

# xvz

Éditée par l'  
Association  
Française de  
Topographie  
**n°106**

## La maison des Sancerre ou le "territoirium" inventé

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



**PHOTOGRAMMÉTRIE  
Modélisation 3D**

**Hommage à Roger Schaffner**



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

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

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

**Rédacteur en chef**  
Jean-Pierre Maillard  
Urbaniste, Géomètre-Expert Foncier,  
Marne-la-Vallée

**Comité de Rédaction**  
Pierre Grussenmeyer  
Professeur des universités  
INSA de Strasbourg  
Tania Landes  
Maître de Conférences  
INSA de Strasbourg  
Stéphane Durand  
Enseignant-Chercheur  
ESGT Le Mans

**Responsable du site Internet**  
Tania Landes

**Publicité**  
Chantal Holdrinet  
aft78@wanadoo.fr  
Tél. : 01 39 53 98 93

**Conception et maquette**  
Dorothée Picard

**Abonnements :** Evelyne Mesnis  
**Autre publication :** L'annuaire de l'AFT

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

**Dépôt légal**  
1<sup>er</sup> trimestre 2006 ISSN 0290-9057  
N° CPPAP : 01 11 G 80 866

**Tirage de ce numéro :** 1 600 ex

**Abonnement annuel**  
France CEE : 73 €  
Etranger (avion, frais compris) : 76 €  
Les règlements payés par chèques  
payables sur une banque située hors  
de France doivent être majorés de 10 €  
Le numéro : 20 €  
Le bulletin d'adhésion est en p. 79  
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.

Mars 2006 • 1<sup>er</sup> trimestre

**Sommaire**

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

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

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

### ■ Editorial ..... 5

### ■ Info-Topo

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

### ■ Distinction

> Société de géographie :  
Grand prix de cartographie attribué  
à Raymond D'Hollander  
*François BELLEC* ..... 15

> Réponse de Raymond D'Hollander  
à l'éloge du contre-amiral Bellec  
*Raymond D'HOLLANDER* ..... 17

### ■ La vie des écoles

> L'Ecole chez soi fête les dix ans  
de son renouveau ..... 18

> Deux journées exceptionnelles  
à l'ENSG ! ..... 22

### ■ Lasergrammétrie

> Le relevé 3D Scanner au service  
du plus grand projet de réhabilitation  
de France ..... 24

### ■ Récréation

*Raymond D'HOLLANDER* ..... 25

### ■ Exposition

> La maison des Sancerre  
ou le "territoirium" inventé  
*Jacques RIFFAULT - Frédéric RAVATIN* ..... 26

### ■ Photogrammétrie



> Modélisation d'environnements  
complexes à partir de nuages de points  
et d'images acquis depuis le sol  
*Matthieu DEVEAU* ..... 29

> Expérimentation de la Transformation  
Linéaire Directe pour différentes  
applications en photogrammétrie  
*I. ZEROUAL - A. LIAZID* ..... 35

### ■ Economie

> Quelques statistiques sur le secteur privé  
de l'information géographique  
*Patrick SILLARD* ..... 41

### ■ Géométrie

> Les courbes, les splines cubiques et autres  
*Claude MILLION* ..... 45

### ■ Topographie



> N48°26'58" :  
le plus long parallèle de France  
*Kadidia DRAME - Guillaume BIZOUARD*  
*Alban VUILLEMEY* ..... 53

### ■ Géodésie

> Application de l'approche par les équations  
de la régression multiple pour le passage  
d'un datum à l'autre (cas de l'Algérie)  
*A. ZEGGAI - S. KAHLLOUCHE -*  
*R. AIT AHMED LAMARA - N. KHELOUFI* ..... 58

### ■ Hydrographie

> La carte marine électronique du futur  
est déjà en préparation  
*Mikaël LE GLÉAU* ..... 63

> Les hydrographes, ces marins qui "mesurent  
la mer" Activité des missions hydrographiques  
*Corinne BOUZÉLOC* ..... 64

### ■ Histoire

> 1806 : Premier volume de Base  
du Système métrique décimal  
*Suzanne DÉBARBAT* ..... 65

### ■ Topo-vécue

> Atteindre les sommets des départements  
français : un défi relevé  
*Paul COURBON* ..... 67



### ■ Art et Géométrie

> Felice Varini :  
La magie de la ligne  
*Jean-Pierre MAILLARD* ..... 72

### ■ Livres ..... 74

### ■ GSF

> De l'Océan Indien à la Loire...  
*François BODIN* ..... 78

Pour la recherche de nos annonceurs  
consulter la page 77.



# Lettre à Roger Schaffner président de l'AFT de 1986 à 1990 qui nous a quittés le 27 janvier 2006

Roger,

Tu m'aurais dissuadé d'écrire sur toi, mais pour toi, mieux vaut cette lettre qu'un article nécrologique !

Tous les mots cachent une peine sans mesure pour ta disparition.

Nous aimions t'aiguillonner comme un confident.

Tes amis n'ont pu te dire au revoir parce que tu as toujours été pudique sur tes misères.

Plus malade que tu ne le montrais, tu as subi mille souffrances à l'insu de tes amis.

Ton engagement au service de la vie associative restera dans nos mémoires. Certains ont relevé quel précurseur tu étais, visionnaire, tu avais su animer avec quelques collègues de très belles pages de l'histoire de la topographie, créateur de l'AFT avec Louis Catinot et Robert Vincent, réalisateur, initiateur du CITOP, homme de terrain, toujours ouvert au dialogue et plus encore...

Il est notoire que tu prenais très à cœur le sort de l'association et que tu ne cherchais pas à étaler tes mérites : géomètre-expert DPLG et, en 1982, diplômé de l'institut des hautes études de droit rural et d'économie agricole.

Nombre de tes amis m'ont dit avoir apprécié ton sens inné de l'équité. Jamais jugés sur leurs propres opinions, tu jaugeais en conscience et en toute impartialité. Beaucoup de tes collaborateurs ont été formés par toi à cette éthique.

Tes défauts, parlons-en. Ils faisaient contraste avec ta personnalité ; c'est ta sensibilité qui te poussait parfois à réagir avec vivacité, c'est ton exigence de vérité qui pouvait provoquer parfois tes colères. Mais comme tu étais drôle et gentil souvent... avec une pincée de cocasserie, à tout prendre, tu valais le détour.

Que tes amis ne m'en veuillent pas d'avoir mis en premier ton intégrité, esprit de service, dévouement et présence à tes multiples fonctions en particulier ton concours pour la rédaction du dictionnaire multilingue à la FIG.

Nos pensées vont à ton épouse et à ta famille dans cette douloureuse épreuve, ainsi qu'à l'ensemble de tes amis de l'AFT.

Mon rôle s'est voulu amical. Cette vie interrompue nous laisse une exigence :

***“continuer l'action pour promouvoir et développer l'AFT”***

André Bailly

# L'Ecole chez soi fête les dix ans de son renouveau

*En 1995, une petite centaine d'élèves inscrits, dix ans plus tard plus de 4 500, et entre-temps 30 000 cadres du BTP en activité déjà formés par l'Ecole chez soi dans les deux établissements de Boulogne d'une part et de Petite-Forêt dans le Nord d'autre part constituent le réalisé de l'Ecole.*

**T**el est le résultat remarquable que ses responsables ont voulu marquer et fêter en décembre 2005 au cours d'une manifestation dans ses locaux de Boulogne. Après un rappel historique sur les vicissitudes de l'enseignement par correspondance depuis sa création à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle par Gervais Pigier et Léon Eyrolles, et le brillant bilan des dix dernières années, son directeur, Jean-Michel Bourgois, a également fait valoir les dernières novations mises en œuvre dans la formation dispensée par l'Ecole chez soi.

## La pédagogie

### ■ Un enseignement asynchrone

L'enseignement à distance, supprimant par nature la relation de proximité physique entre le tuteur et les apprenants, a dû développer une pédagogie propre sur la base d'une gestion différente de la relation entre ces deux acteurs, en intégrant des temps d'intériorisation et de réflexion supplémentaire.

En effet, contrairement à l'enseignement "traditionnel", dit synchrone, où l'élève peut faire part dans l'instant d'une éventuelle incompréhension,



Photo de Jean-Daniel Roche.

l'enseignement à distance dit "asynchrone" oblige l'élève à essayer de trouver par lui-même le moyen de comprendre, et bien souvent, la réponse vient d'elle-même. Cette nouvelle pédagogie ne doit pas pour autant supprimer la relation humaine entre élève et tuteur, car dans l'enseignement à distance comme dans l'enseignement classique, la pensée et le vécu doivent aussi avoir leur part.

Si les correspondances, depuis le début de l'enseignement à distance, ont pu exister grâce aux échanges de courriers, elles ont quelque peu évolué avec l'apparition des nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC) qui ont apporté à la formation à

distance, souplesse, rapidité et fluidité ; elles n'ont cependant en rien modifié le concept même de la pédagogie.

L'Ecole chez soi s'est fixé comme mission d'accompagner ses élèves sur le chemin de la réussite. Elle a choisi sa pédagogie propre, à l'écart des méthodes d'enseignement et de formations dites "traditionnelles" (stages en entreprises, cours du soir), et propose des formations dans le secteur de la construction, en s'appuyant sur des postulats pédagogiques simples : un rythme d'apprentissage maîtrisé, une relation, bien qu'épistolaire, très forte entre l'élève et son professeur, et un effort personnel soutenu de chaque individu. Cette pédagogie a fait la

preuve de son efficacité auprès de l'ensemble des élèves, au cours de plus d'un siècle d'existence.

Bien sûr, les moyens techniques rappelés ci-dessus ont évolué et l'Ecole chez soi a pleinement utilisé les NTIC, sans pour autant se départir de ces outils de base que sont le crayon, la gomme, l'étude et la réflexion.

Concrètement, chaque nouvel élève est suivi par le même conseiller d'étude depuis sa première demande d'informations. Au moment de son inscription il reçoit un plan d'étude personnalisé lui indiquant, sous forme de planning, l'ordre à suivre pour l'étude de ses cours et la réalisation de ses devoirs. Ce document lui sert de base de travail, d'indicateur temps, sachant cependant que l'élève aura toute liberté pour alterner les périodes plus ou moins intenses lors de sa formation conformément à la devise de l'école : "Etudiez où vous voulez, quand vous voulez, à votre rythme".

Accompagnant ses premiers cours, il trouve également dans son colis une brochure appelée "Le Pilote", qui lui présente tous les services que l'Ecole chez soi met à sa disposition. Par exemple, chaque élève peut, via le site Internet de l'Ecole [www.ecolechez-soi.com](http://www.ecolechez-soi.com), suivre l'avancement de sa formation "en direct" : consultation des relevés de notes et des corrigés types des devoirs ; accès à toutes les questions déjà posées par d'autres élèves et aux réponses apportées par les professeurs, etc.

A la fin de sa formation, l'élève reçoit le diplôme de l'Ecole, qui bénéficie incontestablement d'une véritable reconnaissance auprès des entreprises du BTP. Les professionnels savent que le niveau de compétence obtenu est équivalent et quelquefois supérieur à celui des formations dites "classiques" et considèrent que le mode d'acquisition des connaissances constitue un atout supplémentaire. En effet, les élèves qui choisissent de se former à distance font la démonstration d'une motivation plus forte que la moyenne et d'une capacité de travail supérieure. Ce sont des arguments notoires qui pourront



Sculpture de Stéphane Chambry.

constituer un élément d'appréciation lorsqu'il s'agira, pour un employeur, de choisir entre plusieurs candidats.

Ainsi l'Ecole chez soi est fière de son passé. Elle l'est également pour ses méthodes pédagogiques, ses moyens de communication Ecole/élèves, la qualité de ses supports de cours et aussi par la valeur de ses professeurs.

### ■ Les professeurs

Depuis toujours, l'Ecole a mis un point d'honneur à sélectionner avec soin son équipe de professeurs. Tous sont des professionnels, qui ont été retenus en raison de leur niveau d'expertise, et qui ont su maintenir les principes de la tradition d'enseignement à distance en l'adaptant à l'évolution des techniques.

Leur rôle au sein de l'établissement est primordial. Ils ont, pour la plupart, la responsabilité de bâtir un cours. Les professeurs sont là pour corriger, commenter et annoter les devoirs, mais ils sont également disposés à épauler leurs élèves, pour leur permettre de progresser dans une relation plus personnelle.

Enfin et peut-être surtout, ce sont des professionnels, qui occupent dans leur métier des postes à responsabilité.

Pour remercier les participants à son X<sup>e</sup> anniversaire et ouvrir les portes de l'Ecole, en lien avec Le Moniteur des Travaux Publics et du Bâtiment, l'Ecole chez soi a offert une exposition intitulée "Les artistes du BTP". Ainsi, les 2, 3 et 4 décembre un sculpteur : Stéphane Chambry, un peintre : Marc Clémentin et un photographe : Jean-Daniel Roche, ont exposé plusieurs de leurs œuvres dans une belle salle du rez-de-chaussée, transformée en galerie pour l'occasion. XYZ et sa rubrique "Art et géométrie" ne peuvent que se féliciter de cette initiative soulignant la frontière tenue entre l'ouvrage d'art et l'art, entre l'artisan et l'artiste.

D'abord kinésithérapeute, Jean-Daniel Roche est devenu photographe autodidacte et graphiste. L'essentiel de son travail est une réflexion et une recherche sur l'identité et la construction identitaire.

Stéphane Chambry diplômé de l'Ecole nationale des arts décoratifs pratique son métier de designer industriel pendant quinze ans. Il recentre ensuite son action sur la création pour se consacrer à l'architecture intérieure, à la conception de meubles et enfin à la sculpture. Dans une recherche spirituelle, il espère un monde où l'homme prend toute sa dimension.

Diplômé de l'Ecole d'architecture des Beaux-Arts de Paris, Marc Clémentin a travaillé comme architecte à des projets prestigieux comme la Pyramide du Louvre et le Stade de France. En 2001, après quinze ans de vie professionnelle il se consacre à la peinture qui s'inscrit résolument dans le prolongement du mouvement Cobra.



## Les nouvelles technologies à l'Ecole Chez Soi

### ■ AUTOCAD s'étudie à distance

Pour la première fois en France et depuis la rentrée scolaire, le logiciel de dessin assisté par ordinateur le plus utilisé dans le secteur du BTP s'étudie à distance.

Joël CUNY et Patrice COURDE, agrégés de génie civil et forts d'une expérience d'enseignement d'AUTOCAD ont adapté leur cours à l'enseignement à distance. Le contenu de ce cours est en parfaite adéquation avec le cours de dessin dispensé par l'Ecole et les exigences du métier. Le kit de formation à AUTOCAD est constitué de deux CD-ROM : celui du logiciel AUTOCAD 2005 et celui du support de formation multimédia, ainsi que de deux fascicules papier, l'un de cours, l'autre de devoirs. L'apprentissage de l'utilisation d'AUTOCAD est découpé en six séries d'exercices, de difficulté croissante. Le point fort de la formation est le CD-Rom multimédia qui, par des captures vidéo d'écrans, permet l'acquisition des savoir-faire servant à construire un dessin avec le logiciel.

Trois parcours de formation à AUTOCAD sont proposés : le premier concerne les formations BTP, le second les formations d'architecture et le dernier, les formations de topographie. Une très grande majorité de nos élèves peut donc profiter de cette innovation.

De plus, toute personne désireuse de découvrir ce logiciel mais qui ne maîtriserait pas parfaitement les bases du dessin, se voit proposer par l'Ecole Chez Soi un parcours de formation spécifique, grâce à une acquisition progressive du dessin à la main et une sensibilisation à la technologie du bâtiment. Et dans les mois à venir, l'Ecole Chez Soi proposera également les niveaux "perfectionnement" et "expertise".

### ■ Des tests d'entrée en ligne

Depuis le mois de janvier 2006, l'Ecole Chez Soi propose aux candidats des tests d'entrée afin de vérifier leur niveau. Ces tests permettent de conforter les conseillers d'étude dans le choix de formation qu'ils proposent. Ils ont égale-



Peinture de Marc Clémentin.

ment pour but de rassurer les futurs élèves, qui ont parfois arrêté leurs études depuis longtemps et qui ont peur de ne pas avoir le niveau requis pour réussir pleinement leur formation.

Les professeurs ont tout d'abord pensé et rédigé des questions adaptées dans différentes matières ; ensuite, l'espace tests d'entrée a été conçu sur le site Internet de l'Ecole Chez Soi. Il existe actuellement des tests en mathématiques, français, physique, topographie, droit et économie gestion pour les niveaux 3, 4 et 5. Le responsable du service pédagogique, rédige actuellement des tests de compréhension de texte et des tests de culture artistique, destinés aux candidats qui souhaitent s'inscrire à la préparation au BTS Design d'espace. Concrètement, si un conseiller d'étude

considère que le niveau du candidat qu'il a en ligne est incertain, il lui proposera de passer ces tests. Il lui fera parvenir un identifiant et un mot de passe. Le candidat aura ensuite 48 heures pour se rendre dans l'espace tests d'entrée. Chaque batterie de tests doit être terminée dans un temps limité. Ensuite, en fonction des résultats, ce candidat sera conforté dans son choix ou se verra proposer une formation de moindre niveau. La direction de l'école a souhaité que l'événement s'ouvre en premier à tous ceux qui ont contribué au résultat : actionnaires, salariés, partenaires privilégiés, et plus largement aux acteurs de la profession en montrant la richesse des métiers de la construction. ●

► Pour tous renseignements : [www.ecolechezsoi.com](http://www.ecolechezsoi.com)

# Deux journées exceptionnelles à l'ENSG !

*Ce début du mois de février 2006 a vu se succéder trois événements forts au sein de l'ENSG, à Marne-la-Vallée. Tout d'abord le traditionnel Forum GPS, le 1<sup>er</sup> février. Puis le même jour, en fin d'après-midi, la tout aussi traditionnelle cérémonie de remise des diplômes. Enfin le lendemain, le 2 février, le Forum photogrammétrie.*

Pour le Forum GPS, le thème choisi cette année par les étudiants était "les réseaux GPS temps réel centimétriques permanents". Trois conférences et une table ronde ont rythmé cette journée. Laurent Morel, de l'ESGT, a rappelé les principes généraux de fonctionnement des réseaux permanents temps réel centimétrique en présentant les trois techniques actuellement utilisées, le VRS, le FKP et le MAC. Puis Manuel Plane du département topographie du Grand Lyon a présenté un historique des canevas à Lyon, puis la méthode adoptée pour leur passage en RGF93. De même il a fait un premier bilan de l'utilisation du réseau de Satinfo (réseau temps réel sur Lyon, encore expérimental à raison de 15 h par mois).

Enfin Jérôme Verdun, de l'ENSG, a présenté divers aspects de l'emploi de la géodésie en géophysique. La table ronde qui a clôturé ce Forum, co-animée par Serge Botton, Françoise Duquenne, Alain Harmel et Thierry Duquesnoy (tous de l'IGN) a duré environ 1 h 20 et de nombreuses questions ont été posées par l'assistance.

Les principaux thèmes en ont été :

- La future projection CC 9 zones : intérêt, mise en œuvre...
- Le nouvel arrêté de septembre 2003 sur les classes de précision.
- Comment passer en RGF93 pour une ville (utilisation de CIRCE ou nouvelle grille locale).
- Les réseaux temps réel et leurs rattachements au RGF93 (certains "opérateurs" de réseaux permanents refusent que leurs stations soient RGP).
- Le DGPS précis à partir du RGP.
- Les évolutions du RGP.
- Le calendrier prévisionnel de mise en route du réseau TERIA de l'OGÉ.

Une importante assistance se pressait dans la salle (240 personnes) et à l'exposition, avec en particulier une promotion entière d'élèves ingénieurs de deuxième année de l'ESGT, venus tout spécialement depuis Le Mans. Une séance de présentation de l'ENSG a été organisée à leur intention, puis les responsables des deux écoles sont venus présenter les différentes filières accessibles en troisième année, car les élèves de chaque école peuvent désormais y postuler indistinctement dans le cadre du rapprochement CNAM-IGN sur les cycles ingénieurs de l'ENSG et de l'ESGT.

La remise des diplômes de l'ENSG est intervenue ensuite à partir de 17 h 30. Tout d'abord Françoise Duquenne, présidente de l'Association des Anciens élèves de l'ENSG, a encouragé les nouveaux diplômés à rejoindre l'AAENSG. Puis, au nom d'AFIGÉO, Yves Rialland leur a souhaité la bienvenue à son tour, leur signalant qu'ils étaient adhérents d'office à cette association qui œuvre pour le développement du





secteur d'activités de la géomatique. Puis Michel Kasser, en tant que président de l'AFT, leur a rappelé l'importance de cette association et de la revue XYZ dans le paysage professionnel français, et leur a adressé en tant que directeur de l'ENSG ses chaleureuses félicitations.

Enfin le directeur général de l'IGN Bertrand Lévy, dans son allocution d'accueil, a rappelé le savoir-faire et l'originalité de l'ENSG qui assure des formations très diversifiées, du cycle de technicien aux cycles de masters. Certes l'école fait partie intégrante de l'IGN : c'est son centre de formation initiale et continue, mais l'ENSG forme aujourd'hui des spécialistes pour toute la communauté géomatique. L'ENSG est impliquée dans trois chantiers majeurs :

- Le rapprochement avec l'ESGT, dans le respect de l'identité des deux établissements, de leurs spécificités et de leur localisation.
- Un recrutement de plus en plus tourné vers des élèves non destinés à l'IGN, notamment pour le cycle ingénieurs. La création à la rentrée 2006 d'une Classe Préparatoire destinée aux établissements d'enseignement supérieur du Polytechnicum de Marne-la-Vallée, dans la ville voisine de Torcy, est l'une des étapes de ce processus.
- L'intensification, dans un monde en constante évolution, des actions de formation continue.

Orchestrée par le Directeur des Etudes Alain Dupéret, la remise des diplômes de douze cycles de l'école est alors intervenue, en présence des tuteurs, pendant que les images choisies pour illustrer les souvenirs de la scolarité défilaient sur l'écran. Et bien entendu, tout ceci s'est terminé, fort tard, autour de rafraîchissements, la nombreuse assistance ne souhaitant manifestement pas interrompre rapidement ces échanges amicaux.

**Pour le Forum de photogrammétrie** le 2 février, le thème choisi par les étudiants était "les centrales à inertie". L'assistance était un peu moins nombreuse que lors des précédents Forums (une centaine de personnes) compte tenu des annonces de grèves pour cette journée, mais elle a semblé très intéressée par les conférences et l'exposition tech-

nique. Tout d'abord, Didier Moisset (IGN) a présenté le résultat des expériences d'utilisation d'une centrale inertielle à bord des avions photographes pour améliorer le travail d'aérotriangulation. Ensuite, Julien Vallet (EPFL) a présenté l'intégration des techniques GPS/Inertielles et Lidar à la photogrammétrie, dans des applications de mesures de versants instables. Puis, Mikael Kais (INRIA) a présenté l'emploi de techniques de fusion multicapteurs à bord d'une voiture (GPS, inertielle, mesure de distances...) en vue d'une assistance à la conduite automobile, montrant la complémentarité entre l'approche de type robotique et celle de type photogrammétrie. Enfin, la dernière conférence, par Jérôme Ninot (DotMobil), relatait une participation au concours organisé aux USA (Challenge DARPA) pour un raid effectué de façon complètement autonome par des véhicules robotisés (180 km en zone désertique).

La table ronde finale, animée par M. Kasser, a permis aux participants d'échanger leurs idées sur toute une série de questions :

- Comment gérer les besoins de calibration dus aux systèmes inertiels ?
- Comment utiliser au mieux des matériels très précis mais extrêmement chers, et des matériels peu précis mais très bon marché ?
- Quelles sont les applications des systèmes inertiels aux levés terrestres ?
- Comment gérer les restrictions à l'export, en particulier pour des chantiers à l'étranger, des centrales inertielles fabriquées aux USA ?
- Comment faire progresser la recherche alors que les outils de traitement de données sont de véritables boîtes noires ?
- Quelles sont les précisions que l'on peut réellement espérer sur un chantier donné ?
- Dans la logique de la fusion GPS + inertielle, quel est l'impact du nombre croissant de stations GPS permanentes, en particulier du réseau Teria ?
- Quel est le domaine technique, de préférence grand public, qui va servir de locomotive à l'évolution du secteur ? Peut-être les assistances à la conduite automobile ? Ou la localisation à l'intérieur de bâtiments ? ●





## Le relevé 3D Scanner au service du plus grand projet de réhabilitation de France

**Marseille, deuxième agglomération urbaine du pays, fait peau neuve dans le quartier de la République. Le programme de rénovation de plus de 130 000 m<sup>2</sup> de logements et commerces le classe en tête des projets de cette ampleur sur le territoire national.**



S'articulant sur la rue de la République, véritable artère historique de la ville, ce projet de grande envergure a pour vocation de conforter son rôle d'axe urbain majeur de Marseille, reliant le centre historique au nouveau pôle tertiaire d'Euroméditerranée. Percée dans les vieux quartiers populaires du centre historique, entre 1862 et 1867, anciennement appelée "rue Impériale", la rue de la République reprend, à cette époque, un mode de réaménagement engagé à Paris, par le préfet Haussmann, sous l'autorité de Napoléon III. Pour la première fois sans doute dans l'Histoire, la ville est traitée dans son ensemble, originalité fondamentale de l'urbanisme du Second Empire, ce qui fera de Paris la ville la plus moderne d'Europe.

L'avenue "haussmannienne" est large et droite, des immeubles cossus la bordent par de longues façades en pierre de taille, à porte cochère, balcons et décorations sculptées. Après pratiquement un siècle et demi d'existence et en vue de conserver et restituer la qualité architecturale de ce patrimoine, Marseille-République maître d'ouvrage, en collaboration avec les architectes des bâtiments de France, ont commandé le relevé de toutes les façades.

La société T.I.T. (Travaux Informatique Topographie) prestataire de services a été retenue pour le relevé de 15 000 m<sup>2</sup> (plans de niveaux, coupes, plans masse, façades) du projet République. Compte tenu des délais de livraison impartis et du caractère très détaillé des façades, le recours à technologie 3D Scanner s'est imposé.

MC3D, distributeur France-Sud des solutions "3D Scanning Trimble", a été sollicité pour mener à bien la numérisation des façades en collaboration très étroite avec T.I.T. La concertation sur le rendu demandé et la méthode de travail à mettre en œuvre ont conduit à la décision de générer des "ortho images" pour permettre la numérisation des élévations sous MICRO STATION.

Pas moins de 330 000 000 de points X,Y,Z et de luminance ont été relevés en une semaine, pour la surface de 3 800 m<sup>2</sup> (résolution spatiale de 1 point tous les 3 mm).

La résolution des ortho images générées étant d'un pixel de 4 mm, il a été possible de numériser l'ensemble des détails composant les façades. Le maître d'ouvrage a trouvé la qualité visuelle et géométrique des ortho images saisissante. ●

### Contacts

**MC3D - Distributeur 3D Scanning TRIMBLE**  
Christian DEGAND (Détail de modénature numérisée)  
23, Parc Club du Millénaire  
34000 MONTPELLIER - FRANCE  
+33 04 67 71 22 41

**T.I.T (Nathaniel JUGET - Philippe DONATI)**  
27, rue Jean-Baptiste-Clément  
83130 LA GARDE - FRANCE - +33 04 94 21 90 42

■ par Raymond D'HOLLANDER

Soit ABC un triangle dont on désigne par  $a, b, c$  les longueurs respectives des côtés BC, CA, AB. Soit G le centre de gravité du triangle.

1 - Montrer qu'on a la relation vectorielle :  $\vec{GA} + \vec{GB} + \vec{GC} = 0$

2 - En calculant le carré scalaire  $(\vec{GA} + \vec{GB} + \vec{GC})^2$ , établir une relation vectorielle entre  $\vec{GA}, \vec{GB}, \vec{GC}$

3 - En déduire la relation :  $\overline{GA}^2 + \overline{GB}^2 + \overline{GC}^2 = \frac{a^2 + b^2 + c^2}{3}$

$\overline{GA}, \overline{GB}, \overline{GC}$  désignent les longueurs des segments GA, GB, GC.

*Solution dans le prochain numéro de XYZ.*

## Solution de la récréation mathématique du n° 105 d'XYZ

Soit  $\alpha$  la valeur des 5 angles du pentagone régulier. On sait que dans un polygone convexe de  $n$  côtés la somme des  $n$  angles a pour valeur :  $(n - 2) \times 180^\circ$ . Si  $n = 5$ , la somme est  $3 \times 180^\circ$  et comme le pentagone est régulier, la valeur de chacun de ses 5 angles est :

$$\alpha = \frac{3 \times 180^\circ}{5} = 108^\circ$$

Soit  $s$  la longueur du côté du pentagone régulier :

$$s = \frac{R}{2} \sqrt{10 - 2\sqrt{5}}$$

Soit  $a$  la longueur de l'apothème du pentagone régulier

$$a = \frac{R}{2} \left( \frac{\sqrt{5} + 1}{2} \right) \quad (\text{XYZ n° 102 page 57})$$

**Calcul des angles**  $\widehat{FAG} = \widehat{A}$ ,  $\widehat{AFG} = \widehat{F}$ ,  $\widehat{FGA} = \widehat{G}$

La droite GA est axe de symétrie de la figure et bissectrice de l'angle  $\widehat{BAE} = \alpha = 108^\circ$ . On a donc  $\widehat{BAG} = \frac{\alpha}{2} = 54^\circ$ .

Dans le triangle ABF l'angle  $\widehat{ABF} = 60^\circ + 108^\circ = 168^\circ$ , de sorte que les angles à la base du triangle isocèle ABF ont pour valeur :

$$\widehat{A_1} = \widehat{F_1} = \frac{180^\circ - 168^\circ}{2} = 6^\circ$$

Il en résulte que l'angle

$$\widehat{FAG} = \widehat{A} = \frac{\alpha}{2} - \widehat{A_1} = 54^\circ - 6^\circ = 48^\circ, \quad \widehat{A} = 48^\circ$$

Soit à calculer l'angle  $\widehat{AFG} = \widehat{F}$ . Pour cela calculons d'abord l'angle au sommet C du triangle FCG, qui a pour valeur :  $360^\circ - \alpha - 60^\circ - 60^\circ$ , soit pour  $\alpha = 108^\circ$  :  $\widehat{C} = 132^\circ$ . Il en résulte que les angles à la base du triangle isocèle AFG ont pour valeur :

$$\widehat{F_2} = \widehat{G_2} = \frac{180^\circ - 132^\circ}{2} \quad \text{soit} \quad \widehat{F_2} = 24^\circ$$

$$\text{L'angle } \widehat{AFG} = \widehat{F} = 60^\circ - \widehat{F_1} + \widehat{F_2} = 60^\circ - 6^\circ + 24^\circ = 78^\circ, \quad \widehat{F} = 78^\circ$$

Soit à calculer l'angle  $\widehat{FGA} = \widehat{G}$ . Il est clair que  $\widehat{G} = \widehat{G_2} + \widehat{G_1}$ . Or

$$\widehat{G_1} = \frac{60^\circ}{2} = 30^\circ \text{ d'où } \widehat{G} = 24^\circ + 30^\circ = 54^\circ, \quad \widehat{G} = 54^\circ$$

$$\text{Vérification : } \widehat{A} + \widehat{F} + \widehat{G} = 48^\circ + 78^\circ + 54^\circ = 180^\circ$$

**Calcul des longueurs des côtés GA, AF, FG.**

La droite GA, axe de symétrie rencontre en H le côté CD auquel elle est perpendiculaire. OH est l'apothème  $a$  du pentagone, GH la hauteur du triangle équilatéral de côté  $s$ , donc

$$GH = s \times \sin 60^\circ = \frac{\sqrt{3}R}{4} \sqrt{10 - 2\sqrt{5}}$$

$$\text{Dès lors : } GA = GH + HO + OA = \frac{\sqrt{3}R}{4} \sqrt{10 - 2\sqrt{5}} + \frac{R}{4} (\sqrt{5} + 1)$$

$$GA = \frac{R}{4} \left[ 5 + \sqrt{5} + \sqrt{3} \sqrt{10 - 2\sqrt{5}} \right]$$

Calcul de AF

La résolution du triangle isocèle ABF donne :

$$AF^2 = s^2 + s^2 - 2s^2 \cos 168^\circ = 2s^2 (1 - \cos 168^\circ)$$

$$AF^2 = 2 \times \frac{R^2}{4} (10 - 2\sqrt{5}) \times 1,97815 = 0,989075 (10 - 2\sqrt{5}) \times R^2$$

$$AF = 0,99452 \sqrt{10 - 2\sqrt{5}} \times R$$

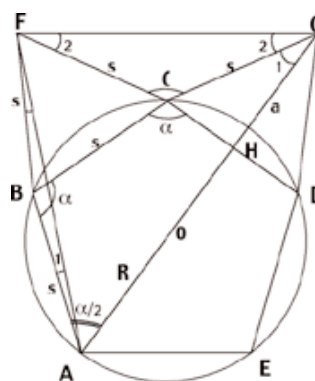
Calcul de FG

La résolution du triangle FCG donne :

$$FG^2 = s^2 + s^2 - 2s^2 \cos C = 2s^2 (1 - \cos 132^\circ) = 2 \times \frac{R^2}{4} (10 - 2\sqrt{5}) \times 1,66913$$

$$FG^2 = 0,834565 (10 - 2\sqrt{5}) \times R^2$$

$$FG = 0,91354 \sqrt{10 - 2\sqrt{5}} \times R$$



Application numérique

En remplaçant  $R$  par 4 cm dans les expressions de GA, AF, FG, on trouve respectivement :

$$GA = 11,31 \text{ cm}$$

$$AF = 9,35 \text{ cm}$$

$$FG = 8,59 \text{ cm}$$

Vérification :

$$\frac{GA}{\sin \widehat{F}} = \frac{AF}{\sin \widehat{G}} = \frac{FG}{\sin \widehat{A}}$$

$$\frac{11,31}{0,97815} = \frac{9,35}{0,80902} = \frac{8,59}{0,74314} = 11,56$$



# La maison des Sancerre ou le "territoirium" inventé

■ Jacques RIFFAULT - Frédéric RAVATIN

*S'il est un lieu où la cartographie thématique dynamique trouve une application pour le moins originale, c'est bien à la Maison des Sancerre à Sancerre, où se trouvent réunis tous les éléments retraçant l'histoire de ce terroir vignoble, dont les origines remonteraient à l'Antiquité. En 582, Grégoire de Tours mentionne l'existence du vignoble sancerrois dans ses écrits.*

Dans les années soixante, les vignerons, dès cette époque, souhaitant créer une vitrine du vignoble sancerrois, s'intéressaient déjà à un ancien hôtel particulier datant de la Renaissance. Mais ce n'est que 40 ans plus tard que ce projet va se concrétiser.

Un énorme chantier de plus de trois années sera nécessaire pour restaurer ce bâtiment gravement dégradé, mais le résultat est à la hauteur des ambitions de ses promoteurs et depuis le 10 juin 2005, cette maison est ouverte au public.

Sur plus de 350 m<sup>2</sup> d'exposition, le visiteur découvre le vignoble de Sancerre et ce qui fait son originalité, grâce à une réunion des technologies les plus modernes : maquettes en relief, projec-

tion d'hologrammes, dispositif audio-vidéo d'animation et parmi cela, un grand plan relief reproduisant, à l'échelle, le terroir du Sancerre avec ses courbes de niveau, sert de support de projection.

Pour en savoir plus, nous sommes allés à la rencontre du concepteur de ce dispositif, Frédéric RAVATIN, un ancien du BRGM (ceci explique cela) qui a créé la société CREATIME spécialisée dans l'ingénierie culturelle.

**XYZ : Pourquoi cette idée d'installer une maquette animée du territoire au cœur de l'exposition ?**

**F. Ravatin :** *Elle s'imposait, le point de départ et l'aboutissement des vins de Sancerre, l'alpha et l'oméga de ces vins*



*merveilleux, c'est le terroir ou plutôt ce sont les terroirs. Il nous fallait un outil qui permette d'exprimer à la fois la notion de territoire, mais aussi la qualité – voire la beauté – d'un territoire : le territoire transfiguré en terroirs. C'est ce que nous avons fait.*

**XYZ : Avec ce système de projection sur une carte en relief peinte en blanc ?**

**F. R. :** *Oui, c'est un dispositif que nous avons inventé pour un château, le château de Malbrough (le Malbrough de la chanson), pour illustrer la bataille qui opposa les troupes anglaises commandées par Malbrough\* et les troupes du Maréchal de Villars, en 1705, autour du château de Manderen, en Moselle. A l'époque, nous avons réalisé un petit plan relief de la géo-*

\*déformé de Marlborough, nom véritable du personnage.



graphie du terrain de un mètre par un mètre, sur lequel était projeté le mouvement des forces en présence au moyen d'un simple vidéo-projecteur. C'était magique car le public, placé tout autour de ce plan-relief animé, voyait les troupes se déplacer, exploitant les ravins, bloquant les voies de communications naturelles, etc.

**XYZ : Mais à Sancerre, le plan-relief, animé par la même technique, est beaucoup plus grand ?**

**F. R. :** Il mesure 4 mètres sur 3, il est posé au ras du sol et il est animé par 4 projecteurs numériques synchrones, qui forment une seule image.

Ce qui est magnifique, outre sa mise en scène dans une cave voûtée, c'est que nous avons exploité des images satellites qui sont reprojctées sur le relief du territoire concerné. On est aujourd'hui familiarisé avec les images Spot et les photographies aériennes en couleur. Mais imaginez-les en relief et animées !... Nous voyons passer des nuages, le vert des vignes devient bleu ou rouge et les terroirs, issus de la géologie, se distinguent, les couches géologiques apparaissent et se meuvent.

**XYZ : Vous pourriez aller encore plus loin, grâce à l'imagerie numérique ?**

**F. R. :** Bien sûr ! Le numérique permet de recréer toutes les situations, tous les phénomènes naturels. De plus, il suffit d'avoir la distance de projection nécessaire pour augmenter la taille du plan-relief.

La France en relief, parcourue par le jour et la nuit, sa météo, ses saisons, ses climats est tout à fait à notre portée.

**XYZ : Une sorte de planétarium appliqué à notre territoire en somme ?**

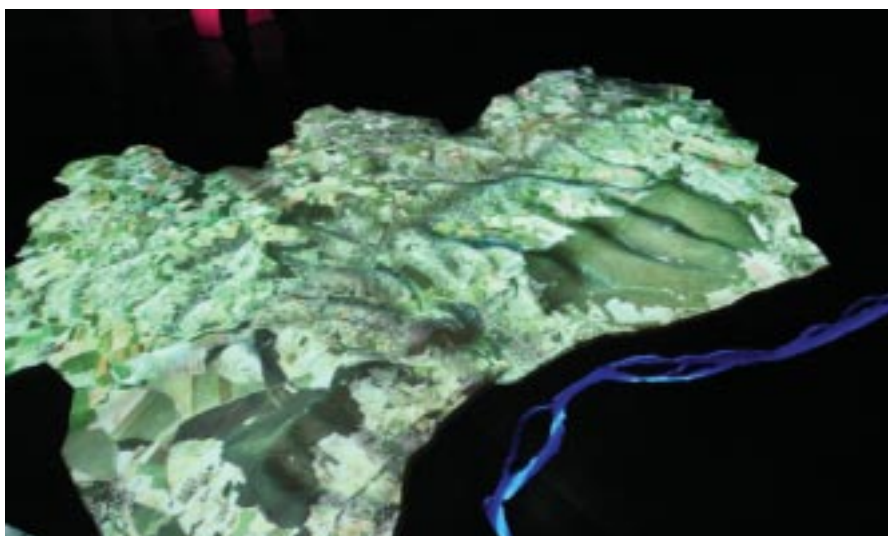
**F. R. :** Oui, exactement, sauf qu'au lieu de regarder en haut, vous regardez en bas ! ●

**Maison de Sancerre**

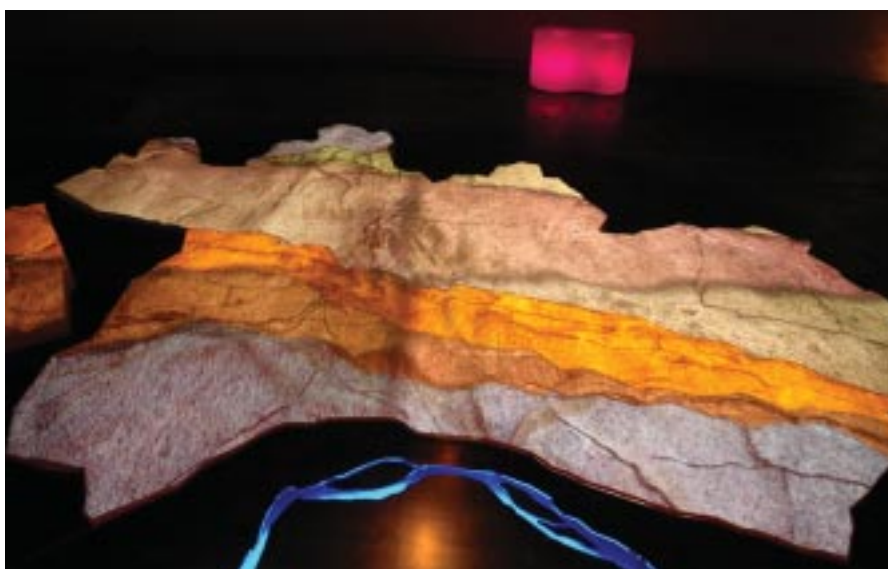
3, rue du Méridien

18300 SANCERRE

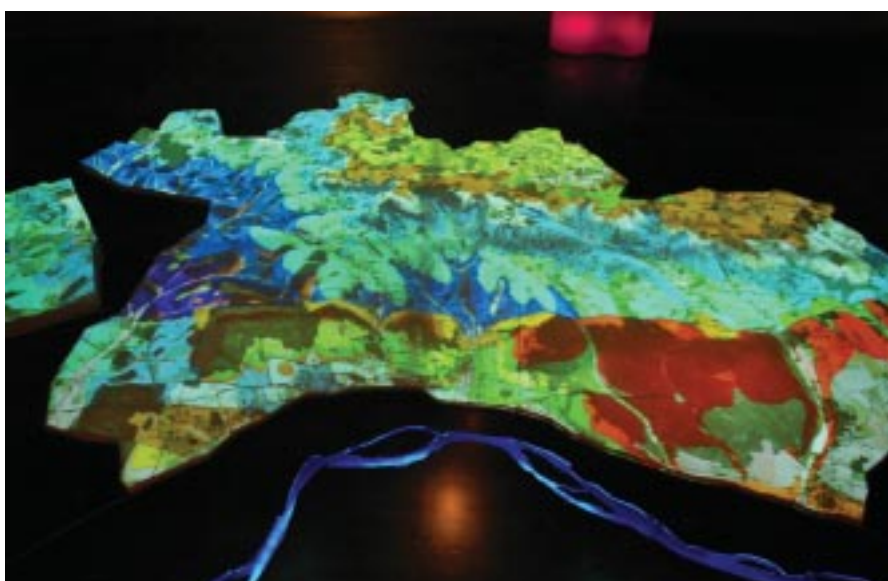
Tél. : 02 48 54 11 35



Modélisations des parcelles.



Carte géologique.



Carte géologique.



# L'AFT organise la 4<sup>e</sup> édition du concours : Prix de l'AFT pour les Jeunes Ingénieurs Diplômés en Topographie

***Le conseil de l'AFT de septembre 2001 a approuvé le projet de création d'un prix de l'AFT destiné aux jeunes ingénieurs diplômés en Topographie. Les étudiants des Ecoles d'Ingénieurs sont invités à soumettre au comité de rédaction de la revue XYZ un article portant sur leur travail de fin d'études d'ingénieur géomètre-topographe. Les meilleurs articles seront récompensés et publiés dans la revue XYZ. Un montant global de 1 500 € est prévu en 2006.***

### Conditions de participation :

- être âgé(e) de moins de 26 ans ;
- joindre l'attestation du diplôme d'ingénieur ;
- être membre de l'AFT (être à jour de cotisation) ;
- proposer au comité de rédaction de la revue XYZ un article de 6 pages au moins en français (avec un résumé en anglais), en vue d'une publication dans la revue avec une présentation de l'ingénieur (résumé du curriculum vitae) ; les consignes aux auteurs sont téléchargeables sur le site Internet de l'AFT : <http://www.aftopo.org>
- certifier que l'article n'a pas été soumis ou publié dans une autre revue ;
- date limite pour la proposition des articles : le 1<sup>er</sup> octobre 2006 (pour les projets présentés dans les Ecoles en 2005 et avant).

### Comité d'attribution :

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

### Publication des résultats :

- les candidat(e)s seront informé(e)s individuellement des résultats au plus tard le 1<sup>er</sup> mars 2007 ;
- les résultats du concours seront publiés dans la revue XYZ dans l'année suivant la publication des résultats ;
- le Président de l'AFT remettra les prix à l'occasion d'une manifestation organisée par l'AFT en 2007.



#### ASSOCIATION FRANÇAISE DE TOPOGRAPHIE

(association régie par la loi du 1<sup>er</sup> juillet 1901 - N° SIRET 31876201000029 - CCP 16 300 03Y PARIS)  
Bureau: 2, avenue Pasteur - 94165 SAINT-MANDE Cedex - Tél.: 01 43 98 84 80 - Fax: 01 43 74 72 80  
Courriel: [info@aftopo.org](mailto:info@aftopo.org) - Internet: <http://www.aftopo.org>  
Secrétariat du lundi au vendredi de 9 heures à 17 heures

# Modélisation d'environnements complexes à partir de nuages de points et d'images acquis depuis le sol

■ Matthieu DEVEAU

*Cet article aborde certaines problématiques traitées par la thèse de Matthieu Deveau, ingénieur géomètre et doctorant.*

*Cette thèse se déroule au laboratoire MATIS de l'IGN, en partenariat avec TRIMBLE/MENSI et avec EDF R&D, et sa soutenance est prévue en 2006. Ces travaux ont pour objectif de proposer une solution pour la modélisation d'environnements complexes (architecture, industrie, etc.) exploitant à la fois les informations provenant d'une image numérique et celles issues d'un nuage de points 3D obtenus à partir d'acquisitions terrestres.*

### ■ mots-clés

modélisation 3D,  
orientation relative,  
segmentation 2D-3D,  
fusion image-LASER

**L**essor des scanners à balayage suscite des changements dans le monde de la topographie depuis maintenant une quinzaine d'années. Ces scanners viennent en concurrence de la photogrammétrie sur de nombreux chantiers. Ils ont en particulier l'intérêt de fournir immédiatement une description de la scène sous forme de nuages de points denses. Mais lorsqu'il faut produire une description structurée de la scène, sous forme de primitives, et construire un modèle géométrique, on se confronte toujours, comme pour la photogrammétrie, à une saisie interactive, qui au lieu de se traduire par une saisie dans un environnement stéréoscopique, se déroule en monoscopie sur des fenêtres permettant de manipuler le nuage de points en 3D au travers d'une vue perspective.

Pour modéliser une scène en éléments géométriques, il faut pouvoir distinguer à quel élément chaque ensemble de points appartient. Le principe est de

sélectionner chaque portion du nuage de points correspondant à un objet à partir d'un outil de saisie polygonale dans une fenêtre de visualisation 3D. Pour pouvoir isoler convenablement chaque objet, il est souvent nécessaire de renouveler la sélection. Chaque sélection dans la fenêtre 3D correspond en effet à un cône et la sélection à partir de ce cône ne se soucie pas de la présence de plusieurs groupes de points appartenant à plusieurs objets distincts.

La saisie procède donc par itérations de deux opérations, l'opération de sélection polygonale, et la rotation du nuage de points. Indépendamment des questions de méthodologies propres à la lasergrammétrie et à la photogrammétrie, ce mode de traitement conduit à des temps de modélisation globalement comparables à ceux obtenus par levé photogramétrique. Dans tous les cas ces opérations restent très longues, et, dans certains cas, pénibles. Le problème de la segmentation des nuages de

points reste donc un point crucial pour la mise en valeur de la lasergrammétrie dans une optique de modélisation. Mais plus qu'une valorisation d'une technique par rapport à une autre, n'est-il pas nécessaire de s'accorder sur les atouts respectifs de chacune d'entre elles et de profiter de ces atouts ?

Au vu des caractéristiques de l'acquisition photographique et de l'acquisition LASER, le premier constat possible est que l'image numérique peut être utilisée comme un complément géométrique du nuage de points. Le nuage de points réalise un échantillonnage ou une discrétisation de la surface mesurée. Les limites des objets sont donc, dans de nombreux cas, des structures difficiles à localiser correctement. L'image réalise également une discrétisation de la surface, mais le processus d'enregistrement de l'information conduit à une continuité du signal : deux pixels contigus partagent des informations provenant du même point dans l'espace. Aussi, les processus de traitement d'image permettent de localiser avec une grande précision les ruptures du signal dans les images, ruptures qui correspondent en grande partie aux limites des objets, que l'on a du mal à estimer à partir du nuage de points seul. La précision de localisation des ruptures du signal atteint des ordres de grandeur sub-pixellaires lorsqu'on dispose d'un bon rapport signal à bruit dans l'image.

Partant du principe que l'image peut enrichir l'information géométrique

...



... contenue dans le nuage de points, il faut s'intéresser à la configuration d'acquisition des données. Nous considérons ici une image prise d'un point de vue proche de celui du scanner, avec une différence de résolution en faveur de l'image pour exploiter la qualité géométrique de celle-ci.

La proximité des points de vue a plusieurs conséquences :

- la perspective est la même, donc l'aspect des objets est le même dans l'image et dans le nuage de points (les déformations géométriques sont identiques, et les parties cachées sont quasiment les mêmes). C'est utile pour la segmentation : il y a superposition complète des données ;
- corollaire du premier point, l'orientation du nuage de points par rapport à l'image est facilitée par la ressemblance des points de vue, l'espace de recherche pour l'appariement d'éléments étant réduit ;
- lorsqu'on cherche à déterminer la position d'une limite d'objet, la résolution supérieure de l'image permet une meilleure localisation de la position de la discontinuité dans le plan parallèle au plan optique.

L'utilisation d'une image de résolution supérieure à la résolution du nuage de points permet de tirer partie de la qualité géométrique de l'image. La résolution supérieure de l'image permet à la fois de mieux localiser la discontinuité et de diminuer la résolution de numérisation et donc les temps d'acquisition et de post-traitement.

De plus, la géométrie de perspective conique est plus rigide dans le cas de l'acquisition photographique que dans celle du scanner : la matrice CCD est constituée d'un seul tenant, donc l'image obtenue également, ce qui n'est pas le cas pour le scanner LASER, qui parcourt l'ensemble de la scène "imagée" par rotations autour de deux axes. De cette différence de rigidité dans les systèmes d'acquisition, on peut faire l'hypothèse qu'un recalage global des différentes stations sera meilleur en s'appuyant sur les images seules, qu'en utilisant les nuages de points seuls. Mais si on associe LASER et image, on peut supposer obtenir un recalage encore meilleur, puisqu'on ajoute des observations supplémentaires. L'enjeu est d'ajouter des observations provenant de l'association image-LASER qui ne dégradent pas les observations pro-

venant des images seules. Autrement dit, il faut obtenir des incertitudes de position et d'orientation issues de la combinaison image-LASER inférieures à celles issues d'une aérotriangulation purement formée à partir des images.

Remarquons que l'utilisation d'un seul point de vue LASER offre la possibilité de travailler dans la géométrie d'une image (grille de m lignes x n colonnes) pour les traitements sur le nuage de points. Le mode de balayage du scanner par variation angulaire constante en coordonnées sphériques permet en effet de représenter les résultats de l'acquisition dans la géométrie d'une image, chaque pixel contenant une information relative à une direction dans l'espace des coordonnées sphériques. Cette topologie a l'avantage d'une gestion simple et rapide des relations de voisinage. Mais l'intérêt majeur de l'image réside dans l'interprétation visuelle directe de la scène observée. Dans un nuage de points "manipulé" dans une interface 3D, les effets de transparence dus à l'échantillonnage LASER font qu'une nappe de points située derrière la surface que l'on regarde se superpose avec les points appartenant à l'objet ce qui nuit à l'interprétation de la scène.

Dans une vue statique constituée depuis le point de vue d'acquisition, le problème ne se pose plus, puisqu'on se trouve dans une configuration photographique, c'est-à-dire dans une configuration de perspective conique rigide. On se trouve en plus dans une situation que le cerveau humain a l'habitude d'interpréter, et sur laquelle il est plus à même de réaliser une analyse, puisqu'il s'agit d'une image 2D. (L'idéal reste de faire cette analyse sur une image stéréoscopique, dont les caractéristiques permettront de se rapprocher de la vision humaine).

La stratégie choisie s'appuie donc sur plusieurs propriétés géométriques favorables à la reconstruction. Les points étudiés dans cette thèse s'articulent autour de cette stratégie générale. D'abord, il a été nécessaire d'examiner l'orientation du nuage de points par rapport à l'image. Une fois cette orien-



**Figure 1 :** Images calculées à partir des informations collectées par le scanner. Image de profondeur (gauche), image d'intensité et d'ombrage (droite).

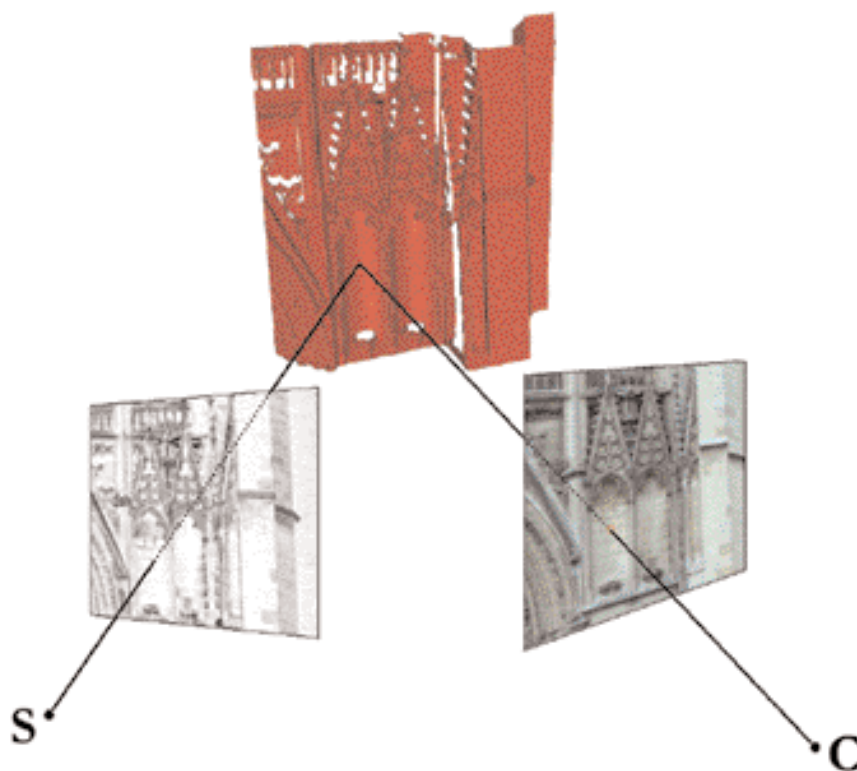
tation déterminée, la segmentation de la scène a été abordée. Il s'agit là de séparer les différents éléments présents dans la scène. Enfin, la segmentation étant connue, l'estimation des structures géométriques présentes a été orientée vers la reconstruction des surfaces construites par extrusion d'un profil en translation ou en rotation par rapport à une droite directrice.

## Orientation du nuage de points par rapport à l'image

L'orientation du nuage de points par rapport à l'image correspond à un problème bien connu de la communauté. Il s'agit de déterminer les paramètres de rotation et de translation entre les repères respectifs des deux jeux de données. Nous considérons ici les paramètres internes associés à l'image comme connus. Cette orientation doit être la plus précise possible, pour assurer la cohérence de la modélisation à partir des deux jeux de données, image et nuage de points. C'est donc une étape cruciale dont dépend fortement la suite des traitements.

Plusieurs solutions existent pour l'orientation d'une image par rapport à un nuage de points. L'une d'entre elles consiste à rendre solidaires les deux capteurs. La liaison rigide peut alors être étalonnée régulièrement. Les paramètres d'orientation n'ont pas à être estimés à chaque acquisition. Si cette solution est simple, elle limite les possibilités d'adapter l'acquisition à la configuration de la scène. Aussi, le problème d'orientation est considéré dans une configuration légèrement plus souple, où les capteurs sont supposés proches mais pas nécessairement solidaires.

La proximité des points de vue, on l'a dit, génère deux perspectives très semblables. Aussi, il est possible d'apparier des éléments présents dans la scène sans grande ambiguïté et sans difficulté. Pour obtenir une bonne estimation de l'orientation, nous souhaitons détecter un maximum d'éléments à apparier. Nous nous sommes basés sur un détecteur de coins et un détecteur de



**Figure 2 :** Géométrie d'appariement des points entre image d'intensité LASER et image photographique.



**Figure 3 :** Projection de l'image haute résolution sur le nuage de points triangulé.

contour pour extraire des points caractéristiques et des segments dans l'image. Ces éléments peuvent être appariés avec leurs homologues par corrélation à proximité de leur projection dans la vue LASER (cf. figure 2). Les points sont détectés dans des zones planes et texturées tandis que les segments sont détectés au niveau des discontinuités géométriques. Ils sont donc complémentaires. L'estimation précise des éléments dans l'image et dans le nuage de points conduit à une bonne orientation des deux jeux de données, comme l'illustre la figure 3, où le nuage de points est triangulé, et l'image est projetée sur la surface à partir de l'orientation calculée. Cette approche présente un grand atout : il n'est pas nécessaire de disposer des cibles artificielles dans la scène ou de saisir des éléments dans l'image et dans le nuage de points pour connaître l'orientation relative des données.

## Segmentation conjointe du nuage de points et de l'image

La segmentation reste un problème complexe. Elle a pour but de séparer les différents éléments présents dans la scène. Elle a été traitée dans un formalisme de segmentation hiérarchique, maîtrisé en particulier grâce aux travaux de Laurent Guigues. La segmentation hiérarchique procède par fusion de régions, à partir d'une sur-segmentation de la scène. La sur-segmentation correspond à une division de la scène en petites régions. Elle est réalisée dans l'image par un algorithme de Ligne de Partage des Eaux, qui s'appuie sur les contours présents dans l'image.

La segmentation hiérarchique présente l'intérêt de proposer un grand nombre de solutions possibles parmi lesquelles la segmentation recherchée doit se trouver. D'autre part, cette approche

permet de s'adapter à la présence d'objets à des échelles variées.

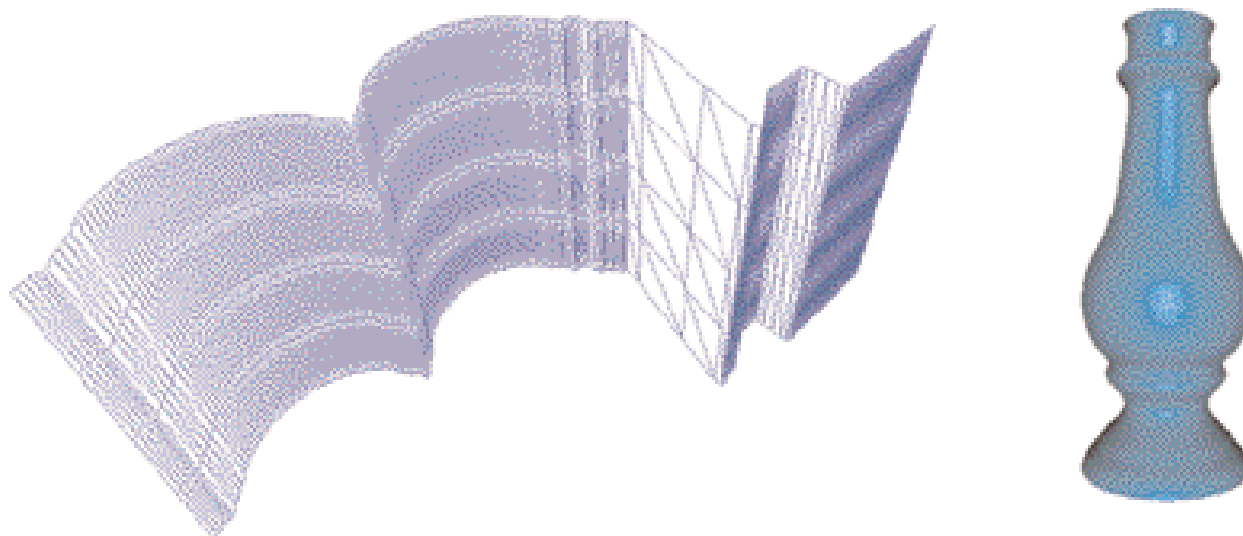
La fusion des régions est réalisée en fonction d'une énergie associée aux données. Ici, l'énergie est définie à partir d'informations géométriques. A une région donnée dans l'image correspond un ensemble de points 3D provenant de l'acquisition LASER. L'énergie associée à chaque région est définie de telle sorte à favoriser la proximité géométrique des points à des plans.

Certaines étapes de construction de la hiérarchie prennent en compte également la radiométrie. Le résultat est une segmentation de la scène à la résolution de l'image, où les structures sont séparées à la fois grâce à des critères géométriques et grâce à des critères radiométriques. La difficulté tient en partie du besoin de ne manquer aucune discontinuité géométrique, à la phase de sur-segmentation. Puisque ces discontinuités ne



**Figure 4 :** Une étape de segmentation pour la construction du graphe hiérarchique. Vue sur la chapelle du château de Vincennes.





**Figure 5 :** Surface de translation - coupe des alcoves ; et surface de révolution estimées à partir du nuage de points.

sont pas nécessairement toutes présentes dans l'image numérique, il faut détecter ces discontinuités dans le nuage de points et les incorporer dans l'image.

## Reconstruction de primitives géométriques

La reconstruction de primitives géométriques se veut la plus générale possible. Nous ne supposons aucune connaissance de modèles a priori en dehors des plans, des surfaces profilables. Les surfaces plus complexes seront triangulées. A partir de cet ensemble de formes, la grande majorité des éléments pré-

sents dans une scène peut être modélisée. Les surfaces construites par extrusion d'un profil sont elles-mêmes très libres, puisque leur profil peut être quelconque. L'estimation de ces surfaces est divisée en deux étapes : calcul de la droite directrice puis estimation du profil (pour plus de détails, consultez le rapport de thèse). Le profil est déterminé par projection du nuage de points par rotation ou translation du plan par rapport à la droite.

Les prochains développements devront se tourner vers la reconnaissance de formes dans le profil, pour fournir des modèles paramétriques, qui pourront

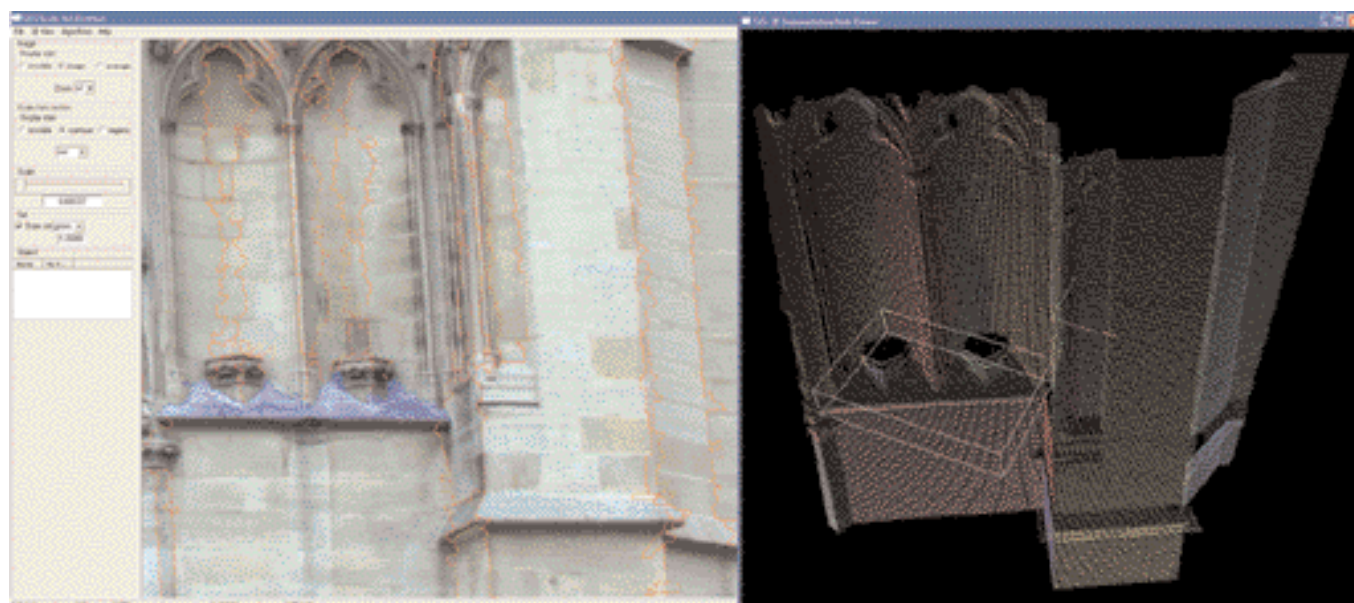
venir enrichir les bases de modèles, comme celle mise en place par le laboratoire MAP à partir de traités d'architecture.

## Vers un outil semi-interactif de gestion conjointe image-LASER

Même s'il est envisagé d'aboutir à un degré d'automatisation élevé, la complexité du problème de segmentation empêche d'atteindre une solution parfaite.

Le résultat de la segmentation automatique peut être proposé à l'utilisateur, à travers une interface de saisie (figure 5), qui fournit à la fois une vue image, une

...



**Figure 6 :** Interface de saisie semi-interactive conjointe image-LASER.

... vue 3D et des informations relatives aux objets. Cette interface permet de sélectionner une région, ou plusieurs régions, d'appliquer différentes fonctions sur ces régions, par exemple de modélisation, et également d'améliorer les limites de régions lorsque la segmentation proposée n'est pas correcte. L'interaction avec l'utilisateur ne se situe plus au niveau de la saisie de la géométrie, mais au niveau de l'interprétation. C'est plus un processus de décision. L'interface se place comme un intermédiaire, une aide à la saisie. Elle doit permettre d'accélérer considérablement les temps de modélisation. Elle peut également servir de support à l'intégration d'outils d'analyse.

Puisque cet outil s'appuie sur un seul point de vue, il peut être associé à la phase d'acquisition sur le terrain. La saisie dans l'image peut servir de support de cadrage de la surface à scanner. La définition du cadre est donc réduite à une saisie, là où elle pouvait atteindre au mieux deux saisies (pour un cadre rectangulaire), et au pire autant de saisies que la zone comporte de coins. Cela permet d'adapter la résolution de numérisation à la complexité de la surface considérée. D'autre part, dès la phase d'acquisition, il est ainsi possible d'extraire des structures géométriques qui seront vues depuis les points de vue suivants. Ces structures géométriques pourront donc servir d' "amers" de recalage. Cette dernière possibilité présente plusieurs intérêts.

Premièrement, à partir de cette configuration, le recalage peut être réalisé à partir de toutes les structures géométriques de la scène présentes dans la zone de recouvrement. L'importance relative de chaque portion est donc mieux représentée : le risque d'être influencé par une faute dans la minimisation aux moindres carrés du problème d'orientation est moindre.

De plus, on peut s'affranchir de l'utilisation de cibles ou de points de calage, qui sont, malgré les efforts d'automatisation de leur détection, des charges importantes de la phase d'acquisition. Il faut préparer la configuration des cibles, les placer sur le terrain (... ce qui

suppose de pouvoir accéder facilement aux différentes parties de la scène à modéliser ; nous avons tous expérimenté cet aspect de la troisième dimension sur le terrain), et enfin, il faut détecter ces cibles dans les nuages.

Le troisième intérêt lié à cette configuration tient dans l'inversion des phases de segmentation et de recalage du nuage de points. La méthode généralement utilisée consiste à recaler les nuages de points les uns par rapport aux autres puis à réaliser une segmentation en objets, et enfin à estimer les paramètres des objets sélectionnés. Le recalage des nuages de points n'étant pas parfait, cette façon de faire introduit un biais (bruit) qui nuit à l'estimation des paramètres. Si l'on choisit de réaliser la segmentation et l'estimation des paramètres avant le recalage, on s'affranchit de l'erreur de recalage lors de l'estimation des paramètres, et on bénéficie d'objets modélisés avec précision pour le recalage.

## Conclusion

Ces travaux veulent montrer l'intérêt de l'association entre l'image et le LASER pour la reconstruction 3D de scènes complexes. Cet intérêt se trouve dans la configuration géométrique qui permet une contribution géométrique commune de l'image et du LASER pour la détermination des limites d'objet. Il est ainsi possible d'obtenir une automatisation quasi complète de la modélisation. Un outil de saisie qui s'appuie sur les avantages respectifs de l'image et du nuage de points et sur les résultats des étapes automatiques vient compléter la chaîne de modélisation. Cet outil offre une grande facilité d'interprétation et une architecture basée sur une segmentation hiérarchique qui doivent conduire à accélérer la modélisation.

Bien sûr, dans le domaine de l'image, des perspectives se dessinent ! Le recalage global de plusieurs stations en configuration couplée image-laser reste à examiner. Ensuite, la fusion des différentes reconstructions obtenues, qui auront servi au recalage global, rejoindra

des questions de fusion de points de vue en photogrammétrie.

L'exploitation de plusieurs points de vue image associés à un point de vue LASER est aussi une piste prometteuse. Une configuration en triangle, c'est-à-dire avec deux points de vue image dont un point de vue proche de la station scanner entraînerait une contribution de l'image dans la détermination de la localisation de la discontinuité en profondeur (ces considérations ont bien sûr une forte dépendance à la configuration géométrique de la scène). Au final, pour une meilleure localisation des discontinuités géométriques à partir de l'image et pour compléter l'information là où elle fait défaut, on pourrait envisager de recourir à l'acquisition en multivues couplée à l'acquisition LASER. On aurait alors toujours une image prise du même point de vue que celui du scanner et  $n$  images de part et d'autre de la station scanner. Cette voie pourrait prolonger les travaux relatifs à cette thèse, afin d'améliorer la reconstruction et la modélisation des environnements complexes. ●

## Contact

**Matthieu DEVEAU**  
Institut Géographique National  
Laboratoire MATIS  
2, avenue Pasteur  
94165 Saint-Mandé Cedex  
matthieu.deveau@ign.fr

## ABSTRACT

*This paper examines some of the issues covered by Matthieu Deveau's doctoral thesis, conducted within IGN's MATIS Laboratory in partnership with Trimble/Mensi and EDF R&D, and which will be presented during 2006.*

*The objective of the thesis is to develop 3D modeling solutions for complex environments (architectural, industrial, etc.) using both digital image and 3D point cloud data acquired from terrestrial viewpoints.*

## Expérimentation de la Transformation Linéaire Directe pour différentes applications en photogrammétrie

■ I. ZEROUAL - A. LIAZID

**Cet article illustre l'intérêt de la Transformation Linéaire Directe (DLT) comme approche permettant d'assurer un bon rapport qualité/prix pour la génération de modèles 3D. Trois applications différenciées par leurs conditions techniques et environnementales sont étudiées. La première application est du type aérien ayant pour but l'établissement d'une cartographie d'une zone géographique. La seconde concerne le relevé des coordonnées d'un véhicule accidenté pour les besoins de son expertise. Enfin, la troisième application concerne l'évaluation de la surface frontale d'une machine outil en l'occurrence une fraiseuse. Les systèmes d'acquisition utilisés sont propres à chaque application. Le modèle DLT à quatorze paramètres est expérimenté comme moyen unifié de reconstitution de l'objet dans chaque application. Les résultats obtenus témoignent de l'efficacité de ce modèle.**

■ mots-clés

Photogrammétrie, DLT, Distorsions.

Les techniques de mesure à partir d'images photographiques nécessitent pendant longtemps la connaissance des paramètres internes des caméras. L'utilisation de caméras métriques (dont les paramètres optiques sont connus avec précision) très chères, étaient alors indispensables mais peu adaptées aux expérimentations en milieu industriel. Dans cet article il est proposé d'étudier trois applications très différentes avec un traitement identique à l'aide de la méthode DLT [1]. Le modèle utilisé est celui à quatorze paramètres ce qui permettra de se prononcer sur sa qualité dans la restitution des coordonnées objet. Dans ce processus, les résultats obtenus renseignent sur la pertinence de ce modèle DLT.

### Principe de la DLT

Les coordonnées image et objet des cibles sont reliées par la condition de colinéarité où le vecteur image est aligné au point objet à l'aide d'un vecteur issu du centre perspectif :

$$\begin{pmatrix} x_n - x_p + dx \\ y_n - y_p + dy \\ -c \end{pmatrix} = \lambda M \begin{pmatrix} X_n - X_c \\ Y_n - Y_c \\ Z_n - Z_c \end{pmatrix} \quad (1)$$

où  $M$  est la matrice de rotation,  $\lambda$  est un facteur d'échelle,  $p_n = (x_n, y_n)^T$  et  $P_n = (X_n, Y_n, Z_n)^T$  sont respectivement les coordonnées image et objet de la  $n^{\text{ème}}$  cible. Une manipulation algébrique du système d'équations (1) conduit aux bien connues équations de colinéarité (2), reliant la position de la  $n^{\text{ème}}$  cible dans l'espace objet au point correspondant dans le plan

image. Les termes  $dx$  et  $dy$  représentent les distorsions de lentille et les déformations du cliché.

$$\begin{aligned} x_n - x_p + dx &= -c \frac{m_{11}(X_n - X_c) + m_{12}(Y_n - Y_c) + m_{13}(Z_n - Z_c)}{m_{31}(X_n - X_c) + m_{32}(Y_n - Y_c) + m_{33}(Z_n - Z_c)} \\ y_n - y_p + dy &= -c \frac{m_{21}(X_n - X_c) + m_{22}(Y_n - Y_c) + m_{23}(Z_n - Z_c)}{m_{31}(X_n - X_c) + m_{32}(Y_n - Y_c) + m_{33}(Z_n - Z_c)} \end{aligned} \quad (2)$$

où  $m_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) sont les éléments de la matrice de rotation  $M$  et sont fonction des angles d'orientation d'Euler ( $\omega, \phi, \kappa$ ). Les paramètres ( $\omega, \phi, \kappa, X_c, Y_c, Z_c$ ) et ( $c, x_p, y_p$ ) sont respectivement les paramètres d'orientation externes et internes de la caméra. Ces paramètres sont à déterminer par étalonnage. Les termes de distorsions peuvent être modélisés par la somme des distorsions radiales et tangentielles [2][3].

$$d_x = d_{xr} + d_{xt} \text{ et } d_y = d_{yr} + d_{yt} \quad (3)$$

En supposant que l'axe optique des lentilles est perpendiculaire au plan de l'image, les distorsions  $dx$  et  $dy$  s'expriment par [3][4] :

$$\begin{aligned} d_x &= \alpha(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6 + \dots) + P_1(r^2 + 2\alpha^2) + P_2\beta \\ d_y &= \beta(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6 + \dots) + P_1\alpha + P_2(r^2 + 2\beta^2) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{avec : } \alpha &= x - x_p \\ \beta &= y - y_p \\ r^2 &= \alpha^2 + \beta^2 \end{aligned}$$

Les techniques analytiques d'étalonnage de la caméra utilisent les équations de colinéarité (2) et les termes de distorsion, équations (4), pour déterminer les paramètres internes et externes de la caméra [3]. Le nombre de paramètres  $K_i$  pris en considération dans les équations (4) dépend du degré de



- sophistication désirée de la solution. En général les paramètres  $K_1, K_2$  suffisent selon la référence [4]. Cependant, seuls des tests permettent de se prononcer sur le nombre des paramètres à adopter.

Les équations de la DL – équations (5) – peuvent être obtenues par simple réarrangement et combinaison des termes des équations de colinéarité (2) :

$$\begin{aligned} L_1 X_A + L_2 Y_A + L_3 Z_A + L_4 - (x_A + dx) (L_9 X_A + L_{10} Y_A + L_{11} Z_A + 1) &= 0 \\ L_5 X_A + L_6 Y_A + L_7 Z_A + L_8 - (y_A + dy) (L_9 X_A + L_{10} Y_A + L_{11} Z_A + 1) &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Les paramètres  $L_1$  à  $L_{11}$  sont relatifs aux paramètres d'orientation internes et externes de la caméra [8]. Contrairement aux équations standard de colinéarité, équations (2), les équations de la DLT, équations (5), sont linéaires par rapport aux paramètres  $L_i$  ( $i = 1, 11$ ) quand les termes des distorsions  $dx$  et  $dy$  sont négligés. Ainsi, la forme matricielle des équations de la DLT pour  $N$  points cibles est  $BxL = C$  ; où

$L = (L_1, \dots, L_{11})^T$  ;  $C = (x_1, y_1, \dots, x_N, y_N)^T$  et  $B$  est une matrice  $(2Nx11)$  qui peut être directement obtenue à partir des équations (5). Une solution au sens des moindres carrés pour obtenir  $L$  sans exigence d'une estimation initiale, est donnée par  $L = (B^T B)^{-1} B^T C$ . Lorsque  $dx$  et  $dy$  ne peuvent plus être négligées (tenir compte des équations (4) dans le système (5)), alors les méthodes itératives sont exigées et la méthode DLT perd quelque peu de sa simplicité. En général la méthode DLT peut être utilisée pour obtenir de bons résultats concernant les paramètres d'orientation externes ( $\omega, \phi, \kappa, X_c, Y_c, Z_c$ ) et la distance principale ( $c$ ) bien qu'elle fournit des résultats souvent insuffisants sur les coordonnées du point principal ( $x_p, y_p$ ). Cependant, la méthode DLT est très utile puisque les approximations initiales peuvent être assez facilement trouvées. Dans ce travail, trois applications sont envisagées. La première en photogrammétrie aérienne et les deux autres en photogrammétrie rapprochée terrestre. Le traitement par la méthode DLT s'effectue dans les trois cas. Afin de tester la pertinence du modèle DLT à quatorze paramètres, seul le paramètre  $K_1$  est sélectionné a priori dans les équations (4). Si on suppose que les paramètres représentant la distorsion de l'objectif varient linéairement, on pourra procéder à une interpolation linéaire pour estimer les facteurs de distorsion relatifs aux cibles et aux points inconnus.

## Applications

La première application consiste à exploiter des clichés aériens obtenus à l'aide d'une caméra embarquée de marque Wild avec une distance principale de 88,67 mm [6]. La hauteur de prise de vue est de 1152 m avec un rapport base/éloignement 'B/H' de 1,04. Une vingtaine de points-cibles sont présignalés. Les couples de clichés utilisés (2829 et 2830) sont à axes de prise de vue normaux.

La seconde application consiste à établir les relevés géométriques de la carrosserie d'un véhicule accidenté en vue de son expertise. La description détaillée de cette expérience et des résultats obtenus est présentée dans la référence [5]. Le rapport base-éloignement dans cette application vaut 0,16.

La troisième application a pour objectif la détermination de la surface frontale d'une fraiseuse.

Pour les trois applications, les coordonnées objet des cibles sont obtenues à l'aide de techniques topographiques classiques avec une précision de l'ordre du centimètre.

## Traitement DLT

Les observations dans l'espace image des coordonnées clichés sont entachées d'erreurs de pointé puisque les mesures sont faites séparément (pointé non stéréoscopique). Devant cet état de fait, il est nécessaire de vérifier les observations en tenant compte des équations aux parallaxes (6).

$$PL_i = x'_i - x''_i \quad (6)$$

où  $x'_i, x''_i$  ;  $i = (1/n)$  représentent les coordonnées de la parallaxe longitudinale du point ( $i$ ). La différence de parallaxe  $\Delta PL_i$  entre la référence (0) et le point ( $i$ ) est exprimée par l'équation (7).

$$\Delta PL_i = PL_i - PL_0 = Bc \left( \frac{1}{H_i} - \frac{1}{H_0} \right) = \frac{Bc \Delta H_i}{H_i H_0} \quad (7)$$

Où :

- $H_i, H_0$  : Eloignement du point ( $i$ ) et de la référence (0).
- $PL_0$  : Parallaxe linéaire longitudinale du point de référence (0).
- $\Delta H_i = H_i - H_0$  : Différence d'éloignement entre le point ( $i$ ) et le point de référence (0)

Un développement mathématique permet d'aboutir à :  $\Delta H_i (B.c + H_0 \Delta PL_i) - H_0^2 \Delta PL_i = 0$  donc une fonction implicite du type  $F(\Delta H_i, \Delta PL_i) = 0$ . Sa dérivée première par rapport à  $\Delta H_i$  et  $\Delta PL_i$  permet d'écrire :

$$A_i = (Bc + H_0 \Delta PL_i) ; \varepsilon z = d(\Delta H_i)$$

$$B_i = (H_0 \Delta H_i - H_0^2) ; \varepsilon p = d(\Delta PL_i)$$

Ainsi, la relation d'observation (7) peut alors s'écrire sous la forme matricielle  $C.X = 0$ , avec  $C = \{A_i, B_i, i = 1/n\}$  et  $X = \{\varepsilon z, \varepsilon p\}$ . Donc  $X = (C^T C)^{-1}$  représente le biais des mesures en éloignement et en parallaxes. Si on suppose que les paramètres qui représentent la distorsion de l'objectif varient linéairement, on pourra procéder à une interpolation linéaire pour estimer les paramètres de distorsion relatifs aux points de contrôle et aux points nouveaux. Ainsi, par rapport au centre du cliché, pour chaque accroissement de rayon  $\Delta r_i = (r_{i+1} - r_i)$  correspond un accroissement  $\Delta k_i(i) = k_i(i+1) - k_i(i)$  ; ceci entraîne :

$$\Delta k_i = \frac{(r_{i+1} - r_i)(k_{i(i+1)} - k_{i(i)})}{(r_{i+1} - r_i)}$$

Il en est de même pour  $\Delta P_1$  et  $\Delta P_2$  d'où les expressions des paramètres  $k_i, P_1$  et  $P_2$ , définis dans l'équation (4) :

$$\begin{aligned} k_i &= k_i(i) + \Delta k_i \\ P_1 &= P_1(i) + \Delta P_1 \\ P_2 &= P_2(i) + \Delta P_2 \end{aligned} \quad (8)$$

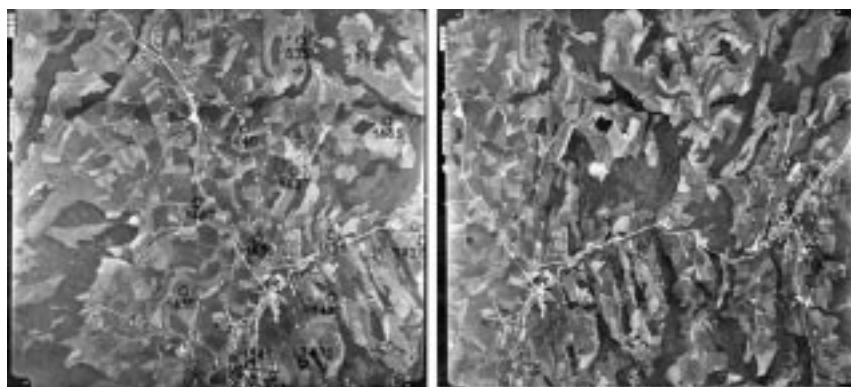


Figure 1 : Application sur le test Wild (couple 2829-2830)



Figure 2 : Application sur le véhicule Mazda (couple 14-15)

## Résultats du traitement

Les tableaux (1) et (2) récapitulent les résultats de la première application. Les tableaux (4) et (5) correspondent aux résultats de la seconde application et les tableaux (7) et (8) concernent les résultats de la troisième application. Les figures (1), (2), et (3) représentent les images des trois applications et les figures (4), (5) et (6) représentent la distribution des écarts par rapport aux points de contrôle. Comparativement aux figures (2) et (3)

				Coordonnées des points de contrôle			
Coordonnées objet [6]				Cliché 2829		Cliché 2830	
N°	X [m]	Y [m]	Z [m]	X1 [mm]	Y1 [mm]	X2 [mm]	Y2 [mm]
1438	246815.4622	751907.2618	906.3778	98.1810	171.4100	9.6110	164.6830
1439	246531.9845	751254.7916	907.8162	106.9840	122.5200	18.0370	115.7520
1440	246530.2324	750585.1271	943.8014	133.0960	82.6340	41.9220	75.0460
1332	246927.7713	749628.3538	999.8640	198.7550	37.2780	104.9880	28.7990
1435	247297.0912	750117.1024	1130.7818	212.3510	78.7340	105.4630	71.5380
1437	246994.7442	750692.3776	1051.0249	160.3360	106.3020	60.4960	99.3710
1436	247067.2372	751228.5054	953.7117	139.8910	142.6580	47.8920	136.3260
1432	247743.7483	751295.5207	988.7366	180.6460	141.2660	91.3120	135.5770
1433	247544.0583	750896.7693	917.1862	231.5240	145.6300	143.1270	140.5940

Tableau 1 : Résultats de la première application.

N°	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$
1438	-.0210	-.0052	.0211
1439	.0238	-.0315	.0903
1440	.0065	.0284	.0137
1332	-.0247	.0655	.0554
1435	.0086	.0586	.0325
1437	-.0685	-.0192	.0538
1436	.0160	.0457	.0605
1433	-.0376	.0070	.0404
1432	-.0527	-.0201	.0551

Tableau 2 : Ecart sur les points de contrôle.

	x	Y
Cliché 2829	118.099 mm	118.045 mm
Cliché 2830	120.941 mm	119.142 mm

Tableau 3 : Coordonnées des centres des deux clichés utilisés.

pour lesquelles les distorsions ne sont pas symétriques et de révolution, la figure (1) montre une meilleure distribution, ce qui indique une meilleure qualité de la caméra utilisée. La vérification des critères établis dans la référence [7] concernant les combinaisons relatives aux paramètres d'orientation, permet d'illustrer la position de la solution finale relative à la restitution.



**Figure 3 :**  
Application  
sur une  
machine  
outil.

				Coordonnées des points de contrôle			
Coordonnées objet				Cliché 14		Cliché 15	
N°	X [m]	Y [m]	Z [m]	X1 [mm]	Y1 [mm]	X2 [mm]	Y2 [mm]
01	-.900	4.940	-.2100	94.6010	88.0290	87.4800	95.0980
02	-.760	4.960	-.4700	97.7040	81.4760	90.7820	38.0390
03	-.540	4.940	-.3000	102.9880	85.6060	95.7440	92.8980
04	-.440	4.970	-.1400	105.6380	89.2410	98.3680	96.6280
05	-.220	4.940	-.2800	110.9460	85.7900	103.6960	93.2870
06	0.000	5.010	-.1300	116.2090	89.5940	109.0660	97.2660
07	.120	5.000	-.6100	118.7260	78.0000	112.0600	85.6790
08	.420	4.990	-.0100	126.2510	92.1720	119.0080	100.1570
09	.430	5.000	-.5700	126.1870	78.1930	119.6120	86.0570
10	.660	5.040	.4500	132.2680	102.9750	124.9810	111.2460
11	.820	4.940	-.1800	135.8920	87.6680	128.8230	95.8630
12	.930	4.980	-.5300	137.9780	78.8030	131.5080	86.9880
13	1.000	5.040	.4900	140.1670	103.7260	138.8880	112.2530
14	1.080	4.940	0.0000	142.3120	92.0120	135.2020	100.4500
15	1.250	5.010	.4000	146.0680	101.5290	139.0100	110.2280
16	1.320	4.980	.0200	147.6470	92.3400	140.8580	100.9580
17	1.320	4.990	-.5000	147.1700	79.3420	140.9120	87.7820
18	1.580	4.950	-.0900	153.9460	89.4490	147.2080	98.1770
19	1.630	4.950	-.3400	154.7780	83.1590	148.3330	91.8380

**Tableau 4 :** Données terrain et observations clichés.

N°	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$
04	.0091	-.0182	-.0170
05	.0089	.0255	-.0051
06	.0295	-.0613	.0016
10	-.0374	-.0259	-.0122
14	.0010	.0194	-.0091
15	-.0069	-.0202	-.0100
16	-.0259	-.0298	-.0085

**Tableau 5 :** Ecart sur les points de contrôles en mètre.

	x	y
Cliché 14	116.254 mm	91.048 mm
Cliché 15	128.188 mm	101.638 mm

**Tableau 6 :** Coordonnées des centres des deux clichés utilisés.



				Coordonnées des points de contrôle			
Coordonnées objet				Vue-G		Vue-D	
N°	X [m]	Y [m]	Z [m]	X1 [mm]	Y1 [mm]	X2 [mm]	Y2 [mm]
01	10.6522	12.7297	9.5286	47.7100	-51.4000	33.6000	-55.1100
02	10.5254	12.6771	9.5470	55.3000	-49.4000	39.2000	-53.4000
07	10.0111	12.8879	9.9676	76.3000	-28.2000	65.0000	-33.4000
08	9.9709	12.8845	9.8436	75.6000	-35.1000	65.2000	-40.0000
11	10.0046	12.6838	9.4523	84.3000	-54.0000	68.6000	-57.9000
13	9.8347	13.3777	9.7200	74.7000	-39.0000	72.2000	-43.4000
14	9.6756	12.6932	9.5501	97.8000	-48.1000	82.9000	-52.1000
16	9.5411	12.7304	9.5952	99.4050	-46.4100	87.3000	-50.6000
18	9.3472	12.7316	9.5470	110.5000	-47.7000	99.0000	-51.6000

**Tableau 7 : Résultats de la troisième application.**

N°	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$
01	.0022	-.0003	.0076
02	-.0016	-.0029	-.0080
07	.0161	.0179	-.0264
08	-.0291	-.0255	.0316
11	.0096	.0138	-.0007
13	.0087	-.0073	-.0060
14	.0066	.0132	-.0049
16	-.0259	-.0356	.0162
18	.0102	.0116	-.0050

**Tableau 8 : Ecart sur les points de contrôle.**

## ●●● Analyse des résultats

Les facteurs qui influencent la qualité des traitements effectués par la méthode DLT sont liés à plusieurs paramètres dont la résolution de l'image et le rapport base-éloignement. La référence [8] précise l'exactitude en photogrammétrie en fonction de l'échelle du cliché et du rapport base-éloignement. La qualité de la génération d'un modèle numérique de terrain dans la restitution d'un couple de clichés reste tributaire des observations clichés et du résultat des paramètres de distorsions [9]. La relation (9) permet d'établir le lien entre le rapport base-éloignement (B/H), l'échelle (c/H) et l'acuité visuelle stéréoscopique (en effet, à partir de l'équation de la parallaxe (7) on obtient :

$$\Delta H = \frac{H}{B} \times \frac{H}{c} \times D \cdot \varepsilon \quad (9)$$

où :

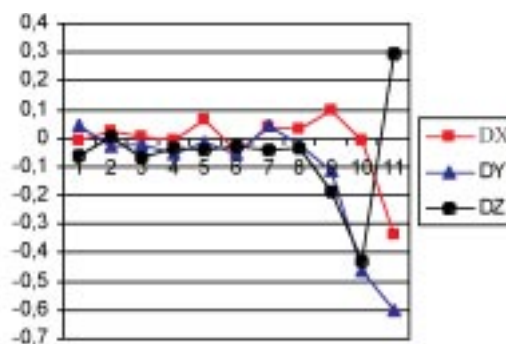
- $\Delta H$  : représente le plus petit relief perceptible.
- $D$  : représente la distance d'observation ou d'examen stéréoscopique.
- $\varepsilon$  : représente l'acuité visuelle de l'opérateur.
- $\varepsilon D$  : représente l'erreur des mesures image.
- $(B/H)$  et  $(c/H)$  sont les paramètres de la prise de vues.

Le tableau (11) présente les résultats suivants :

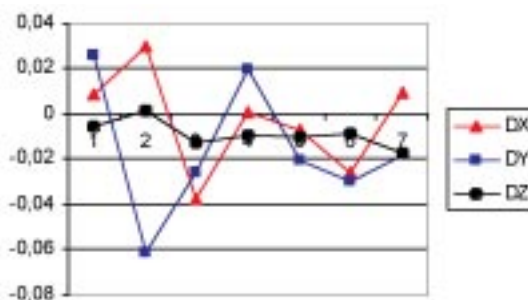
- La tolérance  $\Delta H$  obtenue comme étant le produit de l'équation (9) par un coefficient  $k = 2.57$  [10].
- L'erreur altimétrique  $\Delta H_t$  obtenue après le traitement DLT.

	x	Y
Cliché_G	64.000	-51.200
Cliché_D	64.000	-51.200

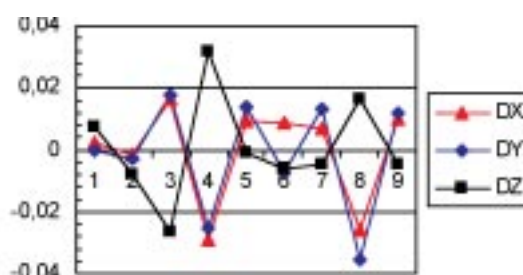
**Tableau 9 : Coordonnées des centres des deux clichés utilisés.**



**Figure 4 : Distribution des écarts par rapport aux points de contrôle : Application 1.**



**Figure 5 : Distribution des écarts par rapport aux points de contrôle : Application 2.**



**Figure 6 : Distribution des écarts par rapport aux points de contrôle. Application 3.**

	B/H	c/H	Tolérance $\Delta H$	$\Delta H_t$	Nbre de Pts de contrôle	Ecart spatial	Précision relative
App. 1	1.04	1/13000	162 mm	52 mm	09	32 cm	$3 \cdot 10^{-4}$
App. 2	0.16	2/100	4 mm	1.9 mm	07	26 mm	$52 \cdot 10^{-4}$
App. 3	1/3	1/21	8.50 mm	15 mm	09	28 mm	$10^{-3}$

**Tableau 11 : Calcul des paramètres d'analyse**

- L'écart spatial obtenu sur la base des écarts sur chaque point de contrôle.
- La précision relative obtenue comme étant le rapport de l'écart spatial par l'éloignement.

Sachant qu'un traitement mathématique identique a été effectué sur les trois couples, il ressort en vertu du tableau (11) et compte tenu des tolérances calculées que le traitement par le modèle DLT à 14 paramètres a été suffisant pour les applications 1 et 2. Cependant, dans le cas de l'application 3, l'erreur induite ( $H_t$  dépasse la tolérance  $\Delta H$ ). Ceci parce que la caméra utilisée et les conditions d'acquisition n'étaient pas appropriées pour atteindre de bons résultats. En effet, une simple caméra de marque Toshiba avec une résolution 1,5 Mpixels était utilisée et la définition du système de référence n'était pas rigoureuse, c'est-à-dire que la mesure des distances dans l'espace objet n'était pas très précise (utilisation d'un décimètre).

## Conclusion

Cet article avait pour but de tester les performances du traitement DLT à l'aide d'un modèle à 14 paramètres. Trois différentes applications ont été traitées. Les résultats atteints confirment la capacité du modèle DLT à 14 paramètres dans le traitement aussi bien en photogrammétrie éloignée que rapprochée. Ces résultats restent tributaires du choix matériel et des conditions d'acquisition photographique c'est-à-dire d'une expérience avérée de l'exploitant. En effet, la variation des éléments de prise de vues (échelle, distance principale et base) s'avère déterminante pour le succès du traitement mathématique à l'aide du modèle DLT. La restitution de la géométrie d'un objet 3D avec la méthode DLT n'est pas un travail aisé. Cependant, on trouve des applications qui utilisent des surfaces locales pour des projets spéciaux. Les conditions pour appliquer une telle approche doivent regrouper :

- L'élimination des erreurs d'observation en résolvant des systèmes redondants.
- Le traitement des paramètres de distorsion par la méthode rigoureuse [11].
- Le calcul des coordonnées objet et l'estimation des écarts.
- L'ajustement des traitements sur les points restitués : mise en place d'une adaptation numérique. ●

## Contacts

### I. ZEROUAL

Faculté des sciences de la terre, université d'es sénia  
courriel : zeroual1@mail.com

### A. LIAZID

Laboratoire LTE-ENSET-Oran, B.P. 1523 El Mnaouer 31000- Oran  
courriel : liazid@enset-oran.dz

## Références

- [1] Abdelaziz and Karara *Mathematical Formulation in Close Range Photogrammetry, Manual of Photogrammetry* – fourth edition – American Society of Photogrammetry, pp. 801 - 803, 1980.
- [2] W. Faig *Photogrammetric potentiels of non-metric camera* – report of ISP WG V-2 – invited paper – ISP congress Helsinki 1976.
- [3] P. Hottier *Accuracy of close range analytical restitution* – Practical experiments and predictions – Commission V, ISPRS Helsinki 1976.
- [4] W. Faig *Precision Plotting of non metric photography* – ISP Symposium 1974.
- [5] I. Zeroual, A. Liazid *Use of DLT in photogrammetric Metrology* – ISPRS commission V, Corfu 2002.
- [6] Couple-test 2829-2830, WILD 1973.
- [7] Bopp and Krauss *Non topographic Photogrammetry* – Manual of Photogrammetry – fourth edition – American Society of Photogrammetry, pp. 803, 1980.
- [8] K. Kraus, P. Waldhausl *Manuel de photogrammétrie* – Ed. Hermes, p. 40, 1998.
- [9] J-B. Henry, P. Grussenmeyer, J.-P. Malet et O. Maquaire *Génération des MNT par photogrammétrie aérienne de petit format : application au versant instable de Super-Sauze* – XYZ n°87, 42-50, 2001.
- [10] P. Grussenmeyer, P. Hottier *Le contrôle topographique d'une carte ou d'une base de données constituées par voie photogrammétrique* – Revue XYZ, N°59, pp 39-45, 1994.
- [11] P. Hottier *Photogrammétrie Analytique* – Photogrammétrie Générale – tome 4, éditions Eyrolles, pp. 172-201, 1972.

## ABSTRACT

**Keywords:** Photogrammetry - DLT - Distortions.

*This paper illustrates the important interest with using Direct Linear Transformation (DLT) as an economic method in photogrammetry treatment. Three applications with different technical and environmental conditions are studied. In the first example, aerial images are used for cartography purposes. The second application concerns the coordinates statement of a damaged vehicle for the experts's report. Finally, the third application concerns the evaluation of the frontal face area of a tool-machine, namely a milling machine. The acquisition systems used are specific to every application. The DLT model with fourteen parameters is tested as a unified means of reconstitution in each application. The obtained results reveal the efficiency of this DLT model.*

# Quelques statistiques sur le secteur privé de l'information géographique

■ Patrick SILLARD

*Cet article présente une photographie économique du secteur privé de l'information géographique. La partie principale du secteur correspond aux entreprises de géomètres, et pour une part plus restreinte, aux éditeurs de SIG et de données d'information géographique. Le chiffre d'affaires des entreprises de géomètres est de 0,9 milliard d'€ en 2003.*

*Ces entreprises détiennent 12 800 emplois en 2003, dont 10 % de cadres.*

*Cette dernière proportion monte à 60 % pour les éditeurs de logiciel et de données d'information géographique. La croissance annuelle du secteur est très convenable (4 % pour le chiffre d'affaires) et prouve que le secteur évolue favorablement.*

## ■ mots-clés

économie, information géographique, mètreur, géomètre, SIG, navigation

L'objet de cet article est d'offrir quelques éléments de cadrage sur le marché de l'information géographique tel qu'il ressort des données disponibles à l'Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE). L'INSEE dispose d'informations financières et sociales très précises sur toutes les entreprises présentes sur le territoire français. L'objectif des bases constituées vise à appréhender au mieux l'outil productif français et de connaître, aussi finement que possible les éléments caractéristiques de l'emploi en France. Ce travail s'appuie en particulier sur les déclarations fiscales des entreprises assujetties au régime des Bénéfices réels normaux (BRN). Ce régime concerne les entreprises réalisant plus de 580 000 € de chiffre d'affaires par an. Par ailleurs, les résultats concernant l'emploi et les salaires sont tirés des Déclarations annuelles de données sociales (DADS) que remplissent toutes les entreprises à destination des organismes de sécurité sociale et de l'administration fiscale. Ces déclarations renseignent notamment par établissement, les traitements versés et les effectifs employés par catégories socioprofessionnelles.

Par ailleurs, on connaît l'activité principale de chaque établissement implanté sur le territoire français selon une nomenclature d'activités relativement fine. La nomenclature NAF700<sup>1</sup> isole notamment le secteur d'activité des "Métreurs, géomètres" (code NAF 742B) qui regroupe une bonne partie de l'activité privée relative à l'information géographique. Pour les activités liées au développement de systèmes d'information géographique (SIG) ou de systèmes intégrés (navigation, levés par GPS et couplage à un SIG), il n'est pas possible de distinguer les activités spécifiques aux SIG des autres activités d'ingénierie, d'édition de logiciels informatiques ou de conseil. Nous pensons toutefois capter, avec le secteur des "Métreurs, géomètres", l'essentiel de l'activité du secteur. Une première partie détaille les résultats obtenus dans ce secteur d'activité. La seconde partie, plus monographique, offre quelques éléments sur les activités des grands éditeurs de logiciels SIG et éditeurs de données pour appareils embarqués de navigation. Cette deuxième partie s'appuie sur l'identification d'une dizaine d'entreprises à partir du réper-

toire d'entreprises partenaires de l'Association française pour l'information géographique (AFIGEIO).

## Le secteur des géomètres

Dans tout ce qui suit, les chiffres présentés sont relatifs aux années 1994-2003 pour les données de salaire et d'emploi. Ces données sont exhaustives et permettent de préciser les caractéristiques du secteur des "Métreurs, géomètres".

### ■ 10 % de cadres

Le *tableau 1* montre l'évolution de l'emploi global (en équivalent temps plein annuel – EQTP) et de l'emploi par catégorie socioprofessionnelle. La décomposition utilisée est celle retenue par MM. Burnod et Chenu ainsi que par M. Chenu respectivement dans leurs contributions à Travail et emploi (2001) et à Economie et statistique (2002). La fraction de cadres dans l'emploi total du secteur est de l'ordre de 10 %. Plus de la moitié de l'emploi correspond à des professions intermédiaires. Les catégories supérieures de cadres et de professions intermédiaires croissent à un rythme parallèle de

(1) Consultable sur le web à l'adresse : [http://www.insee.fr/fr/nom\\_def\\_met/nomenclatures/naf/nlst700.htm](http://www.insee.fr/fr/nom_def_met/nomenclatures/naf/nlst700.htm)



Année	Total	Cadres	Professions intermédiaires	Employés qualifiés	Employés non qualifiés	Ouvriers qualifiés	Ouvriers non qualifiés & stagiaires
1994	11 878	886	6 112	2 942	369	397	1 172
1995	11 730	865	5 905	2 689	216	678	1 377
1996	11 347	848	5 980	2 674	196	513	1 136
1997	11 529	864	6 024	2 660	223	511	1 248
1998	11 878	866	6 318	2 803	220	482	1 189
1999	11 973	831	6 507	2 675	235	539	1 186
2000	12 476	833	6 829	2 893	219	482	1 221
2001	12 682	885	7 066	2 774	212	543	1 203
2002	12 530	1 147	6 969	2 548	415	701	749
2003	12 881	1 102	7 497	2 564	459	536	723
croissance Moyenne	0,93 %	2,87 %	2,35 %	- 1,37 %	7,24 %	6,67 %	-3,88 %

**Tableau 1 : Evolution de l'emploi (en équivalent temps plein annuel) dans le sous-ensemble des "Métreurs, géomètres" par catégorie socioprofessionnelle.**

... 2,5 %, alors que certaines substitutions s'opèrent vraisemblablement entre catégories d'employés et d'ouvriers. On notera le fort accroissement du nombre de cadres entre 2001 et 2002 (+ 29 %), et la diminution du nombre d'ouvriers non qualifiés et stagiaires (- 38 %). Ceci peut éventuellement résulter du changement de nomenclature d'activités qui a pris effet en 2002. Mais il semble que des promotions internes et des embauches définitives de stagiaires puissent aussi expliquer une partie de ce phénomène. Les substitutions s'opèrent alors entre ouvriers et professions intermédiaires, puis entre professions intermédiaires et cadres.

## ■ Des salaires en croissance régulière

Les salaires bruts par catégorie et leur évolution au cours de la période 1994-2003 sont donnés au *tableau 2*. On observe que les salaires croissent légèrement plus vite que le rythme de l'inflation sur la période (2,4 % pour 1,5 % de croissance moyenne annuelle des prix à la consommation sur la période).

La catégorie qui bénéficie le plus de l'augmentation des salaires est celle des cadres, ce qui est conforme au schéma habituellement observé en France. Les augmentations restent toutefois modérées, y compris pour les cadres<sup>2</sup>.

## ■ Un secteur représentant 900 millions d'euros de chiffre d'affaires

Afin d'évaluer la santé économique du secteur dans la durée, les données exhaustives d'emploi et de salaire sont croisées avec les données fiscales limitées aux seules entreprises réalisant un chiffre d'affaires annuel supérieur à 580 000 €. Ce faisant, 416 entreprises ont été isolées.

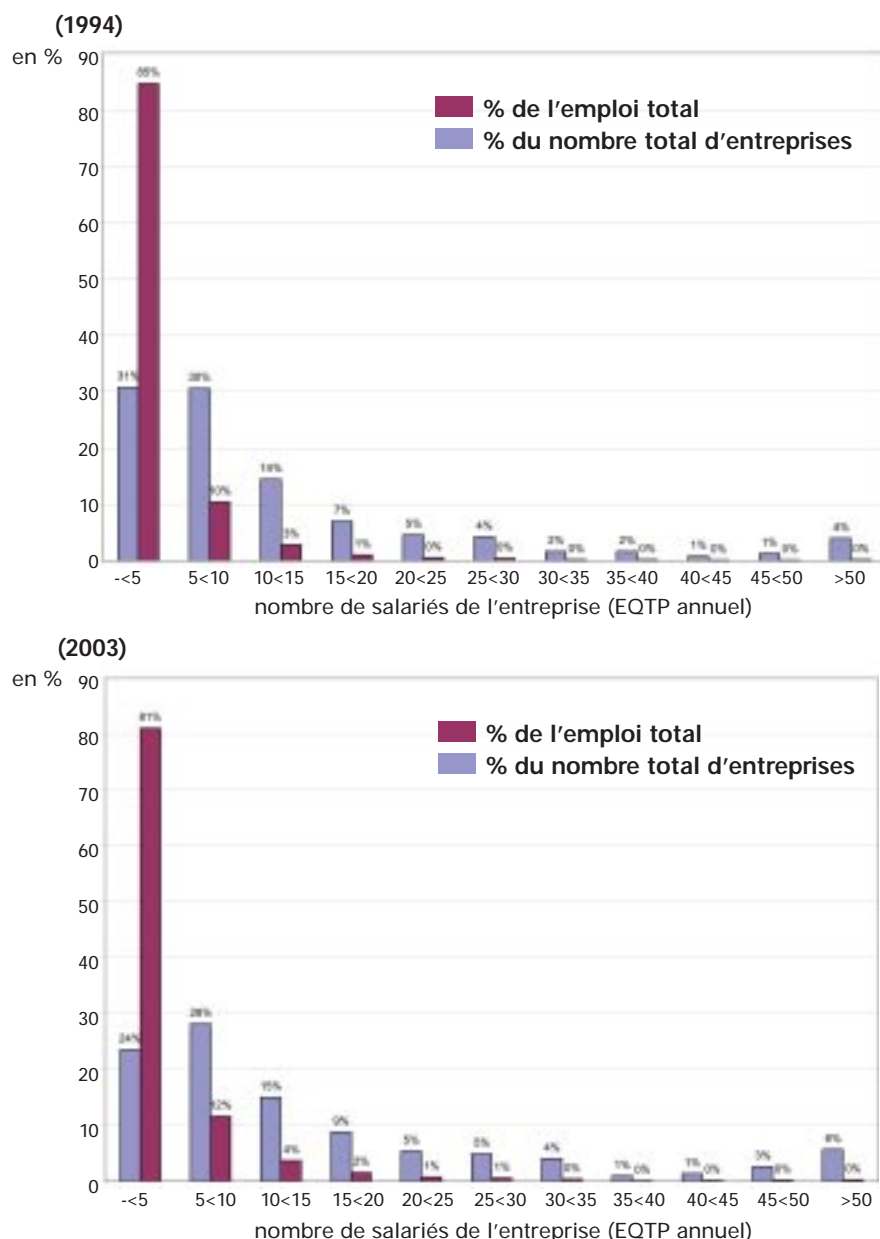
Elles sont présentes sur la période 1998-2003, période sur laquelle une information fiscale complète est disponible. Le *tableau 3* montre l'évolution de certaines variables économiques pour ces 416 entreprises. Ces entreprises repré-

(2) Le salaire moyen des ouvriers non qualifiés et stagiaires est inférieur au SMIC en raison de la présence des seconds qui sont généralement rémunérés en dessous du SMIC.

Année	Moyen	Cadres	Professions intermédiaires	Employés qualifiés	Employés non qualifiés	Ouvriers qualifiés	Ouvriers non qualifiés & stagiaires
1994	18 088	35 272	19 906	14 635	12 807	16 035	6 636
1995	18 460	35 850	20 004	14 657	11 413	19 183	9 089
1996	18 587	36 372	20 425	14 756	10 616	16 364	7 034
1997	18 776	35 164	20 772	15 186	12 408	16 928	7 340
1998	18 822	35 568	20 699	14 967	12 023	17 101	7 700
1999	19 220	36 769	20 974	15 537	12 233	17 911	7 593
2000	19 685	38 529	21 510	15 677	12 104	17 712	8 251
2001	20 629	39 760	22 196	16 693	12 589	19 095	8 534
2002	21 599	42 432	22 512	16 650	14 634	16 491	6 688
2003	22 346	44 636	23 136	17 286	14 069	17 567	6 946
croissance Moyenne	2,39 %	2,69 %	1,69 %	1,89 %	1,44 %	1,53 %	1,84 %

**Tableau 2 : Evolution du salaire brut moyen par tête annualisé dans le secteur des "Métreurs, géomètres" par catégorie socioprofessionnelle (en €).**

**Figure 1 : Répartition de l'emploi et du nombre d'entreprises du secteur en fonction de leur taille.**



sentent 30 % de l'emploi total et distribuent 34 % des salaires versés dans le secteur. Dans ces entreprises, l'excédent brut d'exploitation<sup>3</sup> croît fortement d'une année sur l'autre, signe de bonne santé globale du secteur. Le taux de marge<sup>4</sup> est relativement stable sur la période d'observation. Le chiffre d'affaires est en croissance de près de 4 % par an, ce qui montre que le marché évolue favorablement (sauf en 2001). Le rapport des salaires bruts versés sur le chiffre d'affaires est remarquablement stable sur l'ensemble de la période considérée. Ce rapport nous permet, sur la base de la masse salariale totale du secteur (observée à partir des DADS) et sous l'hypothèse d'existence d'une unique fonction de production pour l'ensemble du secteur, d'évaluer le chiffre d'affaires global à environ 900 millions d'€ en 2003.

### ■ Un mouvement de concentration modéré

La répartition de l'emploi et la taille des entreprises du secteur sont illustrées à la figure 1. On observe que les entreprises du secteur sont essentiellement

◀ **Lecture : en 1994, les entreprises du secteur comprenant moins de 5 employés (en EQTP annuel) représentaient 69 % du total des entreprises du secteur, ces mêmes entreprises détenant 31 % de l'emploi total.**

(3) Valeur ajoutée et subventions réduites des impôts, taxes, salaires, traitement et charges sociales.

(4) Rapport de l'excédent brut d'exploitation et de la valeur ajoutée.

Année	Chiffre d'affaires	Valeur ajoutée	Excédent brut d'exploitation	Emploi (EQTP)	Masse salariale brute	Salaires bruts versés/ chiffre d'affaires	Taux de marge
1998	291 524	201 891	22 225	3 336	72 773	0,30	0,147
1999	320 802	220 209	27 822	3 414	76 530	0,30	0,159
2000	347 706	238 466	30 457	3 556	81 265	0,32	0,146
2001	316 069	207 746	33 289	3 704	88 423	0,32	0,161
2002	334 650	219 422	34 867	3 799	94 138	0,32	0,148
2003	348 834	226 614	33 813	3 833	97 663	0,32	0,140
croissance Moyenne	3,9 %	2,7 %	9,1 %	2,8 %	6,1 %		

**Tableau 3 : Evolution de diverses grandeurs économiques pour 416 entreprises du secteur des "Métreurs, géomètres" entre 1998 et 2003 ; les grandeurs monétaires sont exprimées en milliers d'euros courants.**

Année	Chiffre d'affaires (en 10 <sup>6</sup> €)	Effectif (EOTP annuel)	Proportion de cadres dans l'emploi total
1998	51,0	326	0,57
1999	55,4	354	0,66
2000	61,8	437	0,72
2001	60,8	476	0,73
2002	61,2	539	0,68
2003	66,1	499	0,65

**Tableau 4 : Evolution du chiffre d'affaires, des effectifs et de la fraction de cadres dans l'emploi total de quelques entreprises éditrices de SIG ou de données pour navigateurs embarqués.**

... de petite taille (plus de 80 % des entreprises comprennent moins de 5 employés à l'année). Il existe quelques entreprises d'assez grande taille (plus de 40 employés). Ces dernières sont rares, mais elles détiennent une fraction conséquente de l'emploi total (6 % en 1994, 10 % en 2003). La situation a assez peu évolué entre 1994 et 2003. Toutefois, la tendance est à l'augmentation de la taille des entreprises : le poids des entreprises de plus de 20 salariés vis-à-vis de l'emploi total est passé de 17 % en 1994 à 25 % en 2003. Dans le même temps, le nombre d'entreprises a diminué (2 430 en 1994, 2 162 en 2003). Cette tendance vers une plus forte concentration est partagée par un grand nombre d'autres secteurs d'activité et relève essentiellement d'une logique d'économies d'échelle bien connue en économie industrielle.

## Les éditeurs de logiciel SIG et de données pour navigateurs embarqués

On regroupe ici les variables relatives aux plus gros éditeurs de logiciel SIG et aux éditeurs de données pour navigateurs embarqués (une dizaine d'entreprises). Les résultats sont donnés au tableau 4. Ceux-ci sont à prendre avec une relative prudence dans la mesure où il n'est pas assuré que les quelques entreprises retenues ici soient parfaitement représentatives de l'ensemble du marché de l'information géographique hors secteur des "Métreurs, géomètres". A une exception près, le panel d'entreprises considéré est cylindré, c'est-à-dire que les entreprises pré-

sentes dans le panel le sont sur l'intégralité de la période 1998-2003.

Les résultats sont intéressants. Ils montrent d'abord que le chiffre d'affaires réalisé par les éditeurs de logiciels ou de données est faible par rapport à celui des "Métreurs, géomètres". Dans ce sens, le marché privé de l'information géographique est surtout le fait des "Métreurs, géomètres". Sur un plan dynamique, le chiffre d'affaires évolue assez peu, alors que le nombre d'employés fluctue plus fortement. Il semble qu'après une forte croissance du chiffre d'affaires entre 1998 et 2000 (+ 11 %), les entreprises aient anticipé, lors des années 2001 et 2002, une évolution favorable du marché qui ne s'est pas réalisée. Ceci les a amenées, en 2003, à réduire sensiblement leurs effectifs, alors même que le chiffre d'affaires repartait à la hausse (+ 8 %).

Ce constat est finalement assez normal : l'activité de services informatique en information géographique reste en devenir. Elle subit les mêmes chocs économiques que les autres branches de services informatiques, comme l'éclatement de la bulle Internet à partir de septembre 2000 et qui s'est poursuivi jusqu'en fin 2002. Les résultats sont donc plutôt plus chahutés que dans une activité mieux établie, comme celles des "Métreurs, géomètres".

Enfin, on peut noter que la proportion de cadres, de l'ordre de 67 % de l'emploi total, est beaucoup plus importante que dans le secteur des "Métreurs, géomètres", où elle est inférieure à 10 %. Là encore, le secteur s'apparente davantage au comporte-

ment moyen des SSII (Sociétés de service en ingénierie informatique) qu'à celui des "Métreurs, géomètres". ●

## Bibliographie

Burnod G. et Chenu A. (2001), *"Employés qualifiés et non qualifiés : une proposition d'aménagement de la nomenclature des catégories socioprofessionnelles"*, Travail et Emploi, n° 86, p. 87  
Chenu A. (2002), *"Les horaires et l'organisation du temps de travail"*, Economie et statistique N° 352-353, pp. 151-167.

## Contact

**Patrick SILLARD**

Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE)  
Département des études économiques d'ensemble  
Timbre G220  
15, boulevard Gabriel-Péri,  
BP 100 - 92244 Malakoff CEDEX  
courriel : patrick.sillard@insee.fr

## ABSTRACT

*This article draws a general picture of the French private sector of Geographic Information. The main part of the sector corresponds to land surveyors and for a smaller part, to GIS software and navigation data publishers. The global turnover for the land surveyors sector is around 0.9 Bn.€. This sector represents 12800 jobs in 2003. Within the surveyor companies, 10% of jobs are executive ones, as the share jumps to more than 60% for data and software publishers. The annual growth of the sector is very suitable (4% for the sales turnover) and proves that the sector behaves quite well.*

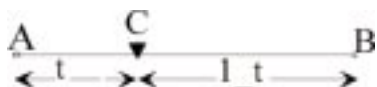


# Les courbes, les splines cubiques et autres

■ Claude MILLION

*Dans un article précédent on a donné toutes les généralités concernant le tracé ou le calcul des courbes quelconques [1] :*

- Soit la définition paramétrique d'une droite A-B
- Soit une droite définie par les coordonnées de ses deux extrémités A et B :



*Les coordonnées  $c$  d'un point  $C$  situé entre A et B peuvent être calculées par la relation :*

$\vec{c} = \vec{a} \cdot (1 - t) + \vec{b} \cdot t$  variant de 0 à 1 le point C parcourt le tronçon de droite A-B, si C est confondu avec A, alors  $t = 0$ ,  $1-t = 1$  on aura bien  $c = a$ , si C est confondu avec B :  $t = 1$   $1-t = 0$ , on aura  $c = b$ . Il est possible de sortir du segment A-B en donnant à  $t$  des valeurs positives supérieures à 1 pour aller au-delà de B ou simplement négatives pour aller en deçà de A. On a déjà rencontré cela dans les applications sur les symétries. L'essentiel sera de n'utiliser que des courbes paramétriques et non des courbes du type  $y = f(x)$

## Les courbes de Bézier

Il n'est pas question de reprendre ici tous les développements théoriques qu'on retrouvera dans des ouvrages spécialisés. On s'en tiendra aux cas les plus courants de la pratique. Les courbes de



Signe n° 14" Photo Yvette Velay

Bézier sont tracées à partir de points de définition lesquels peuvent se déplacer entraînant une déformation de la courbe. Ces points de définition ne sont pas, sauf pour le premier et le dernier points de la courbe à tracer, des points de passage ou des points d'appui de la courbe comme dans le tracé des splines. Ces courbes sont des paraboles de degré égal au nombre de points de défini-

tion moins un. Au-delà de trois points de définition, décrivant un plan sur lequel se trace cette courbe, ces courbes tracées sont gauches si les points de définition ne sont pas situés dans le même plan. Le tracé des courbes ne dépend que d'un paramètre  $t$  variant de 0 à 1 sur toute l'étendue du tracé de la courbe,  $t = 0$  (zéro) à l'origine, et  $t = 1$  à la fin de la courbe  $t \in [0, 1]$ . Les coordonnées

...

- des points de la courbe (2 ou 3) sont des fonctions polynômes de Bernstein  $t^i(1-t)^{n-i}$  de ce seul paramètre. Et des coefficients du triangle de Pascal sur les combinaisons de  $n$  points  $i$  à  $i$  :

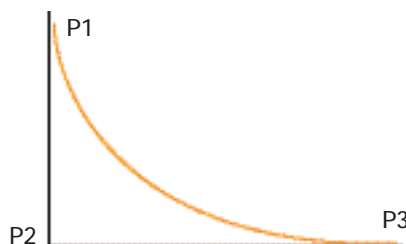
$$B(t) = \sum_{i=0}^n C_n^i t^i (1-t)^{n-i} P_i$$

$$\text{où, } B(t) = \sum_0^n \text{poids}(i) \cdot P_i$$

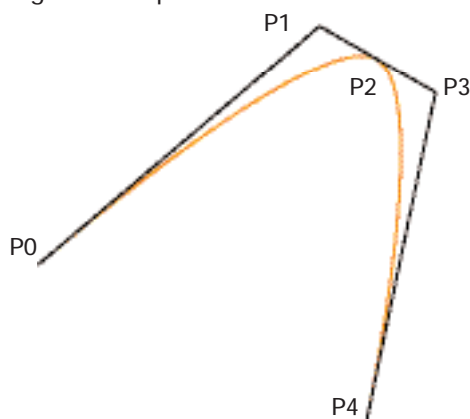
est la coordonnée ( $x, y$ , ou  $z$ ) du point de la courbe,  $P_i$  représente la même coordonnée du point de définition.

$C_n^i$  ou  $\binom{n}{i}$  représente le nombre de combinaisons de  $n$  points de définition  $i$  à  $i$ .

Cette description, directement issue d'anciens procédés de tracé des courbes en atelier, poserait des problèmes de calcul pour des degrés élevés mais on dépasse rarement le troisième degré. Ci-dessous le tracé d'une courbe de Bézier définie par trois points, c'est un arc de parabole carrée :



Une autre particularité de ces courbes de raccordement, au demeurant peu pratiques pour notre usage, réside dans le fait qu'il est tout de même possible de faire passer la courbe sur un point connu P2 ; il suffit de le placer sur la droite joignant deux points de définition P1-P3.



Mais, naturellement, on augmente la courbe d'un degré, ce qui n'est pas toujours souhaitable, surtout si les points de passage sont nombreux. On recherchera des courbes qui nous seront plus utiles.

## Les courbes paramétriques cubiques

Ce sont des courbes définies par un système d'équations paramétriques cubiques, largement suffisantes pour notre usage surtout si elles sont utilisées par tronçons successifs :

$$x(t) = a_x t^3 + b_x t^2 + c_x t + d_x$$

$$y(t) = a_y t^3 + b_y t^2 + c_y t + d_y, \quad t \in \mathbb{R}$$

$$z(t) = a_z t^3 + b_z t^2 + c_z t + d_z, \quad t \in [0,1]$$

Définition mathématique : soit un vecteur  $\vec{T} = \langle t^3, t^2, t, 1 \rangle$  et un vecteur  $\vec{X} = \langle x(t), y(t), z(t) \rangle$  le système d'équations paramétriques peut s'écrire :

$$\vec{X} = \vec{T} \cdot \mathbf{C} \text{ avec } \mathbf{C} = \begin{bmatrix} a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \\ c_x & c_y & c_z \\ d_x & d_y & d_z \end{bmatrix}$$

Les courbes de cette famille sont continues comme leurs dérivées premières et secondes. Quatre coefficients sont nécessaires pour définir chaque coordonnée, soit douze coefficients pour trois coordonnées, ce qui sera le cas le plus courant. On impose quatre contraintes mathématiques pour définir l'équation sur trois axes.

Les courbes de cette famille ont la propriété d'être continues, ainsi que leurs dérivées premières et secondes.

On transforme la matrice  $\mathbf{C}$  donnée ci-dessus en une matrice  $\mathbf{M} \cdot \mathbf{G}$  où  $\mathbf{M}$  est une matrice 4.4 appelée matrice de base, et  $\mathbf{G}$  une matrice composée de quatre vecteurs colonnes appelés vecteurs de géométrie, il s'agit habituellement de quatre points de l'espace de représentation car la courbe est du troisième degré : degré = nombre de points de définition-1.

$\vec{X} = \langle x(t), y(t), z(t) \rangle = \mathbf{T} \cdot \mathbf{C} = \mathbf{T} \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{G}$ ,  $\mathbf{C} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{G}$   
La courbe générée évoluera entre ces quatre points de définition ou de passage suivant les cas. La matrice  $\mathbf{M}$  permet de donner des poids à chacun des coefficients du vecteur  $\vec{T} = \langle t^3, t^2, t, 1 \rangle$  permettant de définir l'allure de la courbe obtenue.

$$\vec{T} = \langle t^3, t^2, t, 1 \rangle \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} \\ g_{41} & g_{42} & g_{43} \end{bmatrix}$$

Si on se donne deux points connus par leurs coordonnées P1 et P2, et qu'on veuille définir une courbe paramétrique cubique passant par P1 et P2 et ayant des pentes P'1 en P1 et P'2 en P2, on aurait, sans difficultés :

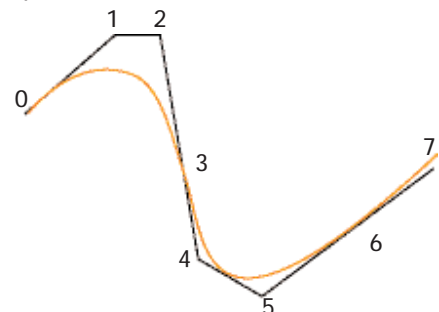
$P_1 = d, P_2 = a + b + c + d, P'_1 = c, P'_2 = 3a + 2b + c$  car en 1, on a :  $t = 0$ , et  $t = 1$  en 2. On remarquera que  $a, b, c, d$ , ont la dimension d'une coordonnée et que, par conséquent, les matrices fournissent une pondération, et que le résultat est une coordonnée barycentrique !

## Courbes de Bézier

Si le degré de la courbe est égal à trois (3) les quatre points de définition sont les  $g$  ci-dessus, on obtient les résultats suivants :

$$\vec{T} = \langle t^3, t^2, t, 1 \rangle \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} \\ g_{41} & g_{42} & g_{43} \end{bmatrix}$$

On peut faire facilement des tracés continus en faisant en sorte que le dernier sommet de la première courbe soit le premier de la suivante tout en restant sur

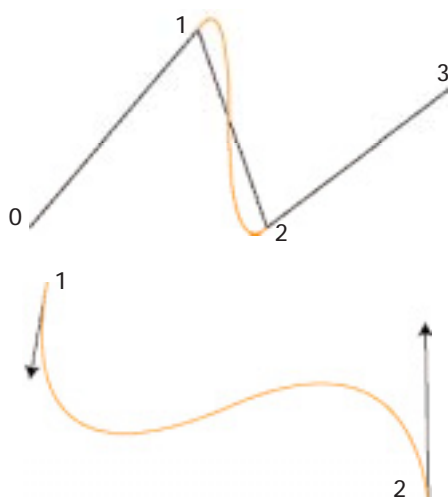


une droite commune aux deux courbes. Voir sur la figure les points 3 et 6.

On s'assure que 2-3 et 3-4 sont colinéaires. Si on veut que la dérivée seconde soit continue les distances 2-3 et 3-4 devront être égales.

## Splines d'Hermite

Toutes les courbes dérivées directement de celles de Bézier ont le grave défaut de ne pas passer par les points de définition, on arrêtera provisoirement ici leur étude pour se pencher sur les splines paramétriques cubiques qui passent sur les points d'appui. On va commencer par montrer que ces



cubiques sont dérivées d'un même modèle déjà ancien la spline d'Hermite.

Pour calculer une spline cubique d'Hermite on a besoin de quatre vecteurs :

- Les coordonnées du point de départ 1
- La tangente au point de départ, c'est une direction, on verra que parfois ce n'est pas indispensable par exemple si on trace une parabole carrée.
- Les coordonnées du point d'arrivée 2
- La tangente au point d'arrivée 2. On verra que parfois ce n'est pas indispensable par exemple si on trace une parabole carrée.

On indique ainsi les moyens de calculer quatre paramètres par coordonnée qui définit paramétriquement la cubique joignant 1 à 2.

Les fonctions de base sont :

$$h_1(t) = 2.t^3 - 3.t^2 + 1$$

$$h_2(t) = -2.t^3 + 3.t^2$$

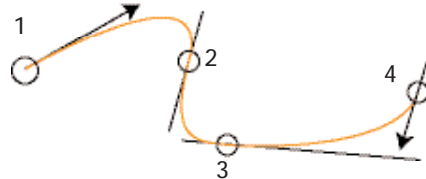
$$h_3(t) = t^3 - 2.t^2 + t$$

$$h_4(t) = t^3 - t^2$$

On multiplie les coordonnées du point de départ 1 par  $h_1$ , et celles du point d'arrivée par  $h_2$ . Les valeurs de  $h_3$  et  $h_4$  sont appliquées de la même manière aux tangentes. On obtient les résultats globaux suivants :

$$\vec{T} = \langle t^3, t^2, t, 1 \rangle \begin{bmatrix} 2 & -2 & 1 & 1 \\ -3 & 3 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_{1x} & g_{1y} & g_{1z} \\ g_{2x} & g_{2y} & g_{2z} \\ g'_{1x} & g'_{1y} & g'_{1z} \\ g'_{2x} & g'_{2y} & g'_{2z} \end{bmatrix} = \langle x(t), y(t), z(t) \rangle$$

1.4                      4.4                      4.3



Faisons varier  $t$  de 0 à 1 pour parcourir toute la courbe. On peut enchaîner plusieurs courbes qui se suivent.

Pour notre usage, nous ne trouvons que des avantages à conserver cette définition, d'autant que rien ne s'oppose à tracer des figures fermées, ce qui était impossible avec les splines ordinaires ( $y=f(x)$ ), pour d'autres usages la nécessité de donner la pente de la courbe en chaque point aurait été considérée comme rédhibitoire. Pour cette raison les auteurs ont tenté de trouver des moyens de se soustraire à cette obligation.

Si on retient la définition du début, on aurait,  $a, b, c, d$  en résolvant :

$$a = 2.[P_1 - P_2] + P'_1 + P'_2$$

$$b = 3.[P_1 - P_2] - 2.P'_1 - P'_2$$

$$c = P'_1$$

$$d = P_1$$

## Les splines cardinales

Les auteurs ont trouvé un moyen assez facile pour ne pas avoir à calculer les tangentes tout au long d'un tracé qui peut être important. La tangente adoptée peut être parallèle aux deux points voisins du tronçon calculé, le précédent et le suivant :  $\vec{g}_i = c.(P_{i+1} - P_{i-1})$ ,  $c \in [0,1]$ , où  $c$ , compris entre 0 et 1, est une constante qui affecte la raideur de la courbe. On notera, essentiellement, qu'il faut connaître le point précédent et le point suivant de la courbe, et qu'elle ne passera pas par ces points qui ne sont là que pour définir une tangente à l'origine et à la fin, même en doublant ces points sur une droite on n'assurerait pas un raccordement tangent.

## Les splines de Catmull-Rom

Ce sont des splines cardinales pour lesquelles  $c=1/2$  :

$$\vec{g}_i = \frac{1}{2} \cdot (P_{i+1} - P_{i-1})$$

Donnons-nous  $n+1$  points d'appui :  $[P_0, P_1, P_2, \dots, P_n]$ , on veut tracer des cubiques paramétriques passant par ces points et qui ne soit affectées que localement par le déplacement d'un seul point, on aura en finale l'équation suivante :

$$\vec{T} = \langle t^3, t^2, t, 1 \rangle \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 2 & -5 & 4 & -1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_{1x} & g_{1y} & g_{1z} \\ g_{2x} & g_{2y} & g_{2z} \\ g_{3x} & g_{3y} & g_{3z} \\ g_{4x} & g_{4y} & g_{4z} \end{bmatrix}$$

1.4                      4.4                      4.3

## Les splines de Kochanek-Bartels

Elles sont directement dérivées des précédentes, mais on introduit trois constantes de définition de la spline :

- la tension  $\tau$
- la continuité  $\gamma$
- le biais  $\beta$ .

La tangente d'entrée TE et la tangente de sortie TS seront :

$$T_E = \frac{(1-\gamma)(1-\tau)(1+\beta)}{2} (P_2 - P_1) + \frac{(1-\gamma)(1+\tau)(1-\beta)}{2} (P_1 - P_0)$$

$$T_S = \frac{(1-\gamma)(1+\tau)(1+\beta)}{2} (P_1 - P_0) + \frac{(1-\gamma)(1-\tau)(1-\beta)}{2} (P_2 - P_1)$$

figure courbes 1

Sur la figure on remarquera que les tangentes en chaque point de passage sont parallèles aux droites joignant le point situé avant le point de tangence au point situé immédiatement après. C'est la définition des splines de Catmull-Rom pour lesquelles on a établi un logiciel de démonstration, largement complété.

On va étudier l'effet d'un seul paramètre  $t$  la tension  $\sigma$  la matrice de pondération  $M$  d'une B-spline, par exemple deviendra :

$$M = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} -\sigma & 12-9.\sigma & 9.\sigma-12 & \sigma \\ 3.\sigma & 12.\sigma-18 & 18-15.\sigma & 0 \\ -3.\sigma & 0 & 3.\sigma & 0 \\ \sigma & 6-2.\sigma & \sigma & 0 \end{bmatrix}$$

alors que normalement la matrice  $M$  d'une B-spline est :

$$M = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

avec :  $\sigma = \frac{1-t}{2}$  variant de 0 à 1.



- Le paramètre  $t$  est appelé paramètre de tension car il détermine comment le tracé de la courbe suivra les points de passage au plus près avec  $t=0$  on retrouve dans le cas des splines de Cattmull-Rom, pour  $t=1$  on "colle" directement sur le polygone des points de passage et les courbes disparaissent. Ce paramètre est appelé tension car si on appuie une lame élastique sur les points de passage elle prend la forme d'une spline cubique qu'on peut tendre, à la limite  $t = 1$ , elle perd toute raideur, et se comporte comme un fil tendu passant par tous les points d'appui. De la même manière une spline de Cattmull-Rom "tendue" devient :

$$X_{C-R}(t) = (t^3, t^2, t, 1) \begin{bmatrix} \alpha-1 & \alpha+3 & -3-\alpha & 1-\alpha \\ 2-2\alpha & -5-\alpha & 2\alpha+4 & \alpha-1 \\ \alpha-1 & 0 & 1-\alpha & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{01} \\ P_{11} \\ P_{02} \\ P_{12} \end{bmatrix}$$

## Utilisation en topographie

On notera qu'il y a deux utilisations possibles de ces courbes splines en topographie :

- Pour le dessin automatisé de détails en courbe, et la description vectorielle d'un lever topographique ou de tout élément d'information géomatique de même nature : la description des rives d'un lac, ou de la limite d'une forêt par exemple.
- Pour la conception, le calcul, et l'implantation de courbes quelconques sur le terrain, avec toute la précision désirable, car on peut multiplier les points de la courbe autant qu'il en est besoin, et les calculer avec autant de décimales que nécessaire.

Pour cela il faut se donner quelques définitions :

On désignera par point des passages (p) un point d'une courbe où celle-ci doit rester continue, c'est-à-dire ne pas présenter de cassure. Dans le langage mathématique on doit au moins assurer une continuité C1, on verra que nos courbes n'assurent pas de continuité C2. Par opposition au point précédent on désignera par point de sommet (s) un point où il faut marquer une brisure. Si deux points s se suivent le détail représenté est une droite. Si, dans une description, un point p fait suite à un point s, on utilisera une spline de Cattmull-Rom, ou mieux une spline libre qu'on

propose, jusqu'à rencontrer un nouveau point s, car les splines de C-R sont, en fait, contraintes à leurs extrémités, entre l'encastrement et la liberté totale.

Pour être complet, on doit créer des points (t) de tangence à la transition entre une droite et une courbe définie par des points p, donc avec une continuité C1, mais sans brisure au passage, aucune courbe décrite dans la littérature ne correspond à cette contrainte particulière fort courante. On a établi un logiciel, voir en fin.

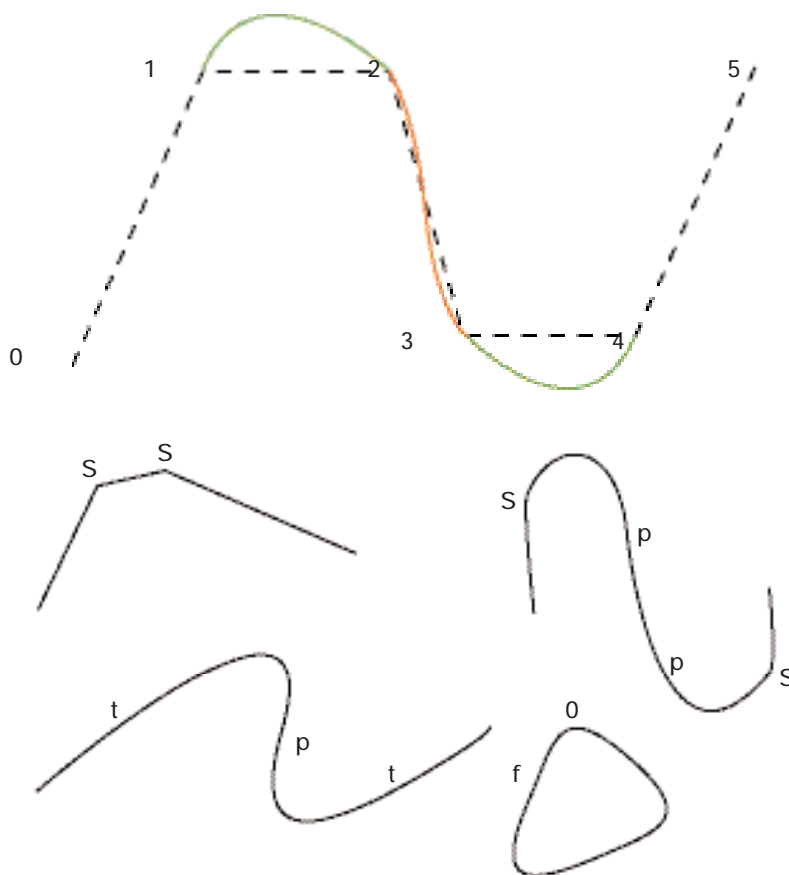
Enfin, on doit compléter cette typologie des points par le cas important des figures fermées pour lesquelles on n'a rien trouvé dans la littérature, ce qui ne signifie pas que cela n'existe pas. Afin d'éviter des confusions, le dernier sommet ou le dernier point de passage ne seront pas décrits une seconde fois sur les figures fermées. On indiquera que la figure se ferme par un point f, ce qui signifiera qu'il fait tracer un trait ou une courbe entre ce point f et le premier point de la description de l'objet 0.

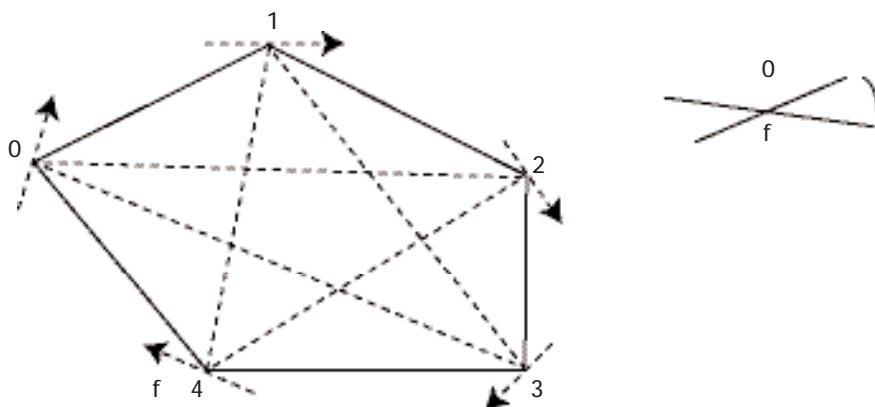
Il nous a donc fallu traiter le cas des figures fermées constituées d'arcs de

splines cubiques, et les cas où les raccordements se font tangentiellement avec des droites, c'est-à-dire en continuité, ou par une articulation. Pour tous les autres cas les droites ou les splines de Cattmull-Rom seront très satisfaisantes.

## Figure fermée

Rappelons encore une fois que le premier et le dernier côtés d'une spline de Cattmull-Rom servent seulement à définir les tangentes d'entrée et de sortie. Dans une courbe fermée elles doivent servir aussi de point de passage, ce qui oblige à prolonger le polygone des points de passage de chaque côté du vecteur de fermeture par des points déjà connus. Cela se fait uniquement par la programmation et l'utilisateur qui a déclaré un point f ne sait pas que la déclaration de ce point entraîne tout un processus destiné à fermer le polygone et à tracer les splines. Il faut prendre la précaution de ne pas tracer à l'écran le dernier côté car on créerait un point double qui donnerait naissance à une boucle raccordée aux splines voisines : voir sur la figure quand 0 et f sont confondus.





$$\begin{aligned}
 \text{ME} &= \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} -2 & +5 & -4 & +1 \\ 4 & -9 & +6 & -1 \\ -2 & +2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ ou ME' plus loin.} \\
 \text{MS} &= \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} -1 & +4 & -5 & +2 \\ +2 & -6 & +6 & -2 \\ -1 & +1 & 0 & 0 \\ 0 & +2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 \text{MM} &= \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} -2 & +6 & -6 & +2 \\ +4 & -10 & +8 & -2 \\ -2 & +2 & 0 & 0 \\ 0 & +2 & 0 & 0 \end{bmatrix} , \text{ ou MS' ci-dessous.}
 \end{aligned}$$

Le tracé des courbes fermées n'est donc qu'un petit problème de programmation des splines de Cattmull-Rom classiques.

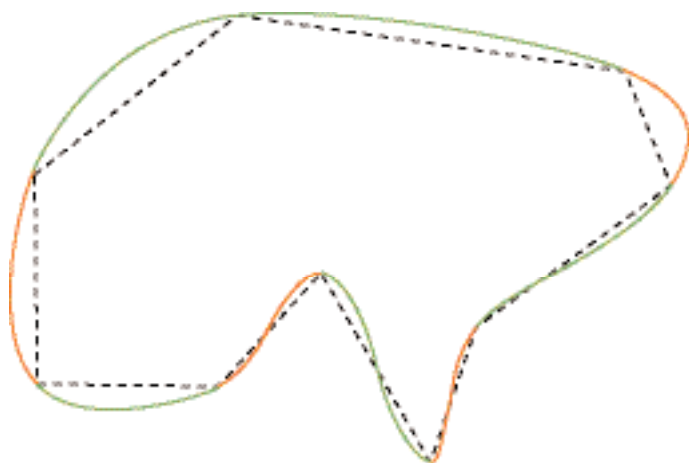
## Raccordements tangentiels

Les matrices M des raccordements tangentiels en entrée ME et en sortie MS de courbe différent de la matrice de C-R en sorte qu'on a différents cas de figure :

- Cas où deux points t encadrent des points p, par exemple la séquence : t..p..p..t. On doit donc appliquer les matrices suivantes dans l'ordre suivant ME..CR..CR..CR..MS
- Cas où on a en entrée un point s, puis des points p, enfin en sortie un point t, par exemple la séquence s..p..p..p..t dans ce cas on utilise successivement les matrices CR..CR..CR..CR..MS
- Cas où on a en entrée un point t, puis des points p, enfin en sortie un point s, par exemple la séquence t..p..p..p..s, dans ce cas on utilise successivement les matrices ME..CR..CR..CR..CR.

Ce dernier cas ne devrait pas exister, mais l'expérience montre que les utilisateurs poussent toujours un logiciel à la limite de ses possibilités, même si cela est contraire aux règles de l'art qui imposeraient de mettre au moins un point sur la courbe ; c'est celui où deux points t se suivent sans point p intermédiaire. C'est-à-dire que la courbe est définie par deux points et par ses tangentes en ces deux points soit la séquence....t..t.... les matrices ME et MS ne sont valables que pour la transition entre un point t et un point p ou t et p et pas du tout entre deux points t successifs. On doit recalculer une matrice spéciale en entrée et en sortie tangentes soit MM (spline mixte en entrée et en sortie). Celle-ci en raison de la présence de symétrie dans sa formulation est, en définitive, très intéressante.

On va donner, ci-dessous, les différentes matrices, peut-être inconnues, en tout cas moins connues que C-R, soit ME, MS, et MM, qu'on a calculées.



## Raccordements libres

En complément des raccordements tangentiels il faut pouvoir se raccorder librement sans contraintes, ce que ne font pas les splines de Cattmull-Rom, qui imposent la direction de la tangente d'entrée et de sortie des courbes. Au paragraphe précédent on a imposé des conditions de continuité différentes de ces dernières, pensant qu'elles seront plus utiles pour le topographe, on va maintenant libérer totalement les conditions d'entrée et de sortie. La tangente imposée sera celle située immédiatement après le point d'entrée, et avant le point de sortie. Ce qui fait que pour le premier et le dernier tronçons nous n'aurons plus que trois contraintes. Ces courbes ne pourront plus être des splines cubiques mais des arcs de parabole carrée assurant, au point de passage, la continuité avec les splines cubiques qui suivent. On a donc, en conservant les mêmes notations,  $\vec{a} = 0$ , donc les équations des arcs d'entrée et de sortie sont :  $\vec{b} \cdot t^2 + \vec{c} \cdot t + \vec{d}$  avec à l'entrée :

$$\vec{P}_0 = \vec{d}, \vec{P}'_0 = \vec{b} + \vec{c} + \vec{d}, \vec{P}'_0 = 2\vec{b} + \vec{c}, \text{ et à la sortie :}$$

$$\vec{P}_{(n-1)} = \vec{d}, \vec{P}_{(n)} = \vec{b} + \vec{c} + \vec{d}, \vec{P}'_{(n-1)} = \vec{c}, \text{ 0 étant le premier point articulé et n le dernier. Ce qui donne, à l'entrée :}$$

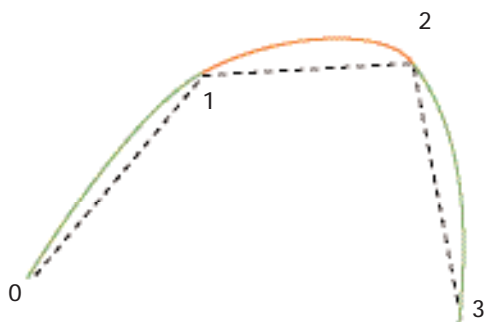
$$2\vec{b}_E = \vec{P}_0 - 2\vec{P}_{(1)} - \vec{P}_{(2)},$$

$$2\vec{c}_E = 3\vec{P}_0 + 4\vec{P}_{(1)} - \vec{P}_{(2)}, \text{ et en sortie :} \\
 2\vec{d}_E = 2\vec{P}_0$$

$$2\vec{b}_E = \vec{P}_{(n-2)} - 2\vec{P}_{(n-1)} - \vec{P}_{(n)},$$

$$2\vec{c}_E = 2\vec{P}_{(n-2)} + \vec{P}_{(n)}$$

$$2\vec{d}_E = 2\vec{P}_{(n-1)}$$



... et pour reprendre la notation matricielle générale :

$$ME' = \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -2 & +1 \\ 0 & -3 & +4 & -1 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$MS' = \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -2 & +1 \\ 0 & -1 & +1 & 0 \\ 0 & +2 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

## Stockage des données

Comment stocker économiquement les données concernant les courbes dans une banque ? Le problème est surtout de ne stocker que le minimum de nombres définissant une courbe quelconque. On a déjà opté, pour définir une courbe complexe, par une suite d'arcs de cubique ou de parabole carrée. Dans ce cas, il semble que le plus simple serait de ne stocker que les paramètres  $a, b, c, d$  pour chacune des coordonnées, c'est-à-dire le produit M.G des matrices  $M$  qui intègrent les cas de tangence, cassure, continuité etc. et les données purement géométriques de  $G$ , ce qui fait 4 fois le nombre de coordonnées par arc, soit huit dans le plan, et douze dans l'espace 3-D. On rappellera que le paramètre  $d$  est composé des coordonnées du point de passage d'origine de la courbe, et qu'en plus du stockage inévitable de ces points de passage il n'y a guère en plus que six ou huit paramètres de définition de la courbe par arc, par conséquent l'information est complète et minimisée. A l'aide de ces données, on restitue, par

des calculs simples, toutes les coordonnées des points de la courbe, avec n'importe quel pas, aussi petit qu'on veut, avec toute la précision désirée, sans réelles limites.

## Rectification des courbes et surfaces en courbe

Une donnée qui peut être importante dans certaines applications est la longueur de la courbe. Il peut être intéressant de profiter du calcul des points de la courbe pour déterminer sa longueur développée.

Soit une fonction  $y = f(x)$  différentiable dans un intervalle  $[a, b]$ , la longueur de l'arc est donnée par :

$$s(x) = \int_a^x \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx$$

Dans le cas général ce n'est guère pratique, sauf dans des cas très particuliers aucune solution générale n'existe, c'est pourquoi on se servira de l'ordinateur comme d'un intégrateur. On généralisera d'abord la formule au cas des courbes paramétriques ci-dessus en lui donnant la forme suivante :

$$s[a, b] = \int_0^1 \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)_i^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)_i^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)_i^2} \cdot dt$$

$$\left(\frac{ds}{dt}\right)^2 = \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2, \quad s[a, b] = \int_0^1 \sqrt{\left(\frac{ds}{dt}\right)_i^2} \cdot dt$$

en discrétisant :

$$s = \sum_{i=0}^1 (\sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2 + \Delta z_i^2}), \quad \text{ou} \quad s = \sum_{i=0}^1 \left( \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)_i^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)_i^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)_i^2} \right) \cdot \Delta t$$

On aait :

$$x(t_0^1) = a_x \cdot t^3 + b_x \cdot t^2 + c_x \cdot t + x_0; \quad \frac{dx_i}{dt} = (3 \cdot a_x \cdot t^2 + 2 \cdot b_x \cdot t + c_x) / 2$$

$$y(t_0^1) = a_y \cdot t^3 + b_y \cdot t^2 + c_y \cdot t + y_0; \quad \frac{dy_i}{dt} = (3 \cdot a_y \cdot t^2 + 2 \cdot b_y \cdot t + c_y) / 2$$

$$z(t_0^1) = a_z \cdot t^3 + b_z \cdot t^2 + c_z \cdot t + z_0; \quad \frac{dz_i}{dt} = (3 \cdot a_z \cdot t^2 + 2 \cdot b_z \cdot t + c_z) / 2$$

puis

$$\Delta x^2 = \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 \cdot \Delta t^2, \quad \Delta y^2 = \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 \cdot \Delta t^2, \quad \Delta z^2 = \left(\frac{dz}{dt}\right)^2 \cdot \Delta t^2$$

On peut ainsi calculer un périmètre d'une courbe fermée ou la longueur d'une courbe ouverte.

En outre, il peut être intéressant de calculer, dans le même temps, la surface entourée par des limites courbes. En assimilant la surface limitée par une courbe à un polygone d'un grand nombre de côtés on peut faire le calcul par la formule bien connue :

$$A = \frac{1}{2} \cdot \left[ \sum_{i=1}^{n-1} (x_i \cdot y_{i+1} - x_{i+1} \cdot y_i) + x_n \cdot y_1 - x_1 \cdot y_n \right]$$

Mais, en chaque point, on calcule le couple  $\begin{matrix} x_i \\ y_i \end{matrix}$  et on vient de calculer

$$\Delta x = \left(\frac{dx}{dt}\right) \cdot \Delta t, \quad \Delta y = \left(\frac{dy}{dt}\right) \cdot \Delta t$$

on peut transformer la formule en :

$$A = \frac{1}{2} \cdot \left[ \sum_{i=0}^n \left( x_i \cdot \frac{dy_i}{dt} - \frac{dx_i}{dt} \cdot y_i \right) \cdot \Delta t + x_n \cdot y_0 - x_0 \cdot y_n \right]$$

ce qui évite de retrancher des valeurs relativement grandes, telles que, ce qui est toujours défavorable dans les calculs sur des nombres quelconques (non entiers dit "flottants"). La formule devient :

$$A = \frac{1}{2} \cdot \left[ \sum_{i=0}^n (x_i \cdot \Delta y_i - \Delta x_i \cdot y_i) + x_n \cdot y_0 - x_0 \cdot y_n \right]$$



Le calcul, très rapide, peut se faire au cours d'une consultation, ce qui évitera de stocker ces données dans la banque, en outre, la précision des résultats sera fonction de la "discretisation", c'est-à-dire du pas de  $t$  adopté, sans pour autant attendre d'une augmentation de la finesse du pas des résultats plus "exacts" si les points de passage, les seuls objets des mesures, sont peu nombreux !

## Courbures

La variation des courbures est un sujet d'intérêt pour le tracé des courbes de voies de circulation, on s'est largement étendu sur ce sujet en traitant des clothoïdes et des spirales dans un article sur ce sujet [2]. Les courbes qu'on vient de décrire, malgré certaines apparences, ne conviennent généralement pas à cet usage, car on ne maîtrise pas convenablement les courbures. Toutefois, elles peuvent être d'un grand intérêt dans les tracés d'avant-projet ou de chemin en montagne.

On calculera la courbure d'une spline d'Hermitte et de toute la famille qui en descend, à savoir : les splines cardinales, de Catmull-Rom etc.

On utilise la relation :

$$C^2 = \left(\frac{d^2x}{ds^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2y}{ds^2}\right)^2$$

on a par ailleurs, voir au précédent paragraphe :

$$\left(\frac{ds}{dt}\right)^2 = \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2$$

d'où :

$$C^2 = \frac{\left(\frac{d^2x}{dt^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2y}{dt^2}\right)^2}{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2}$$

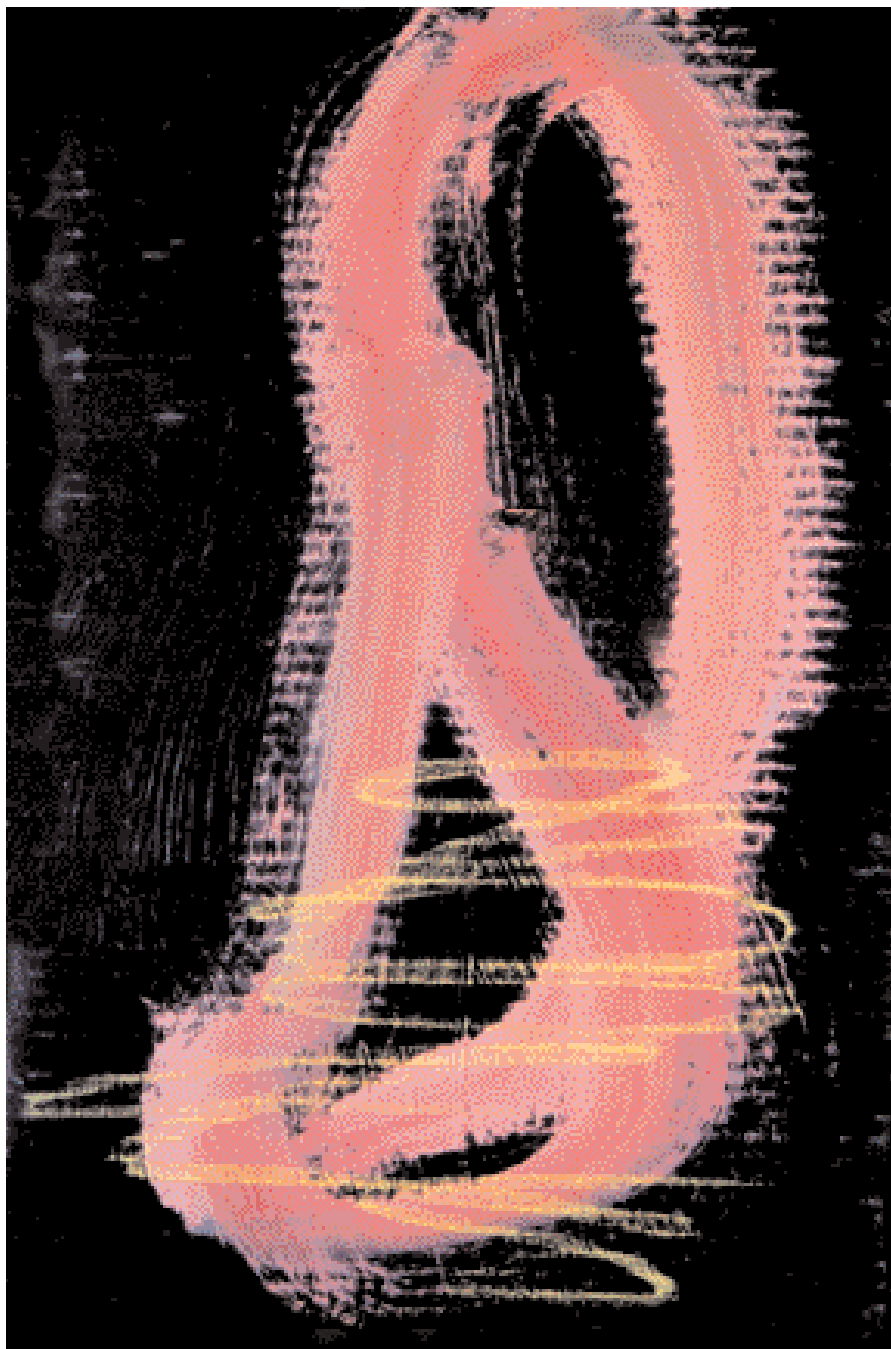
$$\left(\frac{d^2x}{dt^2}\right)^2 = (6.a_x.t + 2.b_x)^2 = 36.a_x^2.t^2 + 24.a_x.b_x.t + 4.b_x^2$$

$$\left(\frac{d^2y}{dt^2}\right)^2 = (6.a_y.t + 2.b_y)^2 = 36.a_y^2.t^2 + 24.a_y.b_y.t + 4.b_y^2$$

$$\left(\frac{d^2x}{dt^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2y}{dt^2}\right)^2 = 36.(a_x^2 + a_y^2).t^2 + 24.(a_x.b_x + a_y.b_y).t + 4.(b_x^2 + b_y^2)$$

$$\left(\frac{ds}{dt}\right)^2 = \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 = 9.(a_x^2 + a_y^2).t^4 + 12.(a_x.b_x + a_y.b_y).t^2 + 2.(b_x.c_x + b_y.c_y).t + c_x^2 + c_y^2$$

$$C^2 = \frac{36.(a_x^2 + a_y^2).t^2 + 24.(a_x.b_x + a_y.b_y).t + 4.(b_x^2 + b_y^2)}{9.(a_x^2 + a_y^2).t^4 + 12.(a_x.b_x + a_y.b_y).t^2 + 2.(b_x.c_x + b_y.c_y).t + c_x^2 + c_y^2}$$



"Signe n° 2" photo Yvette Velay

On peut, ainsi, calculer et tracer un graphe C-s avec la formule de rectification de la courbe (voir au paragraphe précédent).

$$s_i[a, b] = \sum_i \int_0^1 \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)_i^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)_i^2} . dt$$

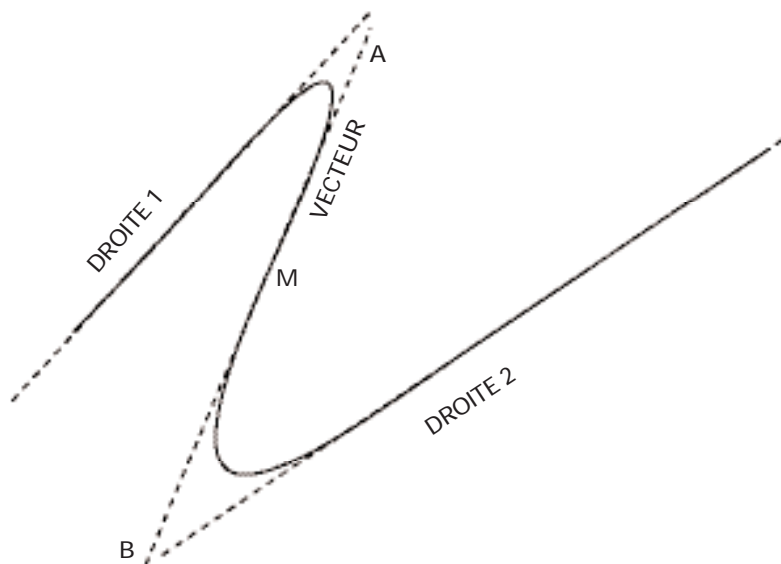
On a ainsi :

$$s = f(t) \text{ et } C = g(t), t \in [0, 1], t \in \mathbb{R}$$

on peut comparer la variation de courbure d'une spline cubique à celle d'une clothoïde par exemple dans le même système de représentation.

On notera que la continuité en courbure, dite en C2, n'est pas assurée.

...



## ●●● Applications des courbes de Bézier simples

On est passé rapidement sur les courbes de Bézier, car les points de définition, sauf celui placé sur une droite limitée par deux autres points de définition qui l'encadrent, ne sont pas des points de passage. En outre, le degré de la courbe obtenue augmente avec le nombre de points de définition, ce qui a amené à la création des B-splines, lesquelles sont aussi des cubiques qui comme les splines de C-R n'ont pas ce défaut, mais ces courbes ne passent pas, non plus, sur les points de définition.

Toutefois, pour raccorder deux droites concourantes, une courbe de Bézier n'est que du second degré, et peut devenir utilisable. Ensuite, pour raccorder deux droites non concourantes en 3-D, au point où elles sont les plus proches l'une de l'autre, une courbe de Bézier sera une cubique qui pourrait parfaitement convenir à cet usage.

De même il sera toujours possible de faire passer une courbe de Bézier sur le point situé M à mi-distance sur la droite vecteur reliant les deux points les plus proches A et B de deux droites 1 et 2. On verra la figure un peu caricaturale ci-dessus, on notera que dans ce dernier cas la courbe est du quatrième degré et que cela peut lui donner des formes assez anguleuses.

## Intersections

La description des courbes étant faite par tronçons entre deux points de passage on ne peut pas employer les méthodes mathématiques tradition-

nelles pour calculer la, ou les intersections, entre une courbe et une droite. En revanche, l'informatique permet d'employer des méthodes qui, à défaut d'être élégantes utilisent la force brutale. Les intersections éventuelles entre une courbe et une droite se déterminent en parcourant la courbe, et en calculant en chaque point sa distance à la droite, on a la relation bien connue :

Soit la droite d'équation paramétrique

$$\vec{X} = \vec{A} + t \cdot \vec{n}$$

la perpendiculaire issue du point P de coordonnées, est encore un point de cette droite. On a :

$$d = \frac{|\vec{n} \wedge (\vec{p} - \vec{a})|}{|\vec{n}|} = |\vec{x}_0 - \vec{p}|$$

Si n est unitaire :

$$d = |\vec{n} \wedge (\vec{p} - \vec{a})|$$

$d = (p-a) \cdot \sin(\phi)$ . Ce qui est évident. La solution est obtenue pour  $d = 0$  ou  $d = \epsilon$  aussi petit qu'on le désire.

Les intersections entre deux courbes se calculent de la même manière, c'est-à-dire de façon encore plus brutale et moins élégante : pour chaque point de la première courbe on calcule sa distance à tous les points de la seconde. On est normalement entraîné dans un processus de calcul d'une durée exponentielle, mais sur les courbes assez courtes ce n'est pas un problème.

## Logiciels

On a tenu compte du fait que la lecture d'un tel article serait parfaitement

ennuyeuse sans applications mises à la disposition du lecteur. On a donc établi deux logiciels : l'un permet de tracer des courbes de Catmull-Rom ouvertes classiques ; dans le même logiciel on a donné la possibilité importante de tracer des contours fermés. Un second logiciel séparé, permet de tracer des courbes avec des contraintes de raccordement tangentes ou libres telles que décrites dans cet article. Il suffit de cliquer sur l'exécutable choisi puis d'agrandir la fiche qui apparaît à tout l'écran dont on dispose. On verra une flèche qui peut être déplacée à l'aide de la souris, on "cliquera" avec le bouton de gauche sur les positions des points choisis, un trait tiré joindra ces points de 0 à n. Puis, à la partie inférieure de l'écran, on choisira le tracé désiré et on fixera les contraintes aux extrémités. Pour le tracé des courbes fermées il est inutile, et même très nuisible, de fermer la figure soi-même, le programme le fera mieux que vous, car même en cas de double-clic accidentel sur un même point vous obtiendrez normalement une bouclette fermée passant deux fois sur ce point !

Chaque arc est distingué de ses voisins par deux couleurs rouge ou verte. En outre, le développement des courbes est calculé ainsi que la surface totale de la figure pour les courbes fermées, et la surface comprise entre la courbe et ses cordes pour les tracés ouverts, avec une règle des signes tenant à l'écriture de la formule des surfaces, le sens positif du tracé étant celui des aiguilles d'une montre, la surface positive étant à gauche de la corde, elle est négative à droite, l'inverse dans l'autre sens. Ces logiciels sont librement accessibles sur <http://perso.wanadoo/claude.million/logiciels/>. ●

## BIBLIOGRAPHIE

[1] 2001-1 Claude Million : Des courbes et des lignes in XYZ n°86

[2] 1992-1 Claude Million : La clothoïde dans tous ses états in Géotop n°124

1998-4 Claude Million : Mieux que la clothoïde, la spirale adoucie in XYZ n°77

Article illustré par Yvette Velay  
[www.yvettevelay.com](http://www.yvettevelay.com)

## N48°26'58" : le plus long parallèle de France

■ Kadidia DRAME - Guillaume BIZOUARD - Alban VUILLEMEY

***A l'occasion du 38<sup>e</sup> congrès des Géomètres-Experts qui aura lieu du 14 au 16 juin prochain à Saint-Malo et pour marquer ses 60 ans, l'Ordre des Géomètres-Experts (OGE) a lancé un vaste projet tournant autour du plus long parallèle de France, "la Ligne de Terre". Dans un souci de promotion de la profession auprès des étudiants, des professionnels et des élus, l'OGE organisera de multiples événements autour de ce plus long parallèle de France. Pour ce faire, il a fait appel aux quatre écoles d'ingénieurs françaises formant à la géomatique ENSG, ESGT, ESTP et INSA de Strasbourg. La première partie du projet consistait naturellement à déterminer la latitude du plus long parallèle. Les étudiants de l'INSA Strasbourg ont été chargés de cette mission. Deux calculs indépendants ont été réalisés et fournissent tous deux comme valeur pour la latitude N48°26'58". Dans un second temps, les étudiants ont répondu au souhait de l'OGE de recenser les communes situées dans une bande de 10 km autour de cette fameuse Ligne de Terre.***

### ■ mots-clés

Parallèle - Ligne de Terre -  
Frontières - Mercator -  
Ecoles d'ingénieur - INSA  
de Strasbourg - OGE

**L**e projet de calcul du plus long parallèle de France – Projet Ligne de Terre – initié par l'Ordre des Géomètres-Experts s'est également inscrit dans le cycle de formation d'ingénieur topographe à l'INSA de Strasbourg, par l'intermédiaire d'un Projet de Recherche Technologique (PRT) effectué lors du dernier semestre de la dernière année. Il a permis de répondre à un problème technologique particulier concernant la topographie. Ce sujet est apparu très intéressant puisque transversal, couvrant notamment plusieurs domaines comme la géodésie, les systèmes d'information géographique, la gestion de bases de données et la programmation. Les exigences de l'OGE étaient simples : calculer le plus rapidement possible la latitude du plus long parallèle afin de pouvoir communiquer autour de ce projet lors du Congrès de Saint-Malo du 14 au 16 juin 2006. Un autre souhait était d'éventuellement pouvoir se rendre sur un lieu de passage de ce parallèle en utilisant le réseau de stations permanentes TERIA. Les hypothèses de départ sont donc les suivantes :

- Les points extrêmes du parallèle devront se trouver sur terre (continent ou île d'un département du continent), le parallèle pouvant traverser une partie maritime.

- L'altimétrie ne sera pas prise en compte dans le calcul.
- Le résultat final sera fourni dans le datum RGF 93.

Les auteurs de cet article, trois étudiants de l'INSA de Strasbourg, se sont attelés à cette tâche.

### La démarche

Afin de pouvoir proposer un résultat défendable, deux méthodes de calcul indépendantes ont été élaborées. La figure 1 présente la démarche suivie pour répondre à l'objectif fixé par l'OGE. La première méthode employée est basée sur des calculs d'intersection. Elle consiste à passer par un calcul dans le plan avant de le rapporter à l'ellipsoïde. La seconde méthode utilise un principe de dichotomie. Cette dernière se calcule directement sur l'ellipsoïde.

Un calcul d'intersection de deux lignes tracées sur un ellipsoïde étant assez complexe, il est astucieux de rendre le problème plan en utilisant une projection qui transforme les parallèles et les méridiens en lignes droites comme la projection de Mercator (Sjöberg, 2002). La méthode par intersection nécessite des coordonnées planes. Les données initiales en RGF93 sont ainsi transformées

en coordonnées planes par l'intermédiaire d'une projection de Mercator. Intégrant ces nouvelles données initiales, nous avons élaboré un petit applicatif sous MatLab permettant de déterminer le couple de points homologues, localisés à la même latitude mais sur chacune des frontières. L'applicatif nous fournit également la distance séparant ces points homologues représentant les deux extrémités du parallèle recherché. Les paramètres du plus grand parallèle sont ainsi obtenus en coordonnées planes, une transformation inverse de Mercator permettant, à partir de là, de les exprimer en coordonnées géographiques dans le système géodésique RGF93.

Pour contrôler ce premier résultat, nous avons élaboré un second programme déterminant les paramètres du plus long parallèle en utilisant le principe de dichotomie appliqué directement aux couples de coordonnées géographiques.

### Les données

En utilisant différents outils et cartes à disposition à l'INSA de Strasbourg et en connaissant la forme générale des contours de la France, la particularité géographique de la pointe bretonne et à son opposé la frontière alsacienne



... se sont vite imposées comme contenant la fameuse "ligne" recherchée. Il s'agissait donc de travailler sur cette partie du tiers supérieur de la France. Pour ce faire, les deux jeux de données suivants ont été utilisés :

- **Données de la frontière côté est :** les Services du Cadastre de Strasbourg sont dépositaires des données concernant la frontière entre la France et l'Allemagne et les ont mises à disposition du projet. La première particularité de cette portion de frontière est qu'elle est située au milieu du Rhin et qu'elle est matérialisée physiquement par un double abornement, de chaque côté des rives du Rhin. La frontière correspond à la ligne médiane de ces matérialisations. Sa deuxième particularité est qu'elle est définie dans le traité franco-allemand comme une succession de segments droits et d'arcs de cercles pour lesquels les coordonnées des points principaux et les rayons des arcs de cercle sont fixés. Malheureusement, ces données n'avaient pas encore été numérisées.
- **Données de la frontière côté ouest :** Les données ont été fournies par le chef du projet "Ligne de Terre" à l'OGE, M. Progeas, Géomètre-Expert en Bretagne. Le fichier fourni était un fichier de DAO de toute la Bretagne élaboré à partir d'un extrait de carte IGN au 25000<sup>e</sup>.

## ■ Dessin et extraction des frontières

Dans le cadre de calculs géodésiques, les données fournies pour l'extrémité côté ouest n'ont pas pu être intégrées en l'état dans un processus de calcul. En effet, les informations utiles ont dû être extraites du fichier. Ainsi le dessin a été nettoyé pour ne conserver uniquement que l'extrême partie ouest de la Bretagne. Le fichier obtenu comporte alors un ensemble de bornes représentées par des points et reliées entre elles par des segments droits. Dans ce modèle, la distance moyenne entre deux bornes varie entre 20 et 80 m (30 m dans le cas de la limite de l'île d'Ouessant, lieu probable où se situe le parallèle recherché).

En ce qui concerne la frontière côté est, elle a dû être construite à l'aide de la liste des coordonnées des points et des instructions de construction entre deux points successifs : un arc de cercle (rayon donné) ou un alignement droit. Après avoir reconstitué cette frontière, chaque arc a été segmenté en tronçons droits de longueur 30 m afin d'avoir une frontière côté est définie avec une densité homogène et comparable à celle de la frontière côté ouest au niveau de la zone d'intérêt. Enfin, les fichiers DAO obtenus ont été reformatés en fichiers textes pour servir d'entrées dans les

programmes de calculs.

## ■ Transformation de coordonnées

Pour la bonne exécution des calculs, les coordonnées des points doivent être exprimées dans le même système de coordonnées. Or, le jeu de données côté ouest était exprimé en coordonnées Lambert II étendu alors que celui du côté est l'était en Lambert I. Etant donné que le résultat final devait être fourni en RGF 93, les deux jeux de données ont donc été transformés en coordonnées géographiques dans le datum RGF93, ce qui a permis de réviser nos bases en termes de géodésie.

Néanmoins, comme le programme d'intersection s'applique sur des coordonnées planes, une autre transformation est utilisée : la projection de Mercator. En effet, les calculs de distances sur l'ellipsoïde nécessitent des raisonnements en termes de loxodromie et d'orthodromie. Dans le cas de nos calculs, le parallèle le plus long correspond à une loxodromie. L'avantage d'employer la projection de Mercator réside dans le fait que les loxodromies sont projetées en des lignes droites dans le plan. Ainsi, les coordonnées RGF93 géographiques ont été transformées en coordonnées planes avec la projection de Mercator, suivant les formules de l'équation 1 (Snyder, 1987).

$$x = a(\lambda - \lambda_0)$$

$$y = \frac{a}{2} \ln \left[ \left( \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right) \left( \frac{1 - e \sin \varphi}{1 + e \sin \varphi} \right)^e \right]$$

### Equation 1 : Formules de la projection de Mercator

Avec x, y : coordonnées planes  
a = le demi grand axe de l'ellipsoïde  
e = excentricité de l'ellipsoïde  
l longitude du méridien de référence considéré,  
 $\varphi$  et  $\lambda$  : latitude et longitude du point considéré.

Cette formule fournit un résultat sous forme de coordonnées planes. En effectuant une transformation inverse on

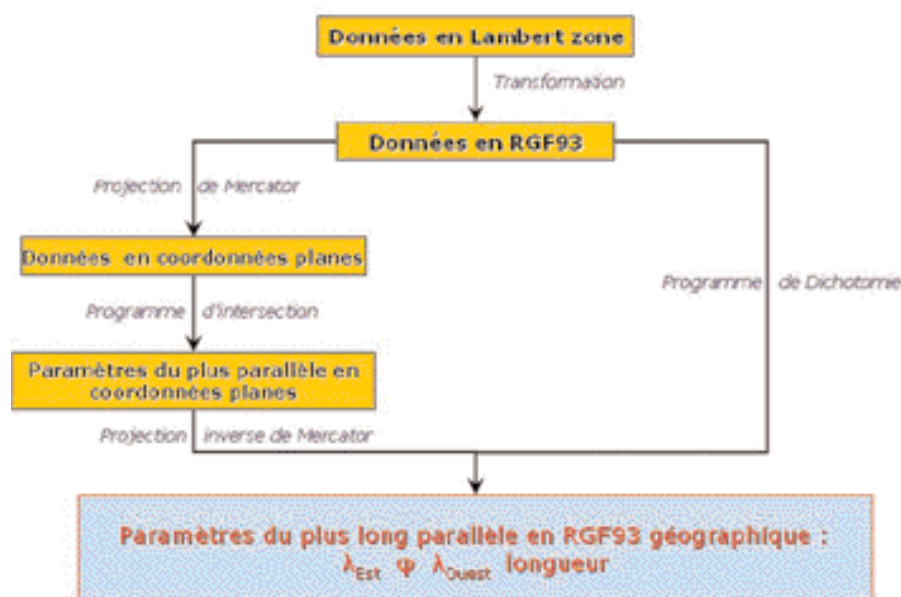


Figure 1 : Démarche employée pour le calcul du plus long parallèle

obtient donc les coordonnées en RGF93. Les formules sont présentées dans l'équation 2 (Snyder, 1987).

$$\lambda = \frac{x}{a} + \lambda_0$$

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - 2 \arctan \left[ \exp^{-\frac{x}{a}} \times \left( \frac{1 - e \sin \varphi}{1 + e \sin \varphi} \right)^{\frac{e}{2}} \right]$$

**Equation 2 : Calcul inverse de la projection de Mercator (notations identiques à l'équation 1)**

Après avoir traité et préparé les données, les calculs peuvent débuter.

## Méthodes de calculs

Les deux méthodes évoquées dans le paragraphe décrivant notre démarche ont été implémentées sous le logiciel MatLab. Avant de détailler ces implémentations, il est nécessaire de réaliser une présélection de points dans l'échantillon de données. Comme en réalité les limites sont matérialisées par des bornes, ce traitement préliminaire est développé dans un programme appelé "Recherche de bornes".

### ■ Le programme "Recherche de bornes"

Comme points de départ de nos programmes, nous disposons de deux listes de coordonnées relativement volumineuses. Ces coordonnées sont celles des bornes situées le long des deux frontières. Ces listes n'ont aucun lien entre elles a priori. Ainsi, le but principal de ce premier programme est de réduire le secteur de recherche.

Le principe de base dudit programme consiste à trouver pour chaque point côté ouest son point homologue côté est, et inversement, pour chaque point côté est, son homologue côté ouest situés tous deux sur le même parallèle. Cette méthode permet de découper chaque frontière en une ligne polygonale dont l'un des sommets et son homologue formeront les extrémités du plus long parallèle recherché.

Pour le calcul des points homologues, on peut utiliser la méthode d'intersection et contrôler les résultats par dichotomie

même si les deux méthodes utilisent deux systèmes de coordonnées différents (coordonnées géographiques et planes). A présent, on peut lancer le processus de localisation du plus long parallèle.

### ■ Le programme "Intersection"

A partir d'un point d'une frontière, par exemple le point 1, le programme précédent nous fournit les deux bornes situées sur l'autre frontière, point 2 et point 3 (cf. figure 2).

Le programme "Intersection" permet ensuite de trouver, pour chaque point d'une frontière, le point situé à la même latitude sur l'autre frontière.

Ce programme est très simple puisqu'il met en œuvre le principe d'intersection de droites dans un plan. La Figure 3 rappelle les formules de Delambre.

$$[1M] = \frac{\Delta x \times \cos(A_2) - \Delta y \times \sin(A_2)}{\sin(A_1 - A_2)}$$

où  $\Delta x = X_2 - X_1$  et  $\Delta y = Y_2 - Y_1$

$$[2M] = \frac{\Delta x \times \cos(A_1) - \Delta y \times \sin(A_1)}{\sin(A_2 - A_1)}$$

[ ] : distance

ainsi

$$X_M = X_1 + [1M] \sin(A_1)$$

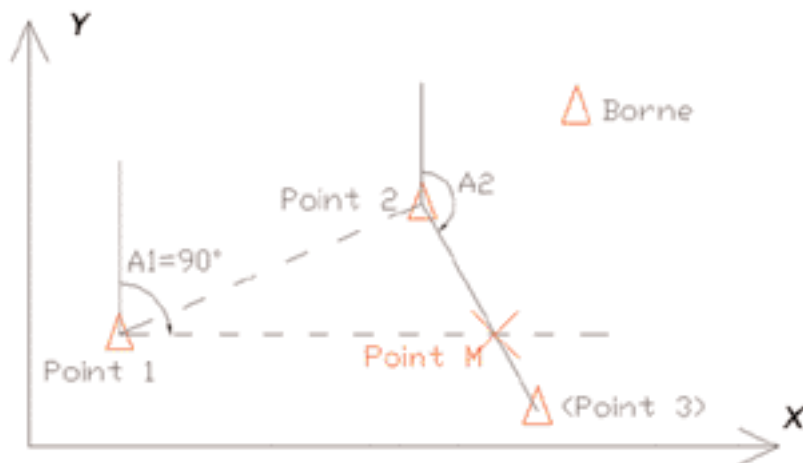
$$Y_M = Y_1 + [1M] \cos(A_1)$$

Ou

$$X_M = X_2 + [2M] \sin(A_2)$$

$$Y_M = Y_2 + [2M] \cos(A_2)$$

**Figure 3 : Relations déduites des formules générales de Delambre**



**Figure 2 : Schéma de la situation nécessitant une intersection dans le plan.**

Nous allons pouvoir simplifier ces formules car le calcul du plus long parallèle correspond au calcul d'une loxodromie. Cela signifie que l'azimut A1 est constant. De plus, nous noterons que dans un espace plan, l'azimut est égal au gisement.

Enfin, comme nous utilisons la projection de Mercator, les images des méridiens et des parallèles sont des droites, ce qui implique que chaque méridien est perpendiculaire à tous les parallèles et inversement. L'azimut A1 est donc égal à 90°.

Les formules citées précédemment (Figure 3) se simplifient de la manière suivante :

$$X_M = X_2 + (Y_1 - Y_2) \times \tan(A_2)$$

$$Y_M = Y_1$$

Il reste simplement à calculer l'azimut A2.

Une fois les coordonnées (X<sub>M</sub>, Y<sub>M</sub>) du point d'intersection obtenues, la distance plane entre ce point d'intersection et le point initial (borne "point 1" sur la figure 2) peut être calculée.

Ce calcul est exécuté et répété pour chacun des points de la frontière est et de la frontière ouest. A l'issue de ce programme, nous disposons donc d'une liste de distances parmi lesquelles nous sélectionnons la plus grande pour localiser le plus long parallèle.

L'avantage de cette méthode est d'être facilement programmable et rapide d'exécution, même sur des fichiers textes volumineux contenant un grand nombre de points, comme c'était le cas ici. ...

## ... Le programme "Dichotomie"

Le but de cet algorithme est le même que celui du programme Intersection, c'est-à-dire de déterminer, pour chaque point de la frontière, le point de l'autre frontière situé à la même latitude. Toutefois, le procédé utilisé est différent. La dichotomie est un principe itératif qui consiste à diviser en deux un espace de recherche.

Le point de départ est une borne d'une des frontières ; à partir de la latitude de cette borne (latitude de référence), on détermine sur l'autre frontière les deux bornes les plus proches de part et d'autre du parallèle à l'aide du programme "Recherche de bornes". L'espace situé entre ces deux bornes est alors divisé en deux parties égales. La latitude de référence sera située dans l'un des deux espaces nouvellement créés. Ce dernier espace sera alors divisé en deux lui aussi. Ce processus se poursuit jusqu'à obtenir les coordonnées du point opposé situé à la même latitude (en fait nous ne recherchons que la longitude), et ce avec le nombre de chiffres significatifs souhaité. En l'occurrence une vingtaine d'itérations permet d'avoir un résultat stable à la centième de seconde près.

Après avoir trouvé les coordonnées du point d'intersection, la distance entre le point initial et le point d'intersection est calculée. Il s'agit d'une distance ellipsoïdale, calculée à l'aide de la formule suivante :

$$D = N \times \cos(\phi) \times (\lambda_1 - \lambda_2)$$

où :

-  $N$  est la grande normale

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}}$$

-  $a$  est le demi grand axe

-  $e$  est l'excentricité

-  $\phi$  est la latitude

-  $\lambda_1$  est la longitude du premier point

-  $\lambda_2$  est la longitude du second point

Le programme exécute les étapes décrites pour chacun des points des deux frontières.

Finalement un listing de distances est obtenu et la plus longue parmi ces distances est retenue pour localiser une nouvelle fois le plus long parallèle.

## Résultats

Les deux méthodes de calcul ont toutes deux abouti au même résultat. Le plus long parallèle de France respectant les conditions imposées en introduction à cet article est donc situé à la latitude **N48°26'58"** dans le système géodésique RGF 93. Sa longueur ellipsoïdale est de 954.5 kilomètres.

Le tracé du parallèle est superposé à une mosaïque d'images satellites issues du site Internet de Google Earth en Figure 4.

Ainsi, la Ligne de Terre relie l'île d'Ouessant en Bretagne à la ville d'Obernai en Alsace, en passant par des villes telles que Brest, Saint-Brieuc, Chartres, Melun ou Alençon, et plus précisément le dernier village à l'extrémité est : Gerstheim. Notons que Strasbourg n'est située qu'à 15 km seulement du parallèle (cf. Figures 5 et 6).

L'estimation de la précision de détermination de la latitude du plus long parallèle devrait tenir compte des facteurs suivants :

- la densité des bornes sur les deux frontières (1 borne tous les 30 m environ) – facteur d'influence déterminant,

- l'imprécision sur les coordonnées des données,
- l'imprécision due aux transformations de coordonnées,
- l'imprécision inhérente aux logiciels (nombre de chiffres pris en compte dans les calculs intermédiaires), etc.

La quantification de ces dernières erreurs reste délicate. En tenant compte essentiellement de la densité des bornes sur les portions de frontières étudiées, nous estimons la précision de détermination de la latitude à  $\pm 1''$ , soit environ 30 m.

## Application

Enfin, une fois le plus long parallèle en France calculé, nous nous sommes attachés à établir une liste de toutes les villes traversées par le parallèle. Le procédé le plus simple consiste à employer un logiciel de Système d'Information Géographique. En effet, une simple requête spatiale permet de sélectionner toutes les entités situées autour d'une autre entité de référence. Dans notre cas, les entités sélectionnées sont les villes et l'entité de référence est le parallèle.



**Figure 4 :** Le plus long parallèle de France (fond d'image : Google Earth <http://earth.google.com/>)



Ainsi, une base de données de type INSEE contenant les 36 000 communes de France (base datant de 1990) a été utilisée. Une requête spatiale a donc permis d'obtenir le listing des communes situées dans une bande de 10 km de part et d'autre du parallèle ; cela représente environ 1 300 communes.

## Conclusion

A ce stade, le relais peut être transmis et le travail des autres écoles d'ingénieurs peut débuter. Ainsi, les élèves de l'ESTP sont chargés de calculer l'intersection entre le parallèle et la méridienne verte, le méridien de Paris. Les étudiants de l'ENSG doivent calculer la distance entre chaque commune de France et le parallèle. Et enfin, les étudiants de l'ESGT ont pour charge le descriptif des villes traversées par le parallèle.

Ce projet aura donc permis une collaboration de toutes les écoles de France formant à la géomatique (d'ailleurs presque situées sur un même parallèle !), du Mans à Strasbourg, en passant par Paris, à la réalisation d'un projet unique.

D'Ouessant à Gerstheim, la route est à présent tracée : suivons la LIGNE DE TERRE N48°26'58" ! ●

## Contacts

Etudiants de l'INSA de Strasbourg,  
spécialité Topographie  
24, bd de la Victoire  
STRASBOURG CEDEX

**Guillaume BIZOUARD**  
guillaume.bizouard@free.fr  
**Kadidia DRAME**  
kadidia@noos.fr  
**Alban VUILLEMEY**  
alban.vuillemey@gmail.com

## Bibliographie

Ouvrage et revue  
**SJOBERG L.E. [2002],** *Intersections on the sphere and ellipsoid* ; Journal of Geodesy, n°76, Springer Verlag, p. 115-120  
**SNYDER J.P. [1987],** *Map projections - a working manual*, United States Government Printing Office

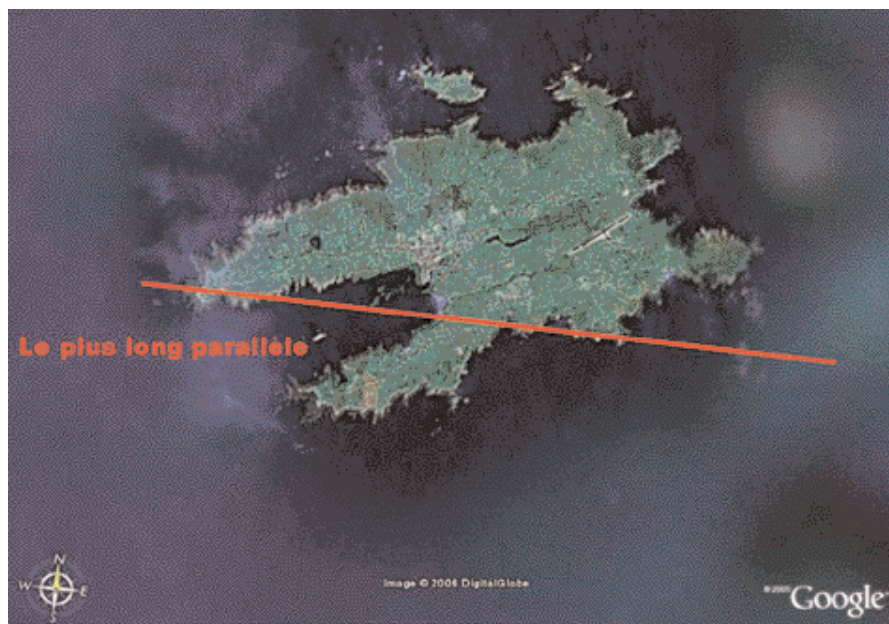


Figure 5 : Extrémité ouest du plus long parallèle de France.

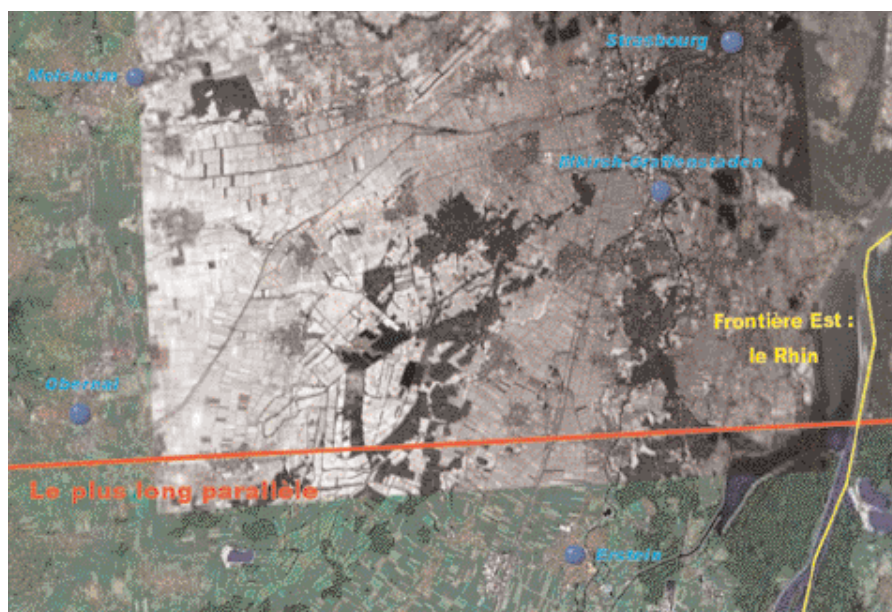


Figure 6 : Extrémité est du plus long parallèle de France.

## ABSTRACT

The OGE, *Ordre des Géomètres-Experts* is launching an ambitious project around the longest parallel in France ("the Earth Line"). In order to promote the profession for students, professionals and elected representatives, several events should gather the surveying professionals around this topic. The four engineering schools teaching topography in France, i.e. ENSG, ESGT, ESTP and INSA de Strasbourg are involved in the first part of this project. Indeed, the INSA students are responsible for the parallel latitude calculation. For that purpose, two computing methods based on intersection and dichotomy are used. Both results provide the location of the longest parallel: its latitude is 48°26'58" in RGF93 datum and its length is 954.5 km (ellipsoidal distance). In the next step, a census of all towns crossed in a strip of 10 km on both sides of the parallel is presented.

## Application de l'approche par les équations de la régression multiple pour le passage d'un datum à l'autre (cas de l'Algérie)

■ A. ZEGGAI - S. KAHLOUCHE - R. AIT AHMED LAMARA - N. KHELOUFI

**Les modèles globaux (Bursa Wolf, Molodensky Badekas, Veis...) sont généralement les plus utilisés dans la détermination des paramètres de transformation entre deux systèmes de coordonnées identiques. Dans le cas du système Nord Sahara (Algérie), le calcul des paramètres est altéré par le manque d'information sur l'ondulation du géoïde au-dessus de l'ellipsoïde astro-géodésique de Clarke 1880 A. Une solution utilisant les équations de la régression multiple est proposée.**

**Résoudre ce problème est particulièrement important pour les travaux de géodésie où les données sont insuffisantes (GPS, points d'appui du système national, nivellement classique, géoïde local...).**

### ■ mots-clés

Bursa Wolf - Molodensky - Transformations - Equations de la régression multiple.

**L**e système géodésique Nord Sahara 1959, est l'infrastructure sur laquelle s'appuient tous les travaux géodésiques et cartographiques de l'Algérie. Les valeurs du réseau Nord Sahara sont impérativement liées aux mesures de triangulation.

Les inconvénients majeurs de l'établissement des réseaux géodésiques, par méthodes classiques, résident sur la lenteur des observations, la qualité et la limite des mesures (sphéricité de la terre, visibilité, limite d'emploi des instruments...). La précision obtenue ne peut être supérieure à 15 à 20 cm en planimétrie, à quelques millimètres (Nivellement de précision) et à 50 cm (nivellement géodésique) en altimétrie.

Les opérations de triangulation et de densification par les méthodes classiques, rendent les tâches d'exécution difficiles (lentes et coûteuses). La mise en œuvre des travaux de géodésie, cadastre... par les techniques spatiales (système GPS) permet de renforcer et d'alléger considérablement ces opérations.

Le choix du GPS s'est rapidement imposé parmi les techniques spatiales qui concourent efficacement à l'établissement des réseaux géodésiques. C'est une technique portable, de mise en œuvre aisée, qui fournit des résultats rapides et de qualité. De plus, son caractère descendant la rend accessible à tout utilisateur qui dispose de l'équipement nécessaire pour capter les signaux émis par les satellites GPS. L'équipement en récepteur GPS étant abordable, donc accessible à toute entreprise, c'est ainsi que de nombreuses applications géodésiques lui ont été associées.

Malgré la facilité d'utilisation du système GPS (rapidité, précision), il faut pour obtenir les meilleurs résultats, optimiser les moyens mis en œuvre et adopter une méthodologie respectant les spécifications telles que :

- Modélisation des erreurs liées aux mesures GPS...
- Définition d'une stratégie d'observation (redondance, réoccupation, nature des récepteurs...).
- Introduction de modèles de traitements adéquats.
- etc.

L'exploitation des données fournies par le GPS dans le référentiel WGS (World Geodetic System - 1984) pour des travaux géodésiques exprimés dans le référentiel local (Nord Sahara) nécessite la mise en place de procédures particulières, tenant compte de l'insuffisance de la donnée "géoïde", comme la résolution des équations de la régression multiple.

### Le Système ou Datum "NORD SAHARA"

Le traitement et la compensation, du réseau de premier ordre et du premier ordre complémentaire entrepris par l'Institut Géographique National de Paris (IGN-France) et de l'Army Map Service des Etats-Unis (AMS - Etats-Unis), fournissent un réseau homogène et compensé dans le système EUROPE 1950 (ED50) sur l'ellipsoïde international.

La détermination du réseau géodésique Algérien était basée sur les observations et les données :

- du nouveau parallèle Algérien (réfection de 1953-1954 et calculs de 1955),
- du parallèle sud,
- de la méridienne de GABES (TUNISIE),
- de la méridienne de GUERCIF (MAROC).

Le système cartographique en AFRIQUE est basé sur l'ellipsoïde de Clarke 1880 Anglais. Ce système a été recommandé à la conférence de Bukavu (République du Congo) en 1953 . Les cartes sahariennes sont établies sur un canevas astrono-



mique qui, arrivant au contact du réseau géodésique compensé dans le système Europe 50, présentent un décalage allant jusqu'à quelques dizaines de mètres. Pour concilier les canevas provenant du système cartographique et du canevas astronomique, un système de méridiens et parallèles a été établi sur l'ellipsoïde de Clarke 1880 Anglais, où les discordances entre les coordonnées géographiques des deux sources sont minima. Le système "géodésique" résultant qui répond à ces conditions est le système Nord Sahara. Il est déduit du système ED50 par la transformation suivante :

$$\lambda_{NS} = \lambda_{ED50} - 4.00 \text{ déci milligrades}$$

$$E_{NS} = E_{ED50} - 48.400 \text{ déci milligrades}$$

Où  $\lambda_{NS}$  : longitude exprimée dans le système Nord Sahara,

$\lambda_{ED50}$  : longitude exprimée dans le système ED50

$E_{NS}$  : latitude isométrique exprimée dans le système Nord Sahara

$E_{ED50}$  : latitude isométrique exprimée dans le système ED50

## Le World Geodetic System 1984 (WGS 84)

Il est défini par un jeu de stations réparties à la surface terrestre et obtenu à partir du système NSWC9Z-2 utilisé pour les éphémérides précises des satellites NNSS (Transit) et de l'introduction des résultats d'autres techniques spatiales (LLR-SLR-VLBI...).

Les paramètres de transformation permettent la conversion de tout point Doppler obtenu par les éphémérides précises dans le système WGS84 par la relation [1] :

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{WGS84} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 4.5 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -0.610 \cdot 10^{-6} & -0.814 R_0 & 0 \\ 0.814 R_0 & -0.610 \cdot 10^{-6} & 0 \\ 0 & 0 & -0.610 \cdot 10^{-6} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{NSWC9Z-2} \quad (1)$$

Les WGS (World Geodetic System) sont développés par le DoD (Department of Defense : USA). Depuis WGS 60 passant par le GRS80, l'approximation de la figure de la terre et de son champ de gravité a évolué pour aboutir à la définition actuelle du WGS 84 qui est le système de référence pour les éphémérides GPS radiodiffusées et précises.

Le trièdre de référence comprend un pôle conventionnel et un plan méridien origine.

## Les modèles globaux de transformation

La transformation des données GPS dans le système géodésique local, qui est la base du système cartographique en vigueur et dans lequel les résultats des travaux géodésiques doivent être exprimés, nécessite la connaissance des paramètres de passage avec l'emploi d'un modèle adéquat. Le choix du modèle de transformation, requiert la disponibilité d'un jeu de données connu dans chacun des deux systèmes. La transformation est généralement présentée soit sous la forme d'une similitude spatiale (BURSA WOLF...) soit issue d'un formalisme géographique dit modèle de MOLODENSKY.

### ■ Le modèle Cartésien de BURSA WOLF

C'est un modèle à sept (07) paramètres dont l'équation générale est donnée par :

$$\vec{X} = \vec{T} + (1 + \Delta k) \cdot R \cdot \vec{x} \quad (2)$$

Où  $\vec{X}$  est le vecteur des coordonnées GPS,  $\vec{x}$  est le vecteur des coordonnées Nord Sahara,  $\vec{T}$  est le vecteur des trois (3) translations,  $R$  est la matrice exprimée en fonction des trois petites rotations entre les deux systèmes et  $\Delta k$  la variation relative du facteur d'échelle.

Pour un point, nous avons :

$$\begin{pmatrix} X-x \\ Y-y \\ Z-z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x & 0 & z-y \\ 0 & 1 & 0 & y-z & 0 & x \\ 0 & 0 & 1 & z & y-x & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \\ \Delta k \\ E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} \quad (3)$$

Pour un réseau de (N) points, l'équation générale est donnée sous la forme :

$$A \cdot X + B = V \quad (4)$$

Où  $A$  est la matrice de configuration de  $3N \times 7$  coefficients,  $X$  est le vecteur des 7 inconnues,  $B$  est le vecteur des  $3N$  observations,  $V$  est le vecteur des  $3N$  écarts ou résidus et  $N$  le nombre de points.

Le système peut être résolu par l'ajustement par moindres carrés ( $V^T \cdot V = \text{minimum}$ )

$$\frac{\partial V^T \cdot V}{\partial X^T} = A^T \cdot A \cdot X - A^T \cdot B = 0 \quad (5)$$

La solution donne :

$$X = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot B \quad (6)$$

$$\vec{X} = (T_x, T_y, T_z, \Delta k, E_x, E_y, E_z)^T \quad (7)$$

### ■ Le modèle géographique de MOLODENSKY

A chaque système de référence géodésique est associé un ellipsoïde de révolution. Les coordonnées géodésiques (longitude et latitude) sont des valeurs plus représentatives dans la pratique que les coordonnées cartésiennes ( $X, Y, Z$ ). La transformation mise en œuvre est alors à 7 ou 9 paramètres (9 : dans le cas où on considère la variation du demi grand axe et de l'aplatissement comme inconnues).

Il existe des formules qui permettent de s'affranchir des coordonnées géocentriques liées à deux ellipsoïdes et qui permettent d'aboutir à une transformation directe. Cette transformation est issue des équations différentielles de MOLODENSKY. En pratique, pour les systèmes de coordonnées  $X$  et  $x$ , on obtient un modèle [08] :

$$\vec{X} = F(\vec{x}, \vec{a}) \quad (8) \quad \vec{X} = f(X, Y, Z) \quad (9)$$

$$\vec{x} = f(\lambda, \varphi, he) \quad (10) \quad \vec{a} = f(a, f) \quad (11)$$

Les coordonnées cartésiennes sont représentées par ( $X, Y, Z$ ), les coordonnées géodésiques par ( $\lambda, \varphi, he$ ). Les éléments  $a$  et  $f$  désignent respectivement le demi grand et l'inverse de l'aplatissement.

...



- L'équation différentielle s'écrit :

$$d\vec{X} = \frac{\partial \vec{F}}{\partial x} \cdot d\vec{x} + \frac{\partial \vec{F}}{\partial \alpha} \cdot d\vec{\alpha} \quad (12)$$

$$d\vec{X} = J \cdot d\vec{x} + K \cdot d\vec{\alpha} \quad (13)$$

Où J, K sont les Jacobiens de la transformation.

Les formules [14,15,16] données pour un seul point sont les formules dites de MOLODENSKY - DMA

$$\lambda_2 - \lambda_1 = - \frac{\sin \lambda}{(N+h) \cos \varphi} \cdot Tx + \frac{\cos \lambda}{(N+h) \cos \varphi} \cdot Ty - (f-2f) \cos(\cos \lambda \cdot Ex + \sin \lambda \cdot Ey) + Ez \quad (14)$$

$$\varphi_2 - \varphi_1 = - \frac{\sin \varphi \cos \lambda}{(p+h) \cos \varphi} \cdot Tx - \frac{\sin \varphi \sin \lambda}{(p+h) \cos \varphi} \cdot Ty + \frac{\cos \varphi}{(p+h)} \cdot Tz + \sin \lambda \cdot Ex - \cos \lambda \cdot Ey \quad (15)$$

$$h_2 - h_1 = \cos \varphi \cos \lambda \cdot Tx + \cos \varphi \sin \lambda \cdot Ty + \sin \varphi \cdot Tz + a \cdot \Delta k - da + (adl' - fda) \sin^2 \varphi \quad (16)$$

Pour le cas de N points, la solution est donnée par la méthode des moindres carrés.

## Transformation WGS84 - Nord Sahara par l'approche de la régression multiple

La méthode dite transformation par les équations de la régression multiple a été utilisée par la NIMA (ex. DMA : 1987) pour le passage d'un système géodésique local vers le système WGS 84.

La méthode permet de compléter les formules de transformations issues des équations différentielles de MOLODENSKY. La méthode est capable de déterminer ou d'évaluer les distorsions non linéaires dans un réseau appartenant à un système ou un autre.

$$\begin{aligned} \lambda_2 &= \lambda_1 + \Delta \lambda \\ \varphi_2 &= \varphi_1 + \Delta \varphi \\ h_2 &= h_1 + \Delta h \end{aligned} \quad (17)$$

Avec  $\lambda_1, \varphi_1, h_1$  : coordonnées géodésiques WGS84.

$\lambda_2, \varphi_2, h_2$  : coordonnées géodésiques Nord Sahara.

La forme générale de la différence entre deux Datum en utilisant les équations de la régression multiple pour la latitude est donnée comme suit (DMA, 1987) :

$$\begin{aligned} \Delta \varphi &= A_0 + A_1 \cdot U + A_2 \cdot V + A_3 \cdot U^2 + A_4 \cdot U \cdot V + A_5 \cdot V^2 \\ &+ \dots + A_{34} \cdot V^9 + A_{35} \cdot U^9 \cdot V + A_{36} \cdot U^8 \cdot V^2 + \dots \\ &+ A_{64} \cdot U^9 \cdot V^2 + A_{65} \cdot U^8 \cdot V^3 + A_{36} \cdot U^8 \cdot V^2 \\ &+ \dots + A_{72} \cdot U^9 \cdot V^3 + A_{73} \cdot U^8 \cdot V^4 + \dots + A_{99} \cdot U^9 \cdot V^9 \end{aligned} \quad (18)$$

Où  $A_0, A_1, \dots, A_{99}$  : 100 coefficients possibles déterminés dans les équations de la régression multiple.

$U = k \cdot (\varphi - \varphi_0)$  : Latitude géodésique normalisée pour le calcul du point.

$V = k \cdot (\lambda - \lambda_0)$  : Longitude géodésique normalisée pour le calcul du point.

K : Facteur d'échelle.

$\lambda, \varphi$  : Coordonnées WGS84.

$\lambda_0, \varphi_0$  : Coordonnées origine WGS84.

$\Delta \varphi$  : Différence de latitude entre les deux systèmes.

Pour la longitude et la hauteur ellipsoïdique, la différence dans la relation [18] est remplacée par  $\Delta \lambda$  ou par  $\Delta h$  pour donner respectivement les formules relatives à la longitude et à la hauteur.

Le degré des équations de la régression multiple dépend essentiellement du nombre de points. Pour le degré 18, il faut au moins 100 coefficients avec un minimum de 100 points.

## Application : Comparaison entre modèles globaux et la méthode des équations de la régression multiple (résultats préliminaires)

Plusieurs campagnes d'observations ont été menées avec les récepteurs bifrquences Ashtech Z XII, soit un ensemble de 16 points répartis au nord de l'Algérie (8 points d'appui et 8 points de contrôle) ont été observés.

Une partie du réseau a été observée dans le cadre du projet ALGEONET (Algerian Geodynamical Network), mené conjointement par le CNTS (Centre National des Techniques Spatiales) et l'INCT (Institut National de Cartographie et de Télédétection), qui avait pour objectif la mise en place d'un réseau GPS précis, couvrant essentiellement la partie nord de l'Algérie, pour les application géodynamiques. Il a été monté en 1998, ré-observé en 2002, après l'extension dès 1995 du projet TYRGEONET (Tyrrhenian Geodetic Network -ING Italie) en Algérie.

### ■ Observations GPS

L'apport du GPS en Algérie est considérable car son utilisation a permis d'entreprendre plusieurs travaux à but géodésique et cartographique qui, avant étaient fastidieux et difficiles vu l'étendue du pays.

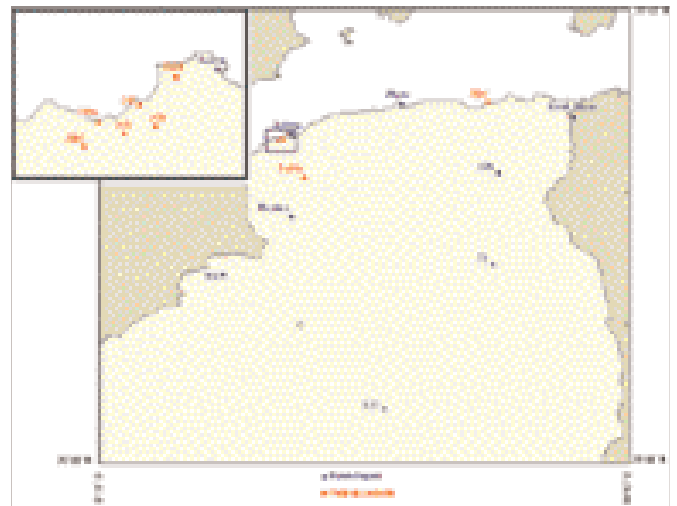


Figure 1 : Le réseau de points utilisé pour la transformation.

La stratégie d'observation adoptée pour mener à bien les campagnes GPS, repose essentiellement sur la détermination de la durée optimale de mesure et la combinaison linéaire de traitement appropriée pour chaque type de longueurs de bases. Cette stratégie permet d'obtenir la meilleure précision (ppm) possible.

La figure 2 montre que le test fait sur une longueur d'environ 540 km (Arzew Jijel) a permis de mettre en valeur la durée d'observation (210 minutes) jusqu'à stabilité du ppm. Le ppm optimal est obtenu avec la combinaison L1C. Une autre base

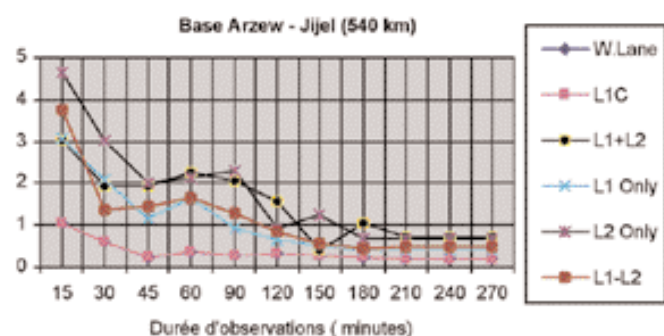


Figure 2 : Détermination de la durée d'observation et de la combinaison linéaire de traitement.

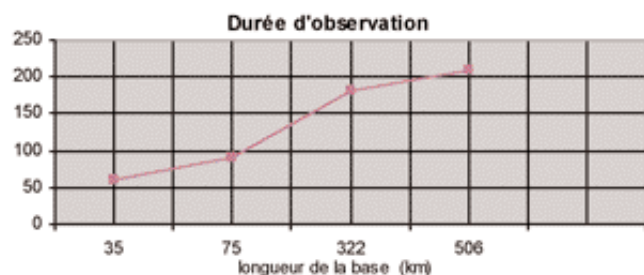


Figure 3 : Détermination de la durée d'observation en fonction de la longueur de la base.

d'environ 503 km reliant Arzew à Béchar a fait l'objet des mêmes investigations et a fourni des résultats équivalents.

Après traitement des observations GPS et analyse faite sur quatre lignes de bases différentes (35 km à 506 km), le graphe de la figure 3 montre que la durée d'observation varie en fonction de la longueur.

## ■ Transformations

Les modèles globaux (Bursa - Wolf, Molodensky Badekas...) sont les plus utilisés pour calculer les paramètres de la transformation entre systèmes identiques. La hauteur de l'ellipsoïde relative à Clarke 1880 (ellipsoïde associé au système Nord Sahara) est remplacée par l'altitude (manque d'information de la hauteur du géoïde). Pour pallier ce problème, l'utilisation des équations de la régression multiple est proposée.

Les écarts sur les composantes géographiques ( $d\lambda$ ,  $d\varphi$ ) correspondent, sur la surface de la terre, à des écarts suivant l'est et le nord ( $dE$  et  $dN$ ). Ces écarts sont exprimés par :

$$dE = N \cos \varphi \cdot d\lambda \quad (19)$$

$$dN = \rho d\varphi \quad (20)$$

Avec  $N$ ,  $\rho$  : respectivement normale et rayon de courbure.

Les écarts  $dE$  et  $dN$  peuvent être exprimés par les formules approchées suivantes :

$$dE = R \cos \varphi \cdot d\lambda \quad (21)$$

$$dN = R d\varphi \quad (22)$$

Avec  $R=6\,371$  km (rayon moyen de la terre appliqué pour la zone).

Tous les écarts sont exprimés en mètre (les écarts en  $d\lambda$ ,  $d\varphi$  sont convertis selon les formules 21 et 22).

Modèle	Composante	Minimum (mètre)	Maximum (mètre)	Moyenne (mètre)	RMS (mètre)	RMS Position (mètre)
Bursa Wolf	X	-1.426	2.686	1.293	1.838	2.260
	Y	-0.301	1.164	0.697	0.834	
	Z	-1.491	1.307	0.461	1.018	
Modèle Géographique de Molodensky	$\lambda$	-1.417	0.407	-0.841	1.014	2.351
	$\varphi$	0.238	0.541	0.404	0.413	
	H	-2.933	2.019	-1.308	2.058	
Equations de la régression multiple	$\lambda$	-0.063	0.319	0.110	0.164	0.401
	$\varphi$	-0.407	0.634	-0.164	0.366	

Tableau 1 : Analyse statistique pour le modèle des équations de la régression multiple et les modèles globaux.

- Dans cet exemple, l'approche par les équations de la régression multiple donne une moyenne de 0.197 m et un RMS de 0.401m en planimétrie. Contrairement aux modèles globaux dont la précision est affectée par l'ondulation du géoïde.

## Conclusion

Pour l'estimation des paramètres de transformation, le passage du système WGS84 au système Nord Sahara nécessite une bonne connaissance d'un réseau commun.

La précision obtenue sur les coordonnées transformées est liée à plusieurs facteurs :

- Précision des coordonnées des points dans le système géodésique national (Nord Sahara).
- Le nombre et la répartition géographique des points d'appui, ainsi que la sélection des points de contrôle.
- Précision des coordonnées GPS.
- Modèles mathématiques utilisés pour la transformation.
- La densité et la répartition géographique des points.

Les résultats obtenus par la méthode de régression multiple, notamment dans un cas particulier où l'insuffisance de données physiques comme la non-disponibilité d'un géoïde précis (cm) couvrant tout le territoire, permet de proposer son utilisation pour toutes les transformations de coordonnées WGS - Local. Les écarts-types obtenus ainsi que l'exactitude fournie à partir des différences fournies sur un réseau GPS de grande précision comme ALGEONET, permettent au niveau global de garantir une certaine qualité des travaux géodésiques à mener avec le GPS.

Il reste important de relever que les méthodes les plus rigoureuses et les plus précises ne permettront certainement pas d'arriver à des résultats optimaux tant que la couverture gravimétrique et géodésique, de précision et de densité adéquate et répondant aux normes admises en la matière, ne sont pas disponibles. Les nouvelles missions spatiales (GOCE, GRACE...) relatives à la détermination précise du champ de pesanteur terrestre en général, et l'exploitation des données collectées permettra certainement une meilleure connaissance du géoïde local et une meilleure détermination des paramètres de passage entre les systèmes spatiaux comme le WGS ou le futur référentiel Galiléo (GTRS) et le système local en vigueur en Algérie. ●

## Contacts

A. ZEGGAI - S. KAHLLOUCHE

R. AIT AHMED LAMARA - N. KHELOUFI

Division de géodésie

Centre National des Techniques Spatiales.

BP 13 Arzew - 31200 - Algérie.

## Références

1. D. Bouteloup [2002] - *Systèmes géodésiques* - Cours de Géodésie Chapitre 8. IGN. Version 2.0. 20-11-2002
2. A. Rey [1960] - *Les principales étapes de la géodésie en Afrique du Nord et leur incidence cartographique* - IGN.
3. World Geodetic System [1984] - *its definition and relationships with local geodetic systems*. NIMA [2000] - Technical Report TR8350.2 - Department of Defense- NIMA.
4. N. Kheloufi [2004]. *Qualité des données et modélisation pour l'estimation des paramètres de passage entre les systèmes WGS84 et le Nord Sahara*. Mémoire de magister. CNTS ARZEW. Novembre 2004.
5. A. Zeggai, S.A. Benahmed Daho, S. Kahlouche, A.N. Nabed, S.Touam, A. Ayoub [2001] - *Rattachement géodésique par GPS longue base du réseau cadastral de Béchar*. Actes du séminaire sur les nouvelles techniques cartographiques à grandes échelles - ALGER 27-28 juin 2001.
6. A. Zeggai, S.A. Benahmed Daho, S. Kahlouche, A.N. Nabed, S.Touam [2001] - *Geodetic lines transformations, GPS Levelling and Nord-Sahara Datum. Comparison with Global Models* - Assemblée scientifique de l'Association Internationale de Géodésie - Symposium A: Fine Tuning Reference Frame Implementation - Budapest du 2 au 8 septembre 2001.

## Sites Web

1. J. Clifford, J. Munier [2001] - Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. Grids and Datum. Democratic and popular Republic of Algeria, October 2001. <http://www.ASPRS.org/resources.html>.
2. EPSG [2002] - Coordinate Conversion and Transformation Including formulas. European Petroleum Survey Group. Guidance note number 7. <http://www.epsg.org/>

## ABSTRACT

**Keywords:** Bursa Wolf, Molodensky, Transformations, Multiple Regression Equation(s).

*The global models (Bursa Wolf, Molodensky Badekas, Veis...) are the most used to solve the transformation parameters between identical systems. In the case of Nord Sahara datum (Algeria), the parameter computation is altered by the insufficient information of the geoid's undulation above astro-geodetic ellipsoid (Clarke 1880 A). One solution using the Multiple Regression Equation(s) is proposed. To solve this problem is particularly important for geodetic works where the geodetic data are not sufficiently available (GPS and National benchmarks, spirit levelling, local geoids...).*



# La carte marine électronique du futur est déjà en préparation

■ Mikaël LE GLÉAU

*La carte électronique de navigation ENC repose sur une norme élaborée par l'Organisation Hydrographique Internationale (OHI) il y a déjà plus d'une dizaine d'années. Cette norme appelée S-57 a été conçue pour satisfaire les échanges et la distribution des données hydrographiques numériques de manière cohérente entre les services hydrographiques, les industriels, les utilisateurs.*

**L**a norme S-57 répond parfaitement aux besoins actuels de la navigation et est considérée comme un standard dans le domaine maritime. Elle est utilisée aujourd'hui par tous les services hydrographiques producteurs de cartes ENC et les fabricants des systèmes de navigation visualisant ces cartes, en particulier les ECDIS destinés aux professionnels de la marine marchande. Ces systèmes permettent aujourd'hui de renforcer la sécurité de la navigation et d'alléger le travail en passerelle grâce à des fonctionnalités telles que la mise à jour automatique et sûre des informations cartographiques officielles, ainsi que l'affichage et les alarmes paramétrables en fonction des caractéristiques du navire : profondeur de sécurité, anti-échouage, planification, suivi et écart à la route, journal de bord automatique, superposition de l'image radar, authentification des données cartographiques, etc.

De nouveaux besoins commencent cependant à apparaître, liés à de nouveaux types d'utilisation des informations hydrographiques dépassant le cadre strict de la sécurité de la navigation, et rendus (ou qui deviendront possibles) grâce en partie aux nouvelles technologies de l'information et de la communication. C'est pourquoi une nouvelle édition de la norme S-57 est déjà en préparation pour pouvoir offrir des fonctionnalités plus évoluées aux navigateurs et aux utilisateurs de systèmes d'information géographique :

- **interactivité de la carte électronique ENC et des ouvrages nautiques numériques** (par exemple avec la possibilité de liens entre les objets ou une zone géographique de la carte et le chapitre concerné et les photographies des Instructions Nautiques),
- **intégration d'informations provenant du système d'identification automatique AIS,**



© ALSTOM

- **exploitation d'informations bathymétriques de haute résolution** (modèles numériques de terrain) pour certaines zones ou ports d'accès difficile ou pour les besoins de la pêche,
- **visualisation de la bathymétrie** tenant compte de la marée en temps réel,
- **superposition de couches d'informations additionnelles** : limites maritimes (zones d'exercice militaire, zones de pêche, limites des 12 milles ...), informations sédimentologiques, modèles de courants, situation des glaces...
- **services en ligne (web)** : consultation, diffusion et mise à jour des cartes et ouvrages de navigation,
- **extension pour les besoins de la navigation fluviale**, actuellement couverts par des systèmes non compatibles.

Les travaux de définition sont déjà bien avancés et le socle de cette nouvelle norme devrait être finalisé d'ici 2007. Les spécifications des nouveaux produits numériques pourront ensuite être établies.

Pour les ENC, les services hydrographiques ont prévu de continuer à produire et distribuer ces cartes selon la norme S57 actuelle, au moins jusqu'en 2012, afin de compléter la couverture mondiale et stabiliser les évolutions des systèmes de navigation comme les ECDIS. La norme S57 restera donc encore la référence pour les ENC pendant de nombreuses années. ●

Avec l'aimable autorisation de La Lettre du SHOM

# Les hydrographes, ces marins qui "mesurent la mer"

## Activité des missions hydrographiques

■ Corinne BOUZELOC

Outre la poursuite des levés systématiques des côtes françaises les plus fréquentées (côtes de Bretagne nord, Pas-de-Calais et abords de Bayonne), l'année 2005 a été marquée par :

- **le déploiement en Afrique de l'ouest de la mission océanographique de l'Atlantique (MOA)** à bord du bâtiment hydro-océanographique Beautemps-Beaupré. Les levés sont réalisés dans les zones où la France exerce encore une responsabilité cartographique historique et apporte son soutien dans le cadre de la convention internationale pour la sauvegarde de la vie humaine en mer (SOLAS) ;
- **la réalisation d'une campagne de levé géophysique par la MOA en Méditerranée orientale** ;
- **la poursuite des levés effectués par la mission hydrographique de l'Atlantique (MHA)** en Mer Rouge et dans le détroit de Bab El Mandeb. Ces levés sont destinés à la mise à jour de la documentation nautique dont la France est responsable dans cette région et à satisfaire les besoins des déploiements aéronavals ;
- **la réalisation des premiers levés hydrographiques au moyen d'un laser aéroporté dans le golfe du Morbihan.** Cette nouvelle technologie devrait être mise en œuvre pour constituer le référentiel géographique du littoral (RGL) en collaboration avec l'Institut Géographique National (IGN) ;

- **les premiers essais du nouveau navire océanographique Pourquoi pas?** dont l'activité sera partagée avec l'Ifremer. Ses premières missions au profit du SHOM devraient débuter dès le premier trimestre 2006.

Au cours de ces travaux, plusieurs hauts-fonds ont été découverts parmi lesquels on peut citer :

- 3 nouvelles épaves aux abords de Maskali dans le golfe de Tadjoura (avis 05 16 22) et plusieurs nouvelles sondes dont deux obstructions dans le port d'Obock et aux abords de Djibouti (avis 05 15 19, 05 15 20 et 05 18 26) ;
- plusieurs nouvelles sondes au nord de l'île de Bréhat (côte nord Bretagne) dont la mise à jour du brassiage d'une épave (avis 05 04 19 et 05 18 12) ;
- une nouvelle obstruction 61 m dans le golfe de Guinée (Gabon) (avis 05 17 41) ;
- 8 obstructions et 2 nouvelles épaves dans le port de Dakar (Sénégal) (avis 05 28 71) ;
- une nouvelle obstruction 15.8 m dans la grande rade de la Loire (avis 05 26 10). ●

Avec l'aimable autorisation de La Lettre du SHOM



© SHOM

# 1806 : Premier volume de Base du Système métrique décimal\*

■ Suzanne DÉBARBAT

***Il y a deux siècles paraissait le premier volume d'un ouvrage intitulé Base du Système métrique décimal, ou Mesure de l'arc de Méridien compris entre les parallèles de Dunkerque et Barcelone, exécutée en 1792 et années suivantes, par MM. Méchain et Delambre. Il est rédigé par J.-B. Delambre (1749-1822), alors secrétaire perpétuel de l'Institut pour les sciences mathématiques, Membre du Bureau des longitudes, etc. En effet, Méchain (1744-1804) est décédé depuis deux ans ; l'AFT, avec le soutien de l'Observatoire de Paris, l'Institut Géographique National et le Bureau des longitudes, a marqué en septembre 2004 le deuxième centenaire de ce décès survenu en septembre 1804 <sup>(1)</sup>. De ce fait, l'ouvrage est plutôt connu sous les noms de Delambre et Méchain, le premier en ayant été, par force, l'unique rédacteur. Mais, ainsi qu'il l'a lui-même indiqué à plusieurs reprises, une large part en est due à Méchain.***

**L'**ouvrage est la concrétisation de décisions prises par les gouvernements issus de la Révolution française. Ses promoteurs avaient cherché à élaborer un nouveau système des poids et mesures de caractère décimal. La multiplicité des références dans ce domaine entraînait depuis longtemps des situations dont certaines devenaient inextricables, en particulier dans les relations commerciales. Il existait, par exemple, de nombreuses références pour les longueurs qui, sous un même nom, n'étaient pas de même dimension. Certains en tiraient bénéfice, d'autres de lourdes pertes.

Après diverses tentatives, une proposition avait été présentée, en 1790, par Talleyrand à la Constituante. En 1791, le rapport d'une commission de l'Académie des sciences fixe scientifiquement les fondements du nouveau système ; elle détermine méthodes et instruments à employer. La nouvelle unité de base sera le mètre, dix-millionième partie du quart du méridien terrestre. L'instrumentation, récemment expérimentée avec succès, sera le cercle répétiteur que Lenoir (1744-1832) a mis au point sur les indications de

Borda (1733 - 1799). La campagne de mesure d'un arc de méridien, afin d'en déduire une longueur pour le mètre, est menée de Dunkerque à Barcelone, d'un niveau de la mer à un autre. Trois tomes seront nécessaires pour en rendre compte, au total près de 2 500 pages.

Le premier volume de *Base du Système métrique décimal...*, paru en janvier 1806 <sup>(2)</sup>, débute par un *Discours préliminaire* de 180 pages. Il fait une large place à l'ensemble des idées et des événements qui ont conduit Delambre et Méchain sur les routes de France, dans la période troublée d'après la Révolution de 1789. L'ouvrage comprend ensuite la partie intitulée *Mesures de la Méridienne-Observations géodésiques*, rendant compte, station par station, des tâches menées sur le terrain. Cette synthèse est issue des manuscrits de Méchain et de Delambre que ce dernier déposera en deux fois (1807 et 1810) à l'Observatoire de Paris.

La lecture de cette publication permet d'apprécier le soin et la minutie avec lesquels l'opération d'astronomie géodésique a été menée. Dans la *Notice historique sur M. Méchain*, qu'il lira à la séance publique du 5 messidor an XIII (24 juin 1805), de l'Académie des sciences dont il est depuis 1803 le secrétaire perpétuel, Delambre exprime, son sentiment à ce sujet : *Ces observations, les plus exactes qu'on puisse faire en ce genre, ces calculs où il mettoit une sûreté et une précision que rien n'a surpassé, jamais il ne vouloit les croire assez parfaites, et sans cesse il vouloit y retoucher. Ce scrupule a longtemps interrompu l'impression de notre Méridienne ; d'autres circonstances qui lui sont étrangères, et qui viennent de cesser, ont empêché de la reprendre jusqu'à ce jour. En partant pour sa dernière expédition, il m'avoit remis tous ses registres dans le plus bel ordre possible. Et Delambre ajoute : Tous les manuscrits relatifs à ses derniers travaux m'ont été également livrés, et ce qu'ils* ...

\* Cet article se fonde, pour sa plus grande part, sur celui publié dans le volume des Célébrations nationales de l'année 2006, aux pages 201 à 203.

(1) "Cahier Méchain" du numéro 101 de la Revue XYZ.

(2) *Base du Système métrique décimal*, par Delambre et Méchain (à consulter dans les bibliothèques), vol. 1, Baudouin Editeur, Paris, 1806.



- ● ● contiennent quoique non terminé, est du moins dans l'état le plus clair et le plus satisfaisant.

Ainsi fait-il connaître, à la fois, la qualité du travail effectué et l'état des documents qu'il a en main et dont il assure la publication. Les volumes suivants seront publiés, sous le même intitulé, en juillet 1807 et en novembre 1810, toujours chez Baudoin, l'imprimeur de l'Institut national.

Le nouveau système, fondé sur une mesure, "le Mètre", qu'on pourrait qualifier de révolutionnaire à deux titres, fera l'objet d'une nomenclature aboutissant, finalement, à des multiples et des sous-multiples obtenus par ajout d'un préfixe ; il en sera de même pour l'unité retenue pour le poids, associée à la masse d'un cube d'eau dont les côtés sont d'un dixième de mètre. Mais une exception interviendra dans ce cas : l'unité de base ne sera pas le gramme, mais un de ses multiples, le kilogramme. Avec les préfixes de 10 en 10, tous les besoins de la vie courante de l'époque étaient couverts, du millimètre au myriamètre, le seul "disparu" de l'ensemble. De nos jours, les préfixes s'étendent, de  $10^{-24}$  à  $10^{+24}$ , avec des intervalles de trois en trois, de part et d'autre de la zone datant de la création du système des poids et mesures. Les choix, du XIII<sup>e</sup> siècle et ceux fixés depuis au niveau international, s'appliquent à tous les domaines de l'activité humaine, y compris dans ceux de la science et de la technique.

Après le retour définitif à Paris des deux astronomes, en 1798, une commission internationale, européenne en fait à l'époque, examine les documents, les étudie, entreprend des vérifications et fixe en 1799, parmi d'autres valeurs possibles, la longueur du mètre à 3 pieds 11.296 lignes de la "toise de l'Académie". Cette appellation s'applique à la toise choisie comme référence pour les mesures des bases de la triangulation ; elle porte aussi le nom de "toise du Pérou" en raison du fait qu'elle y a été transportée, en 1735, en vue de l'opération ayant pour objet la détermination de la "figure de la Terre".

Les étalons du mètre et du kilogramme sont réalisés tandis que sont mis en place les éléments du nouveau système des poids et mesures dont le caractère décimal constitue la qualité principale.

Quand Delambre a entrepris de rédiger le premier volume de ce qu'il est convenu de mentionner sous un titre raccourci de *Base du Système métrique*, plus correctement *Base du système métrique décimal*, il s'inscrivait dans l'idée d'œuvrer pour tous les temps, pour tous les peuples, phrase prémonitoire, attribuée à Condorcet (1743-1794), figurant sur l'avvers de la médaille commémorative de la fondation du système métrique, frappée en 1840, lorsque son utilisation a été rendue obligatoire en France. ●

## Contact

Suzanne DÉBARBAT  
Observatoire de Paris – SYRTE/UMR 8630  
Bureau des longitudes  
courriel : Suzanne.Debatbat@obspm.fr



© Bibliothèque de l'Observatoire de Paris

Médaille commémorative de l'établissement du Système métrique, frappée en 1840, gravée par Marius Pertin.

En haut, avers : La France est symbolisée par une femme debout tenant, d'une main un mètre divisé en dix parties, elles-mêmes divisées en dix, de l'autre un kilogramme. Cette figure est posée sur une plinthe de longueur cinq centimètres, chacun étant divisé en dix millimètres. En bas, revers : Un génie, planant au-dessus du globe terrestre dont l'axe est incliné de 45°, maintient un compas ouvert selon un quart de méridien ; l'étoile polaire rappelle son utilisation pour les déterminations astronomiques de la latitude.

## Vient de paraître

Un article de S. Débarbat paru dans les "Cahiers d'histoire et de philosophie des sciences" n°54 intitulé "L'Observatoire de Paris, le Bureau des Longitudes et les observatoires des provinces".

► ENS Editions - 35 € - ISBN 2-84788-083-6

# Atteindre les sommets des départements français : un défi relevé

■ Paul COURBON

*Quand on a passé plus de vingt ans à l'IGN et que plus d'une moitié de ces vingt ans s'est déroulée au service de la topographie à faire le complètement des cartes brutes issues de la restitution photogrammétrique, on est quelque peu marqué par les altitudes et les limites administratives ! Quand arrive l'âge de la retraite, on est encore marqué par cette activité parfois obsessionnelle ! On ne regarde plus la largeur des routes, leur classification ou encore les lignes électriques moyenne ou haute tension, mais il reste quand même une empreinte difficile à effacer...*



Ascension de la Barre des Ecrins par les pentes de l'arête Noire en 1961.

## Histoire de sommets

Ce 22 juin 2005 à 7h50, j'atteins la rupture de pente de la crête S.O. du Monte Rotondo cotée 2425 sur la carte 1/25 000. Je viens de gravir le dernier point culminant des départements de la France européenne, à la limite de la Haute Corse et de la Corse du Sud. Le paysage est magnifique, la Corse des montagnes est splendide. Mais j'en ai plein les pattes ! 1 600 m de dénivellation depuis hier au soir, les jambes douloureuses, je n'avais pas encore récupéré du Monte Cintu escaladé trois jours auparavant. Il est vrai que c'était ma première ascension depuis début septembre. Mais, la reprise a été beaucoup plus laborieuse que l'année précédente, laquelle était déjà plus laborieuse que... Mon amie me dirait sans aménité que je n'ai plus vingt ans ! Tout avait commencé en 1951. J'avais quinze ans et mes parents m'avaient envoyé passer un mois en moyenne montagne, sur le conseil d'un médecin. J'étais allé dans un chalet



Passage d'escalade à l'Aiguille du Chambeyron (A.H.P)

de l'Université de Montpellier, à l'Espérou dans les Cévennes. Un soir, nous avons fait 10 km à pied pour passer la nuit sur le Mont Aigoual (1567 m), point culminant du Gard et assister à un prodigieux lever du soleil, après une nuit de chansons paillardes devant un feu de camp.

Ma carrière à l'IGN me permit de poursuivre ce modeste début, d'abord en 1958, puis en 1961-1962. Mais à l'époque, ma passion pour les gouffres était beaucoup plus forte<sup>(1)</sup> et la montagne ne venait qu'au second plan, très épisodiquement. Il fallut attendre 1974 et la cartographie 1/25 000 du Massif de la Vanoise pour renouer sérieusement avec elle, temporairement.

En 2001, j'étais devenu un retraité et je ne sais comment me vint l'idée d'atteindre tous les points culminants dépar-

(1) Paul Courbon, 1972, Atlas des grands gouffres du monde (épuisé) Paul Courbon et Claude Chabert, 1987, Atlas des grandes cavités mondiales, à compte d'auteur - Paul Courbon, 2003, Chroniques souterraines, Editions Abysses. - Ces deux dernières publications sont en vente chez l'auteur.



Malgré sa couleur bleue, le Lac des Neuf Couleurs sous l'Aiguille du Chambeyron.

tements de plus de 1000 m d'altitude. Je ne connaissais pas le nord du Massif Central et les volcans d'Auvergne, très peu le Jura et les Vosges. Si je connaissais les Pyrénées des gouffres, je connaissais moins bien celle des sommets. Je pensais : *"cela me permettra de visiter ces belles régions"*. Mais, j'avais des doutes sur certains points culminants et début 2003, passant par Paris, j'allais rendre visite à la cartothèque. Je me souvenais, qu'après le complètement de chaque feuille 1/25 000, nous remplissions une fiche de renseignements nous demandant, entre autres, les altitudes des points les plus hauts et les plus bas de cette feuille. Le directeur de la cartothèque me rapporta au bout de peu de temps une liste des points culminants de tous les départements ! Pour un trésor, c'en était un et là, sans hésitation, je pris le parti de les faire tous.

## Réflexions de retraité

Quand en 1936 le Front populaire fit adopter la retraite à 60 ans pour les fonctionnaires et 65 ans pour les autres, quelqu'un qui avait 60 ans atteignait en moyenne 68 ans de longévité <sup>(2)</sup>. Cela laissait huit ans de jouissance de retraite au fonctionnaire et trois ans aux autres ! Aujourd'hui, ce temps a plus que triplé : quelqu'un qui atteignait 60 ans en 2000 avait une espérance de vie de 84 ans en moyenne. Le jour de notre retraite, nous abordons de longues vacances, mais sans rentrée, celles-là et il nous faut songer à les occuper. Comme me le faisait remarquer un jeune ami varois de quarante ans, il n'y a plus de "vieux" ! On les voit courir, faire du vélo, des randonnées, des voyages en mobile home ou en avion, ils participent à la gestion d'associations, ils écrivent, *"ils n'ont plus le temps" !*

## Une occupation de retraité

Atteindre un sommet alpestre ou pyrénéen paraît une activité digne de respect et de considération, dont personne ne son-

2) François de Closets, "Toujours plus"



Le point culminant de la Corse du Sud (2425m), sur l'arête montant au Monte Rotondo.

gerait à contester le bien-fondé. Quant à ce sommet montagnard, son emplacement ne souffre d'aucune imprécision, il saute aux yeux.

Quand on va dans les plats pays du nord de la Loire, tout change... Atteindre un point culminant de 200 m d'altitude n'est pas aussi simple qu'on pourrait le penser. Tout d'abord, dans les zones faiblement ondulées, son emplacement n'est pas toujours évident, surtout quand il ne correspond pas à un point coté de la carte et que la courbe de niveau l'entourant est assez loin. Le secours d'un clisimètre est alors très utile. Ensuite, il y a l'environnement. Les zones peu accidentées sont cultivées ou boisées. Il faut souvent sauter des barrières ou des clôtures de barbelé, comme au bon vieux temps où on avait deux mois pour compléter une coupure du 1/25 000<sup>e</sup> ! Mais aujourd'hui, plus de carte professionnelle IGN ou d'arrêté préfectoral affiché en mairie. Quand un cultivateur vous demande ce que l'on fait sur son terrain et qu'on tente de le lui expliquer avec humour et bonhomie, on passe vraiment pour un farfelu !

Pourtant, certaines communes ou lieux-dits sont fiers de posséder le point culminant du département et à cinq reprises, j'ai rencontré des pancartes indiquant "l'Everest" départemental d'un plat pays, comme à Anor, commune du Nord culminant à 272 m.

On se justifie, aussi, en pensant à l'un des plus beaux monuments de la vanité et, parfois, de la bêtise humaine : le Guinness book des records... Il y a un certain Steeve Fossett qui, la soixantaine passée s'amuse encore à battre des records du monde. Le problème, c'est que tout le monde n'a pas ses moyens financiers, moi en particulier... alors, je devrais me contenter d'une modeste performance hexagonale, cocorico !

## Les points culminants à problèmes

Hormis les sommets plats, d'autres points culminants vous compliquent la tâche :

- Certains d'entre eux, en limite de département, ne corres-





La montagne corse est magnifique avec de nombreux ruisseaux et cascades.

pondent pas à un sommet, ce dernier étant dans le département voisin. Il faut alors chercher la courbe ou l'intercalaire tangente à la limite de département. C'est le cas de l'Hérault, du Gers, de la Loire, de l'Eure ou de la Loire-Atlantique.

- Plusieurs terrains militaires occupent des sommets : le Var, le Tarn, le Val-de-Marne, entre autres. Dans le Var, le barbelé limitant le terrain est 1,5 m plus bas que le sommet, dans le Tarn, c'est une zone clôturée d'un kilomètre autour du point culminant qui le rend inaccessible et il faut aller sur le sommet voisin, le Pic de Montalet, plus bas de quelques mètres. Dans le Val-de-Marne, malgré l'interdiction d'accès, je suis entré dans le Fort de Villejuif en prétextant m'être trompé !
- Il y eut l'épisode du point culminant du Jura. Les cartes anciennes donnaient le Crêt de la Neige, plus haut que le Reculet de 0,6 m. Sur les cartes récentes, le Reculet est donné 1718 m pour 1717 m au Crêt de la Neige. Puis en 2001 éclata la nouvelle incroyable : le vrai point culminant n'était ni au Reculet, ni au Crêt de la Neige, mais 400 m au N.E. de ce dernier sommet ! En effet, sur la crête effilée prolongeant le Crêt de la Neige, une petite dent rocheuse, même pas stationnable au théodolite culmine à 1720 m. Ni les géodésiens, ni les restituteurs, ni les compléteurs ne s'en étaient aperçus ! Après avoir fait le Reculet en 1995, je remontais au Crêt de la Neige en 2004 avec éclimètre et planchette !
- Le pire fut l'Aiguille de Chambeyron (3412 m), point culminant des Alpes-de-Haute-Provence. J'y allais en août 1998 avec mon fils, mais je n'avais pas la forme, je me trainais, me faisant même doubler dare-dare par un "vétérane" de 65 ans ! Nous n'avions pas pris le bon itinéraire et arrivés à 3360 m, une crête dentelée, imprudente à tenter sans corde, nous séparait du sommet, nous redescendions. Deux mois plus tard, je me faisais opérer d'un cancer. J'y retournais début août 2004 en prenant un autre itinéraire. Il y avait 400 m d'escalade facile : du III avec deux ou trois petits passages de IV<sup>(3)</sup>. Mais, l'itinéraire n'était pas évident et je me trompais par deux

3) Les cotations d'escalade allaient de II à VI. Elles vont maintenant jusqu'à VIII.



L'aiguille du Chambeyron (3412m), un itinéraire peu évident.

fois. Dans ce sévère et impressionnant cadre de montagne, mon compagnon de cordée était de plus en plus inquiet. Alors que nous n'étions plus qu'à une centaine de mètres du sommet, je me trompais une troisième fois. Terrassé par le stress et une panique incontrôlable, mon équipier me fit une telle scène que je dus redescendre sans atteindre le sommet. J'étais furieux et, cinq jours plus tard, je revenais en compagnie d'un autre ami, avec succès cette fois-ci.

## En guise d'épilogue

La haute montagne est magnifique, la moyenne montagne belle. Par contre, je dois avouer que dans les plats pays, il m'est parfois arrivé d'avoir l'impression de "yoyoter" ! Dans l'Aisne par exemple, où sous une pluie battante, après une demi-heure de marche à cause de chemins forestiers barrés, les pieds et le pantalon trempés malgré mon parapluie, je cherchais avec mon "petit clisimètre" l'emplacement du point culminant ! Je pensais alors à la chanson "Marinette" de Georges Brassens : "avec mon p'tit clisi, j'avais l'air..."

Il faut ajouter que les Provençaux, dont je fais partie, ont trop souvent tendance à considérer avec condescendance tout ce qui n'est pas Provence et montagnes du Sud ! Pourtant, quand de surcroît il y avait du soleil, j'ai fait la connaissance de régions dont je ne soupçonnais pas les charmes. Sur ce plan, ce challenge fut une très bonne idée.

Quant à l'amateur du Guinness book qui voudra faire mieux, il pourra se programmer en sus les départements d'Outre-mer ! Attention à la Guyane... ●

### Paul COURBON

Ingénieur des Travaux Géographiques (IGN),  
Géomètre-expert DPLG  
20, rue Peyre-Ferry  
83000 TOULON  
Tél : 04 94 22 98 25  
paul.courbon@yahoo.fr

## Points culminants des départements Français

Département	Commune	Nom du sommet	Altitude	Date
01 Ain	Lélex	Crêt de la Neige	1720 m	24.09.2004
02 Aisne	Watigny	Le Chêne Nain	295 m	23.09.2004
03 Allier	Saint-Priest-la-Prugne	Puy de Montoncel	1287 m	26.07.2002
04 Alpes-de-Hte-Provence	Saint-Paul (en-Ubaye)	Aiguille du Chambeyron	3412 m	26.08.2004
05 Hautes-Alpes	Vallouise	Barre des Ecrins	4102 m	13.07.1961
06 Alpes-Maritimes	Saint-Martin-Vésubie	Cima dei Gelas	3143 m	Sept. 1958
07 Ardèche	Borée ( ? )	Mont Mézenc sud	1753 m	Sept. 2001
08 Ardennes	Les Hautes-Rivières	Bois de Croix de Scaille	505 m	Avril 2003
09 Ariège	Auzat	Pic d'Estats	3145 m	Juin 1962
10 Aube	Champignol-lez-Mondeville	Bois du Mont	370 m	21.09.2004
11 Aude	Le Bousquet	Madrès	2465 m	26.08.2002
12 Aveyron	Aurelle-Verlac	Montagne de Mailhe Biau	1463 m	15.09.2002
13 Bouches-du-Rhône	Gémenos	Bau de Bertagne	1042 m	1957
14 Calvados	Plessis-Grimoult	Mont Pinçon	362 m	08.04.2005
15 Cantal	Saint-Jacques-des-Blats	Plomb du Cantal	1855 m	28.07.2002
16 Charente	Montrollet	Lande de la Borderie	368 m	25.05.2004
17 Charente-Maritime	Contré	Bois de Chantemerlière	173 m	25.05.2004
18 Cher	Préveranges	Le Magnoux	501 m	26.05.2004
19 Corrèze	Meymac	Le Mont Bessous	976 m	26.05.2004
20A Corse-du-Nord	Asco/Calacuccia	Monte Cintu	2706 m	18.06.2005
20B Corse-du-Sud	Guagno	Crête S.O. du M. Rotondo	2425 m	22.06.2005
21 Côte-d'Or	Ménessaire	Mont de Gien	721 m	29.05.2003
22 Côtes-d'Armor	Trébry	Mont-Carmel	339 m	09.04.2005
23 Creuse	Saint-Matin-le-Vieux	Forêt de Châteauvert	932 m	26.05.2004
24 Dordogne	Saint-Pierre-de-Frugie	Forêt de vieillecour	475 m	24.05.2004
25 Doubs	Longevilles-Mt-d'Or	le Mont d'Or	1461 m	Avril 2003
26 Drôme	Lus-la-Croix-Haute	Le Rocher Rond	2453 m	04.07.2004
27 Eure	Juignettes	Ferme des Bruyères (61)	251 m	08.04.2005
28 Eure-et-Loir	Vichères	Butte de Rougemont	287 m	06.04.2005
29 Finistère	Plounéour-Ménez	Roc'h Trédudon	387 m	10.04.2005
30 Gard	Valleraugue	Mont Aigoual	1565 m	août 1951
31 Haute-Garonne	Oô	le Perdiguero	3222 m	26.06.2003
32 Gers	Mont d'Astarac	le Tuco	390 m	28.06.2003
33 Gironde	Grignols	Montagne	166 m	24.05.2004
34 Hérault	Cabon-et-Salvergues	Valbonne	1148 m	15.09.2002
35 Ille-et-Vilaine	Paimpont	Forêt de Paimpont	258 m	09.04.2005
36 Indre	Poulligny-Notre-Dame	Terrier Randoïn	456 m	26.05.2004
37Indre-et-Loire	Céré-la-Ronde	Ferme Neuve	186 m	11.04.2005
38 Isère	Saint-Christophe-en-Ois	Pic Lory	4088 m	13.07.1961
39 Jura	Lamoura	Crêt Pela	1495 m	Avril 2003
40 Landes	Lauret	Cassoura	235 m	24.05.2004
41 Loir-et-Cher	Bouffry	Bois des Vallées	257 m	06.04.2005
42 Loire	Chalmazel	Pierre-sur-Haute	1630 m	28.05.2003
43 Haute-Loire	Les Etables	Mont Mézenc nord	1749 m	Sept. 2001
44 Loire-Atlantique	Fercé	Forêt Neuve d'Araize	118 m	10.04.2005
45 Loiret	Pierrefitte-ès-Bois	La Maison Rouge	282 m	06.04.2005
46 Lot	Labastide-du-Haut-Mont	La Bastide du Mont	783 m	27.05.2004
47 Lot-et-Garonne	Sauveterre-la-Lémance	Le Moulin à Vent	285 m	27.05.2004
48 Lozère	Le Bleymard	Sommet de Finiels	1699 m	Juin 2002
49 Maine-et-Loire	Saint-Paul-du-Bois	Bois de la Gaubretière	214 m	10.04.2005
50 Manche	Chaulieu	Saint Martin de Chaulieu	366 m	08.04.2005
51 Marne	Verzy	Forêt domaniale de Verzy	288 m	23.09.2004

Département	Commune	Nom du sommet	Altitude	Date
52 Haute-Marne	Apresy	Bois de Baissey	523 m	21.09.2004
53 Mayenne	Pré-en-Pail	Mont des Avaloirs	416 m	Sept. 1975
54 Meurthe-et-Moselle	Bionville	Roc du Taurupt	731 m	Avril 2003
55 Meuse	Vaudeville-le-Haut	Bois de Vaudeville	451 m	08.05.2002
56 Morbihan	Plouray	Kerroc'h	296 m	10.04.2005
57 Moselle	Walscheid	Grossmann	987 m	Avril 2003
58 Nièvre	Glux-en-Glenne	Mont Prénelay	855 m	28.05.2003
59 Nord	Anor	Le Bois Saint-Hubert (Fme)	271 m	07.04.2005
60 Oise	Savignies	Bois de Courcelles	240 m	07.04.2005
61 Orne	Fontenai-les-Louvets	Signal d'Ecouvres	413 m	08.04.2005
62 Pas-de-Calais	Alquines	Bullescamps	212 m	07.04.2005
63 Puy-de-Dôme	Le Mont-Dore	Puy de Sancy	1885 m	27.07.2002
64 Pyrénées-Atlantiques	Laruns	Pic Palas	2974 m	23.06.2003
65 Hautes-Pyrénées	Cauterets	Le Vignemale	3298 m	06.08.2003
66 Pyrénées-Orientales	Angoustrine-Villeneuve-des-Esc.	Puig Carlit	2921 m	28.08.2002
67 Bas-Rhin	Bellefosse	Le Champ du Feu	1099 m	08.05.2002
68 Haut-Rhin	Goldbach-Altenbach	Ballon de Guebwiller	1424 m	08.05.2002
69 Rhône	Monsols	Mont Saint-Rigaud	1009 m	26.07.2002
70 Haute-Saône	Plancher-les-Mines	Ballon de Servance	1215 m	08.05.2002
71 Saône-et-Loire	Saint-Prix	Le Bois du Roi (Ht Folin)	901 m	28.05.2003
72 Sarthe	Villaines-la-Carelle	Forêt de Perseigne	340 m	Sept. 1975
73 Savoie	Termignon/Pralognan	La Grande Casse	3855 m	Août 1974
74 Haute-Savoie	Chamonix	Mont Blanc	4810 m	09.09.1974
75 Seine	Paris	Saint-Pierre de Montmartre	130 m	1956
76 Seine-Maritime	Conteville	( ? )	247 m	07.04.2005
77 Seine-et-Marne	Verdelot	Fme de Saint-Georges	216 m	22.09.2004
78 Yvelines	Elancourt	Butte de Trappes	216 m	22.09.2004
79 Deux-Sèvres	Saint-Martin-du-Fouilloux	Terrier de Saint-Martin-du-Fouilloux	271 m	25.05.2004
80 Somme	Morvillers-Saint-Saturnin	Digeon	215 m	07.04.2005
81 Tarn	Lacaune	Roc de Montalet	1259 m	Sept. 2001
82 Tarn-et-Garonne	Castanet		504 m	27.05.2004
83 Var	La Bastide	Montagne de Lachens	1714 m	1997
84 Vaucluse	Bédouin/Brantes	Mont Ventoux	1910 m	1957
85 Vendée	Saint-Michel-Mont-Mercure	Saint-Michel-Mont-Mercure	290 m	10.04.2005
86 Vienne	Adriers	Les Frémigis	231 m	25.05.2004
87 Haute-Vienne	Beaumont-du-Lac	Puy Lagarde	795 m	26.05.2004
88 Vosges	La Bresse	Le Hohneck	1362 m	08.05.2002
89 Yonne	Quarré-les-Tombes	Bois de la Pérouse	607 m	29.05.2003
90 Territoire de Belfort	Lepuix	Ballon d'Alsace	1247 m	08.05.2002
91 Essonne	Limours	Plaine de Chaumusson	181 m	06.04.2005
92 Hauts-de-Seine	Vaucresson	Route du Butard	182 m	Avril 2003
93 Seine-Saint-Denis	Les Lilas	Fort de Romainville	135 m	Avril 2003
94 Val-de-Marne	Villejuif	Fort des Hautes Bruyères	126 m	Avril 2003
95 Val-d'Oise	Haravilliers	Les Buttes de Rône	216 m	07.04.2005

## Remerciements :

La présente liste des points culminants des départements français a paru dans le numéro 80 d'octobre 2005 du bulletin trimestriel JALON de l'Association des personnels retraités de l'Institut Géographique National (APRIGN).

La rédaction d'XYZ remercie l'APRIGN et l'auteur de l'article Paul Courbon d'avoir bien voulu autoriser sa publication dans XYZ avec une présentation différente de celle de JALON.



# Felice Varini : La

■ Jean-Pierre MAILLARD

***Le 15 novembre 2005, après deux ans et demi de travaux de construction, le musée départemental du Val-de-Marne a été inauguré à Vitry-sur-Seine. Dénommé le MAC/VAL le tout nouveau musée d'art contemporain (MAC) en région d'Ile-de-France présente une part significative de l'expression artistique produite de 1950 à aujourd'hui. C'est un réel événement car la construction d'un musée n'est pas courante encore moins en banlieue parisienne.***

## Le MAC/VAL

Né de la volonté du Conseil général le MAC/VAL constitue un aboutissement d'une politique culturelle en matière d'arts plastiques. Elle a été initiée en 1982 par les premières acquisitions d'œuvres de jeunes artistes. Elles couvrent tous les supports et toutes les

générations avec un axe fort sur l'art français. L'ensemble constitue désormais la collection du Fonds départemental d'art contemporain (FDAC) conservée par le musée qui la présente pour une bonne part. Le Val-de-Marne a financé la moitié du coût de l'édifice (plus de 30 M€) l'autre moitié étant prise en charge par le Ministère de la culture et la Région d'Ile-de-France. L'obtention de tous les financements, nécessaires à l'aboutissement du projet a pris plusieurs années.

C'est en 1990 que le Conseil général a décidé la construction qui doit permettre la rencontre du public avec la collection et l'animation culturelle associée. L'année suivante le concours d'architectes est gagné par l'équipe Ripault-Duhart. A l'abord, le bâtiment retenu de béton blanc, verre et acier, aux lignes sobres et épurées ne s'impose pas. Au contraire il laisse le regard accroché par la cheminée de Jean Dubuffet trônant au centre du rond-point qui borde le musée. Cette sculpture monumentale met l'œil en éveil et incite, la curiosité aidant, à emprunter la douce déclivité qui conduit à l'entrée principale de l'édifice. L'intérieur est spacieux et clair et là encore l'architecture ne s'impose pas, Jacques Rippault l'ayant voulu de façon délibérée: *"Je voulais que ce musée*

*appelle le regard en célébrant la tranquillité du lieu et en rappelant ce qui est le propre d'un musée: planéité du sol et filtrage de la lumière (dédiée) aux œuvres... C'est en allant à l'essentiel... que l'on est le plus respectueux des œuvres et du public".*

Le souci dudit public est souligné par une politique tarifaire quelque peu hors normes. En effet le MAC/VAL accueille, sur réservation, gratuitement les enseignants et leurs classes de la maternelle à l'université. Il est gratuit les premiers dimanches de chaque mois et à longueur d'année pour diverses catégories de personnes bénéficiaires d'une aide sociale selon leur âge ou leur condition de ressources. Enfin le tarif maximum est fixé à 4 €. En parallèle la direction du musée conduit une action pédagogique vers tous les publics en lien avec les artistes ou en proposant un programme d'art cinématographique.

On ne sera pas surpris de trouver des grands noms de l'art contemporain comme ceux d'Olivier Debré, Pierre Soulages et César, ceux de l'abstraction géométrique dont XYZ a déjà présenté une œuvre, Daniel Buren, Luis Tomasello, récemment Geneviève Asse... et ceux dont la rubrique "Art et géométrie" devra assurément parler notamment François Morellet, Jean-Pierre Raynaud et Peter Stämpfli.

La collection comporte donc des acquisitions mais aussi des commandes. Il est proposé de s'intéresser à celle passée à Felice Varini intitulée "Trois cercles excentrés".

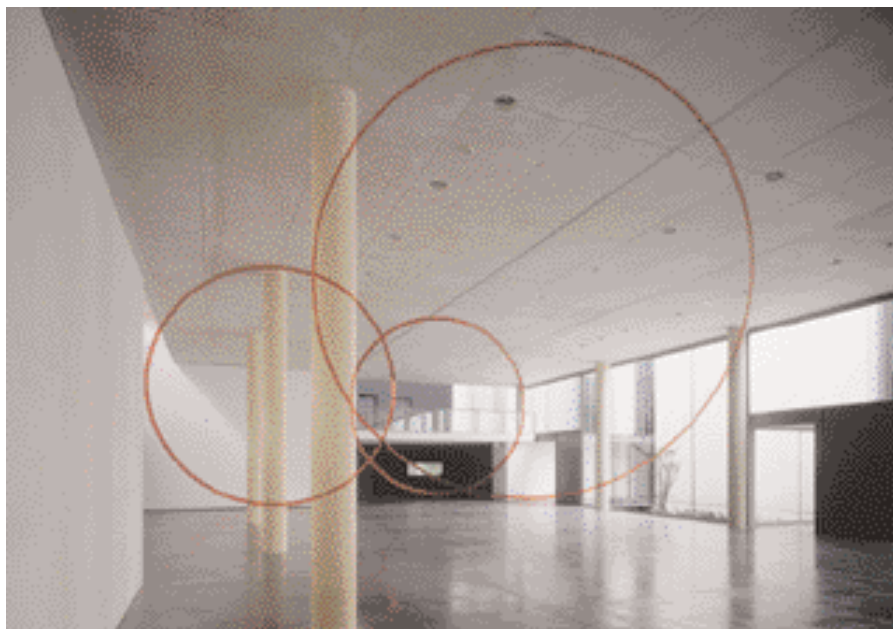
## Trois cercles excentrés

On perçoit tout d'abord un trait sur un mur, puis deux, puis trois... puis on voit un autre mur griffé de la même manière, sorte de tag décousu, léché dont on comprend immédiatement la rigueur et qui aiguise la curiosité. Les



© Pauline Turnel

# magie de la ligne



© Adagp, Paris 2005 - photo André Morin

légier une belle galerie blanche et bien soignée plutôt qu'une usine désaffectée et déglinguée. Ainsi, l'espace construit, qu'il soit intérieur ou extérieur, devient son champ d'intervention préféré pour le marquer de son empreinte en soulignant telle ou telle ligne et entraîner le spectateur dans le surréalisme.

Il s'est alors employé à réaliser ce qu'il nomme des pièces, à les effacer, et à vendre les documents photographiques correspondants. Mais comme ces photos ont été prises pour les objets artistiques ce que, pour lui, elles n'étaient pas, il a alors commencé à travailler également sur photos. Dans le même temps il a pris conscience qu'une de ses réalisations disparues pouvait réapparaître dans d'autres lieux possédant des caractéristiques architecturales équivalentes. C'est pourquoi il compare son travail à une musique, son œuvre constituant une partition pouvant être réinterprétée ailleurs.

Felice Varini apporte incontestablement une novation dans l'expression picturale et l'on reconnaît immédiatement sa signature d'artiste. C'est le signe d'une vraie maturité. ●

► Pour tous renseignements : [www.macval.fr](http://www.macval.fr), [www.varini.org](http://www.varini.org)

## Felice Varini au 18, rue Antoine-Bourdelle à Paris XIV<sup>e</sup>

Jusqu'au 21 mai 2006, le musée Bourdelle accueille Felice Varini qui a investi plusieurs salles d'exposition. On y retrouve son goût de la ligne, du trompe-l'œil et de la couleur cette fois dans un univers dominé par les œuvres monumentales de plâtre et de pierre du successeur d'Auguste Rodin.

► Renseignements : [www.paris.fr/musees/Bourdelle](http://www.paris.fr/musees/Bourdelle)

lignes rouges éparses et segmentées s'imposent au regard. En marchant, dans une lente évolution, leur composition change et l'on pressent une unité. L'œil du géomètre jauge les courbes et assimile complètement leur tridimensionnalité. On comprend vite qu'il y a un point de vue privilégié, on le cherche et on le trouve facilement.

A cet endroit, en découvrant les "Trois cercles excentrés" la surprise est d'autant plus parfaite que l'illusion est réelle. Pour chacun des cercles, toutes les sections de courbes finissent par n'en faire qu'un en imposant sa géométrie pure, un anneau bien rond suspendu dans l'espace. Les trois cercles apparaissent alors au premier un plan dans toute leur bidimensionnalité. Celle-ci sera amplifiée par la photographie qui, elle, se présente dans un seul plan.

L'artiste n'a eu aucun recours à des techniques topométriques de traçage puisque avant de peindre les lignes in situ, il les a dessinées lui-même depuis son point de vue. Avec la seule aide d'un projecteur permettant des ajustements, il marque le sol, les murs et autres poteaux.

Felice Varini constate que l'œuvre présentée, qui a la matérialité de la fresque, entre en lévitation, ne semble accrochée à rien, et s'interroge sur cette contradiction : qu'est-ce que la réalité, qu'est-ce que l'illusion. Il y voit un basculement vers l'abstrait.

## Felice Varini

Felice Varini est né en 1952 à Locarno dans le Tessin (Suisse). Depuis 1978, il vit et travaille à Paris. Il intervient dans les lieux publics et il participe à des expositions collectives dans le monde entier. Depuis 1981, ses expositions personnelles se sont tenues notamment à Paris, en Suisse, en Italie, au Mexique, en Allemagne, au Venezuela et aux Etats-Unis.

A 26 ans, il a renoncé à travailler à l'intérieur du cadre de la toile, car il ne savait plus très bien y quoi faire. Il est allé voir ce qui se passe au-delà du tableau avec la préoccupation de mettre son expression en relation directe avec la réalité. Dans le même esprit, il ne voulait pas non plus privi-

# Histoire de l'acoustique sous-marine

Par Pierre JUHEL

Préface de Pierre ALAIS

Laboratoire de Mécanique physique de l'Université Paris VI/Pierre et Marie Curie

***“Les moindres bruits se transmettaient avec une vitesse à laquelle l'oreille n'est pas habituée sur la terre. En effet, l'eau est pour le son un meilleur véhicule que l'air et il s'y propage avec une rapidité quadruple.”***

Jules Verne, *Vingt mille lieux sous les mers* Chapitre XVI : “Promenade en plaine”

**D**e tout temps le marin a eu à se soucier de la hauteur d'eau sous la quille. En recourant à la transmission du son par l'eau les scientifiques trouvèrent la solution, qui se concrétisa en 1905 par la construction du premier sondeur acoustique. Peu de temps après, le naufrage du Titanic (dans la nuit du 14 au 15 avril 1912), puis la menace des sous-marins pendant la Première guerre mondiale provoquèrent de nombreuses inventions, dont celle du grand Physicien Paul Langevin (1872-1946), qui fonda l'acoustique sous-marine en recourant aux ultrasons. Les conflits entre nations à cette époque stimulèrent l'activité scientifique pour aboutir à des solutions inédites et raisonnables pour les applications militaires ou civiles. L'ouvrage de Pierre Juhel est remarquable par son exposé historique des faits scientifiques sur lesquels s'appuient les progrès inédits dans le domaine océanographique, particulièrement. Nous allons les présenter sommairement, en nous attachant à l'époque contemporaine.

## La mesure des profondeurs

La mesure des profondeurs est l'opération fondamentale en hydrographie. Elle doit être rattachée à une altitude conventionnelle pour tenir compte des variations périodiques du niveau de la

mer. Elle conduit à la mise en œuvre de diverses techniques telles que la géodésie terrestre, le positionnement en mer, l'étude des marées, l'hydrologie ou les techniques de sondage.

L'océan étant opaque au rayonnement électromagnétique, la mesure bathymétrique est obtenue par des méthodes acoustiques depuis 1945, époque qui marque la fin des sondages au plomb poisson. On rappelle, au passage, que l'inventeur du sondage vertical acoustique ultrasonore est l'ingénieur hydrographe Marti, en 1929. Son système enregistrait une explosion, sur microphone assorti d'un amplificateur et d'un oscillographe à plume. Il fut breveté en 1930 sous l'appellation “Langevin - Florisson - Marti”. Signalons, au passage que les sondeurs petits et grands fonds utilisés au SHOM proviennent des firmes Hughes, Atlas, Edo, Raytheon.

## Le sondeur ultrasonore classique

Ce sondeur, à faisceau unique, d'un cône d'ouverture de 20° à 30°, explore le fond selon un profil de sonde. La sécurité, hors du cône d'émission, avec ce type de sondeur, est assurée par le sondeur latéral. La mise en service de compensateurs de pilonnement, en 1980, pour les bâtiments



océanographiques du SHOM, et en 1996, pour les vedettes, a permis d'affranchir les sondages des mouvements de plate-forme.

## 1. Les sondeurs multifaisceaux

Au milieu des années 1970 est apparu un concept nouveau, celui du sondeur multifaisceaux.

Le principe de fonctionnement du sondeur multifaisceaux est basé sur des techniques acoustiques permettant de mesurer les profondeurs sur toute une fauchée perpendiculaire à l'axe du navire, sur une largeur variant de 2 à 7 fois la profondeur. La technique généralement utilisée est dite des “faisceaux croisés”, car l'émission du signal sonore et la réception de l'écho réfléchi se font selon des faisceaux perpendiculaires dont l'intersection



représente la surface sondée. L'émission est effectuée par un faisceau de très faible ouverture longitudinale (environ 2°), mais très large latéralement (de 30° à 150°). La réception est effectuée par plusieurs faisceaux (de 20 à 200 selon les cas), de faible ouverture latérale (de 1° à 5°) et de grande ouverture longitudinale (environ 20°).

Il existe des modèles grands fonds, pour la bathymétrie au large, et la géophysique : c'est le cas de l'EM 12-dual de SIMRAD (qui a équipé l'"Espérance" au SHOM) : 162 faisceaux balaient une largeur de 150°, correspondant à 4 fois la profondeur, en acquérant 106 sondes au km<sup>2</sup> ; mais aussi des modèles petits fonds, pour les applications côtières, comme le sondeur Lennemor - Thomson - Sintra-ASM acquis en 1988, et précurseur dans sa génération, qui permet entre 20 et 300 m de profondeur, une fauchée de 90° par un ensemble de 20 sondeurs élémentaires. Le SHOM utilise actuellement un EM 2002 dont les performances sont voisines.

Les sondeurs multifaisceaux représentent une avancée spectaculaire par rapport au sondage conventionnel, mais leur bonne exploitation reste complexe en raison des problèmes de calibration, de roulis, de tangage, de lacet, de célérité du son dans l'eau, etc.

## 2. La détection des obstructions

### Le sondeur latéral

Elle concerne la détermination de la position, de la profondeur, de la nature, des obstacles naturels ou artificiels. Dans les années 1970 sont apparus les sondeurs latéraux (Edgerton) qui donnaient des images acoustiques du fond, transversalement à la route suivie. Les sondeurs latéraux sont remorqués par des vedettes ou des bâtiments. Tout point suspect doit être insonifié deux fois à partir des profils situés de part et d'autre de ce point.

### Des exemples :

- 1 - un objet de taille 0,7 m est détectable par fond de 30 m, à partir de profils espacés de 75m,
- 2 - l'acquisition à la fin des années 1980, pour le bâtiment hydrographique. La Pérouse, d'un "sonar d'exploration hydrographique Marine", dérivé des sonars de chasse aux mines, permettrait dans un rayon de 700 m de détecter des objets de dimension métrique par des profondeurs inférieures à 120 m.

## 3. La photogrammétrie

Depuis les années 1980, le pilotage des restituteurs analytiques par ordinateur permet, d'une part, d'exploiter la radiolocalisation précise de l'avion de prise de vue et d'autre part, de tenir compte de la réfraction au passage du dioptré air mer, pour effectuer des cotations stéréoscopiques sous l'eau jusqu'à des profondeurs de 10 m dans les eaux claires.

## 4. Le laser

Le laser est utilisé en Australie, au Canada, aux Etats-Unis et en Suède, pour des déterminations bathymétriques en eaux claires, jusqu'à des profondeurs de 50 mètres. Le SHOM en envisage une prochaine utilisation pour les besoins de la Marine.

## 5. L'océanographie

P.M.

## 6. L'océanographie spatiale

Les paramètres météo-océanographiques, vent, courant, houle, température de surface, ne peuvent être observés globalement qu'à partir de l'espace. Mais l'océan est rebelle à se laisser traverser par le rayonnement électromagnétique. D'où une approche de phénomènes profonds par des phénomènes superficiels, tel que la topographie de la surface de la mer.

## 7. L'océanographie embarquée

P.M.

## 8. La tomographie acoustique

La tomographie acoustique fait partie des techniques récentes d'observation de l'océan, dérivées de l'acoustique sous-marine. Elle permet, à partir des sources basse fréquence (quelques centaines de hertz) de scruter l'intérieur des mers sur de vastes étendues, car aux basses fréquences l'atténuation est particulièrement faible. La vitesse du son dans l'eau dépend, entre autres paramètres, de la température de celle-ci. En disposant de sources acoustiques et de récepteurs autour de la zone à étudier, et en mesurant les temps de parcours des ondes acoustiques entre les différents émetteurs et récepteurs, l'évolution des caractéristiques thermiques des eaux dans la zone considérée peut être suivie. Depuis 1990 le SHOM a mis au point des méthodes permettant une description globale de la propagation acoustique directement utilisable pour la détection sous-marine. ●

Jean BOURGOIN

► Editions Vuibert  
Prix : 25 € - 192 pages  
ISBN : 2 7117 5383 2

### Pierre Juhel

Ingénieur de l'Ecole nationale supérieure du pétrole, Pierre Juhel a consacré la plus grande partie de sa vie professionnelle à l'acoustique sous-marine. Il a pratiqué celle-ci dans trois domaines : la recherche pétrolière, la détection des mines sous-marines et l'océanographie. Le résultat de ses premières recherches historiques a été présenté, en 1998, dans le cadre de conférences organisées conjointement par l'IFREMER (Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer) et l'Espace des sciences.

# De l'Océan Indien à la Loire...

■ François BODIN

***Initiée à l'occasion de la visite de trois géomètres-experts à Antananarivo en avril-mai 2005, l'accueil d'étudiants malgaches en France prend forme.***

Pour ce premier contact de l'hémisphère Sud vers le Nord, une étudiante en fin de cycle universitaire est arrivée en France en janvier 2006. Elève de cinquième année à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, département Information Géographique et Foncière, elle vient effectuer son stage de fin d'étude qui se matérialisera par la rédaction d'un mémoire dont la soutenance est prévue en juillet prochain, lui permettant d'obtenir le titre d'ingénieur diplômé de l'E.S.P.A.

Ce stage se déroule actuellement au sein de deux cabinets de géomètres-experts de la région Centre et a pour thème la voirie et les réseaux divers, thème choisi en rapport avec la croissance urbaine de la zone d'Antananarivo.

L'objectif de nos associations, qui parraient ce stage, étant un échange à

double sens, l'apport pour les maîtres de stage se traduira par la rédaction du chapitre lié au V.R.D. de leurs manuels assurance qualité ; l'œil neuf extérieur est en effet prépondérant pour appréhender l'ensemble d'une activité sans préjugé, pour poser les questions parfois gênantes et remettre en cause des habitudes de travail qui tiennent plus de la routine endormie que d'une réflexion permanente.

Nous passerons ici les difficultés administratives "kafkaïennes" auxquelles nous avons dû faire face afin d'obtenir le visa nécessaire pour évoquer seulement la surprise des premiers jours, ce passage de l'été à l'hiver nettement plus froid que celui habituellement connu à Madagascar et dont la neige fut l'ambassadrice... la découverte également que l'on pouvait travailler dehors par des températures négatives, même



Avec ses amis français à Tuléar.

sur l'eau lorsque le chantier l'exige !

Premier mois de découverte et prise de contact avec le monde des géomètres français et celui des entreprises de génie civil, avec les modes de passation de marché, avec enfin ce système relationnel client-professionnel ou client-fournisseur dont l'aspect humain n'est pas la plus mauvaise part.

Enfin les contacts avec les étudiants français déjà partis à Madagascar et avec ceux qui vont s'y rendre l'été prochain font partie du programme de ces quelques mois à venir. ●



Notre étudiante au travail sur la Loire

