 0$ c'est-à-dire $\varphi = 0$; la loxodromie et l'orthodromie sont confondues sur l'équateur ; on a affaire au minimum de $\Delta = 0$.

La 2^e solution correspondant au maximum de Δ a lieu lorsque $\Delta' = 0$ c'est-à-dire en simplifiant

$$\frac{2 \cos \varphi}{\sqrt{(1 - \sin^2 \varphi)(1 + \sin^2 \varphi)}} = \frac{\pi}{2} \quad \text{ou} \quad \frac{2}{\sqrt{1 + \sin^2 \varphi}} = \frac{\pi}{2} \quad \text{ou} \quad \sqrt{1 + \sin^2 \varphi} = \frac{4}{\pi} \quad \text{ou} \quad 1 + \sin^2 \varphi = \frac{16}{\pi^2}$$

On trouve $1 + \sin^2 \varphi = 1,621138938$ soit $\sin \varphi = \sqrt{0,621138938} = 0,788123682$

d'où $\varphi_m = 52,0105078^\circ$ avec $\cos \varphi_m = 0,615516906$.

On a donc $s_1 = \frac{\pi}{2} \cos \varphi_m$; $\frac{\pi}{2}$ correspondent à 10 000 km

$$S_1 = 10\,000 \times 0,615516906 = 6155,169 \text{ km}$$

$$S_0 = \arccos(\sin^2 \varphi_m) = \arccos 0,621138938 = 51,60064646^\circ$$

$$\text{En km : } s_0 = \frac{10\,000}{90} \times 51,60064646 \quad s_0 = 5733,405 \text{ km}$$

$$\Delta m = s_1 - s_0 = 6155,169 - 5733,405 = 421,754 \text{ km}$$

2°) Cas où $\varphi' = 45^\circ = \pi/4$

D'après la relation (1) : $\cos s'_0 = \sin^2 \frac{\pi}{4} = \frac{1}{2}$ $s'_0 = \frac{\pi}{3} = 60^\circ$

π radians correspondent à 20 000 km donc $s'_0 = \frac{20\,000}{3} = 6\,666,667$ Km

D'après la relation (2) $s'_1 = \frac{\pi}{2} \cos \varphi' = \frac{\pi}{2} \times \frac{\sqrt{2}}{2} = \frac{\pi}{2} \times 0,7071068$

Comme $\pi/2$ correspondent à 10 000 km, $s'_1 = 7\,071,068$ km.

La différence $\Delta' = s'_1 - s'_0 = 7\,071,068 - 6\,666,667 = 404,401$ km. On vérifie que $\Delta' < \Delta_m$

3°) Prolongeons le méridien PA jusqu'à l'équateur en A' et le méridien PB jusqu'à l'équateur en B', soit H le milieu de A'B'. Il est clair que le méridien bissecteur de l'angle P est normal en H à l'équateur. Pour évaluer l'écart IV du vertex au parallèle AB, nous le considérons comme égal à la différence HV - HI. Pour obtenir HV calculons son complément VC. Dans le triangle sphérique ACV $\widehat{AP} = \pi/2 - \varphi''$, l'angle $\widehat{ACV} = \pi/4$ de sorte que la règle de Néper donne :

$$\cos \frac{\pi}{4} = \cot \left(\frac{\pi}{2} - \varphi'' \right) \tan PV = \tan \varphi'' \times \tan PV \quad \text{d'où : } \tan PV = \frac{1}{\sqrt{2} \tan \varphi''}$$

La distance de V à l'équateur $HV = 90^\circ - PV$, $\tan HV = \tan (90^\circ - PV) = \cot PV$, $\tan HV = \sqrt{2} \tan \varphi''$

Il en résulte que : $IV = HV - HI = \arctan(\sqrt{2} \tan \varphi'') - \varphi''$

Pour que IV soit maximal il faut annuler sa dérivée par rapport à φ .

Rappelons que pour $z = \arctan y$ on a $z' = \frac{y'}{1+y^2}$ ou $y = \sqrt{2} \tan \varphi''$

$$\text{Dès lors } (IV)_{\varphi} = \frac{\sqrt{2}(1 + \tan^2 \varphi'')}{1 + 2 \tan^2 \varphi''} - 1 = 0 \quad \sqrt{2}(1 + \tan^2 \varphi'') = 1 + 2 \tan^2 \varphi'' \quad \tan^2 \varphi'' (\sqrt{2} - 2) = 1 - \sqrt{2}$$

$$\tan^2 \varphi'' = \frac{1 - \sqrt{2}}{\sqrt{2}(\sqrt{2} - 2)} = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad \text{d'où : } \tan \varphi'' = \frac{1}{\sqrt{\sqrt{2}}} = 2^{-\frac{1}{4}} \text{ c.q.f.d.}$$

ou $\tan \varphi'' = 0,840\,896\,415$ et $\varphi'' = 40,060\,359\,03^\circ$ et $\cos \varphi'' = 0,765\,366\,864$

Dans ces conditions $s_1 = R \cos \varphi'' \times \frac{\pi}{2}$ Comme $R \frac{\pi}{2} = 10\,000$ Km $s''_1 = 10\,000 \times 0,765\,366\,864$

$$s''_1 = 7\,653,669 \text{ km} \quad s''_0 = 2 \widehat{AV}$$

Dans le triangle sphérique rectangle en V : APV on a d'après la règle de Néper :

$$\sin AV = \sin(90^\circ - \varphi'') \sin \frac{\pi}{4} \quad \sin AV = \cos \varphi'' \times \frac{\sqrt{2}}{2} = 0,5411961 \quad \widehat{AV} = 32,765\,104\,52^\circ$$

$$s''_0 = 2 \widehat{AV} = 65,530\,209\,04^\circ \quad \text{et en km } s''_0 = 65,53020904 \times \frac{10000}{90} = 7281,134 \text{ Km}$$

$$\Delta'' = s''_1 - s''_0 = 7\,653,669 - 7\,281,134 = 372,535 \text{ km}$$

$$\text{Calcul de } \widehat{HV} \quad \widehat{HV} = \arctan(\sqrt{2} \times 0,840896415) = 40,06035903^\circ$$

$$= \arctan 1,189\,207\,115 = 40,060\,359\,03^\circ$$

$$= 49,939\,640\,96 - 40,060\,359\,03 = 9,879\,281\,933^\circ$$

$$\text{et en km : } 9,879\,281\,933 \times \frac{10\,000}{90} = 1\,097,698 \text{ Km}$$

Récapitulation :

φ	Δ
$\varphi'' = 40,0603^\circ$	$\Delta'' = 372,535 \text{ km}$
$\varphi' = 45^\circ$	$\Delta' = 404,401 \text{ km}$
$\varphi_m = 52,0105^\circ$	$\Delta = 421,754 \text{ km}$

Il y a bien cohérence : $\Delta'' < \Delta' < \Delta_m$ pour $\varphi'' < \varphi' < \varphi_m$.