

# xyz

Éditée par l'  
Association  
Française de  
Topographie  
**n°102**

**Avant**

Banda Aceh

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

## La catastrophe d'Asie du Sud Est observée par satellite

**Après**

Banda Aceh



**Scannage 3D  
du temple  
d'Opet**



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

Membre de la FIG (Fédération Internationale des Géomètres)

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

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

### Directeur des publications

André Bailly  
Ingénieur Géomètre ETP

### Directeur adjoint des publications

Emmanuel Natchitz  
Enseignant Chercheur ESTP

### Rédaction et administration XYZ

2 avenue Pasteur  
94165 Saint Mandé CEDEX  
Tél. : 01 43 98 84 80 - Fax : 01 43 74 72 80  
secrétariat : tous les jours de 9 h à 17 h

### Rédacteur en chef

Emmanuel Natchitz

### Comité de Rédaction

Pierre Grussenmeyer  
Professeur des universités INSA Strasbourg  
Tania Neusch  
Maître de Conférences - INSA Strasbourg  
Stéphane Durand  
Enseignant chercheur - ESGT Le Mans

### Responsable du site internet

Tania Landes

### Comité de lecture

Hans-Peter Bähr  
Professeur des universités - Karlsruhe  
Nicolas Balard  
enseignant chercheur ESTP

Jean Bourgoïn

Ingénieur Général Hydrographe ER

Robert Chevalier

Géomètre-Expert DPLG

Suzanne Débarbat

Astronome Observatoire de Paris

Raymond d'Hollander

Ingénieur Général Géographe - IGN

Mathieu Koehl

Maître de conférences à l'INSA de  
Strasbourg

Joëlle Nicolas

Maître de conférences -ESGT Le Mans

Jacques Riffault

Directeur Commercial

Robert Vincent

Ingénieur ECP

Dr Pascal Willis

Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées.

### Publicité

Chantal Holdrinet (Tél. : 01 39 53 98 93)

### Conception et maquette

Dorothée Picard

### Abonnements : Evelyne Mesnis

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

### IMPRIMERIE MODERNE USHA

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

### Dépôt légal

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

### Tirage de ce numéro : 1600 ex

### Abonnement annuel

France CEE : 73 €

Étranger (avion, frais compris) : 76 €

Les règlements payés par chèques  
payables sur une banque située hors de  
France doivent être majorés de 10 €  
le numéro : 20 €

Le bulletin d'adhésion est en p. 87

Membre du SPCS Syndicat de la Presse  
Culturelle et Scientifique

L'AFT n'est pas responsable des opinions émises  
dans les conférences qu'elle organise ou les  
articles qu'elle publie. Tous droits de reproduction  
ou d'adaptation strictement réservés.

## ■ Editorial ..... 5

## ■ Info-Topo

&gt; Les informations de la profession ..... 7

## ■ Certification

> Certification ISO 9001-2000 du service  
hydrographique et océanographique  
de la marine : un nouveau départ

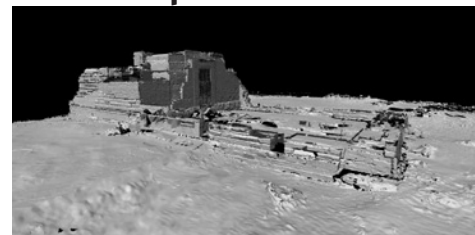
Yves DESNOËS ..... 18

## ■ Télédétection spatiale

> La catastrophe d'Asie du Sud Est  
observée par satellite

SERTIT ..... 21

## ■ Techniques nouvelles


> Le relevé par scannage 3D  
du temple d'Opet à Karnak, Egypte

Bertrand CHAZALY - Emmanuel LAROZE ..... 25

## ■ Prix AFT



### > Photogrammétrie

La photogrammétrie pour le relevé épigraphique  
des colonnes de la salle hypostyle du temple de  
Karnak - Élise MEYER ..... 33

### > GPS

Utilisation du GPRS pour le RTK

Luc CHALAYE ..... 39

### > Imagerie

Classification orientée objet  
de la perméabilité des sols en zone urbaine  
à l'aide d'imagerie très haute résolution  
et de données laser scanner à Curitiba (Brésil)  
Anne KARSENTY ..... 44

## ■ GPS

> Validation expérimentale du logiciel  
de lancer de rayon ergospace et estimation  
de la précision du MNE requise  
pour son utilisation

Thomas TIRTAINE - Juliette MARAIS ..... 50

## ■ Géométrie

&gt; Le nombre d'or et la divine proportion

Raymond D'HOLLANDER ..... 55

## ■ Topo vécue


> Archéologie en Arabie Saoudite  
le site Nabatéen de Medain Saleh

Paul COURBON ..... 59

## ■ Histoire

> Épisode d'une compétition séculaire, engagée  
par la Papauté, rapidement conclu en 1494  
LE TRAITÉ DE TORDESILLAS un partage du monde  
entre Castille et Portugal riche d'enseignements  
Vice-amiral Jean-Marie DAMBIER ..... 63

> Des Longitudes et des Mers :  
La genèse de la navigation

Frédéric BRETAR ..... 65

## ■ GSF

&gt; Madagascar quand tu nous tiens...

Damien BREGLER - Henri DE SAINT SERNIN  
..... 71


## ■ Art et Géométrie

> Auguste Herbin : la  
"Joie" et la peine  
Jean-Pierre MAILLARD

..... 72

## ■ Expo - Livres ..... 74

Pour la recherche de nos annonceurs  
consulter la page 76.

## 102 = 17

*Chers lecteurs,*

*Cette équation semble fausse et pourtant elle exprime ma contribution à notre revue. En réalité cette équation s'écrit  $102 - 86 = 17$ . Mon travail a démarré avec la revue XYZ n° 86 et je signe mon dernier éditorial sur ce n°102.*

*Dix sept numéros, pour lesquels j'ai assuré le poste de Rédacteur en Chef. A travers ces numéros, j'ai eu le plaisir de collaborer avec beaucoup d'auteurs sur des thématiques très variées et instructives. Je les remercie tous pour la qualité des articles qu'ils nous ont soumis, articles qui, je l'espère, vous ont permis de prendre du plaisir à la lecture d'XYZ.*

*L'étendue des sciences topographiques n'est pas à prouver. La transmission de la connaissance ne peut pas être individuelle mais doit devenir collective. C'est l'échange et le partage qui font avancer les recherches et les techniques. La revue XYZ est un des vecteurs de ce partage. L'implication des lecteurs est ainsi vitale pour la pérennité de la revue.*

*Sans vouloir faire de cet éditorial une liste de remerciements qui vous vous en doutez serait longue, je tiens tout de même à souligner le travail remarquable de notre maquettiste. Elle ajoute à cette revue une identité graphique forte et son talent habille les articles pour les rendre plus attrayants et agréables à lire, même lorsque leur sujet paraît difficile. Elle répond avec rapidité et flexibilité à toutes nos exigences tout en conservant une patience que je tiens à mettre en avant ici.*

*Assumer la rédaction en chef d'XYZ fut un travail passionnant mais malheureusement trop pesant. L'investissement en temps que j'ai accordé à XYZ fut récompensé par le retour positif et les remarques agréables provenant de votre part, chers lecteurs. Je souhaite à mon successeur autant de plaisir dans le montage des prochaines revues.*

*Bonne lecture à tous.*

**Emmanuel Natchitz**

# Certification ISO 9001-2000

## du service hydrographique et océanographique de la marine : un nouveau départ

■ Yves DESNOËS - Directeur du SHOM

*Comme l'ont souvent constaté ceux qui nous ont précédés sur la voie de la certification, l'évolution rapide des systèmes d'information et de l'automatisation prend souvent de vitesse l'actualisation des procédures, creusant l'écart entre ce qui a effectivement été fait et ce que l'on avait décrit comme étant à faire.*

*Dans un organisme comme le nôtre, pour lequel sécurité et traçabilité sont quasiment sacrées, un tel décalage devait être rattrapé. De plus, les systèmes utilisés pour les sondages en mer et pour la production à terre sont de plus en plus complexes et leur qualité influe directement sur celle des produits, y compris l'intégrité des informations.*

**N**ous avons donc décidé, à la fin 2000, de prendre les mesures nécessaires pour obtenir la certification ISO 9001-2000 du SHOM pour tous les aspects mentionnés ici, et notamment pour la conception et le développement des systèmes. Il nous a fallu tout ce temps pour mobiliser les énergies de notre service, préparer les contrats d'assistance et moderniser le système de management de la qualité et en rédiger la description formelle. Nous décrivons dans cet article les expériences qui nous paraissent les plus originales.

### Une approche des processus par catégories de produits

Au début de notre travail, nous avons essayé de minimiser le nombre de processus en définissant des approches génériques applicables à de très larges catégories de produits (et services). Il s'est cependant avéré pratiquement impossible d'assurer la satisfaction des clients et de tenir compte des différentes compétences humaines spécifiques à travers de relations entre processus génériques. En conséquence, nous avons adopté des processus structurés selon des catégories de produits très similaires, processus allant des besoins à la satisfaction du client.

Ont ainsi été élaborées 13 processus de fourniture de produits aux clients externes, 18 processus d'assistance aux clients internes et 3 processus de gestion.

Les treize processus "externes" concernent la gestion du portefeuille de cartes sur papier, la création et la gestion du por-

tefeuille de cartes électroniques de navigation (ENC), la gestion des séries des publications nautiques (entre autres des Instructions nautiques pour la plaisance), la réalisation et la distribution de catalogues, la gestion des publications complémentaires, le traitement des informations nautiques urgentes, le traitement des informations nautiques rapides, la prédiction des marées, la production et la distribution des publications concernant les courants des marées, la production de documents nautiques non inscrits dans les catalogues, la réalisation de levés hydrographiques, l'expertise en géodésie et positionnement et la communication externe.

Nous avons été surpris de découvrir que la conception et le développement étaient intégrés et, pour ainsi dire, dissimulés dans les procédures. Nous avons ainsi dû les traiter par des objectifs spécifiques dans la déclaration de politique de qualité du SHOM (voir le point "Conception et développement" ci-dessous pour plus de précisions).

### Pas de maillon faible

La sécurité<sup>1</sup> ne souffre aucun compromis : toutes les tâches ayant une influence sur la sécurité ont dû être intégrées dans le champ de la certification.

Cela explique pourquoi nous avons un si grand nombre de processus pour une organisation de taille relativement petite, et pourquoi nous avons mis un certain temps pour atteindre notre objectif de certification (une autre cause est liée à la longueur de la procédure administrative des marchés publics). Il faut cependant souligner qu'une fois le processus de formalisation définitive lancé, avec l'aide indispensable de consultants extérieurs, il ne nous a fallu que dix-huit mois pour atteindre le niveau permettant la certification. Nous voyons là la preuve que nos procédures "traditionnelles" étaient déjà rigoureuses et bien maîtrisées. Les processus couvrent tout, du levé à la distribution, en passant par le traitement, la gestion des données, la cartographie, etc. Comme déjà dit, la conception et le développement devaient également être certifiés, et l'on peut dire que la norme ISO 9000-2000 est moins prescriptive en la matière que la norme ISO 9000-1994, où la norme ISO 9001 était consacrée à la conception et au développement.

La certification ISO 9000 n'est pas une preuve absolue en soi. Elle prouve seulement que l'on est bien organisé et que l'on respecte les procédures définies dans le domaine choisi. Nous aurions pu adopter une stratégie de certification plus progressive,

<sup>1</sup> Au sens de "sûreté de fonctionnement" qui comprend fiabilité, disponibilité, maintenabilité et sécurité au sens strict. Cf. R6 Aéro-00040 du BNAE.



en commençant par exemple par nos activités à terre, mais il nous a semblé que notre mission exigeait un engagement clair et une image nette, en interne comme à l'extérieur, qui ne se serait pas accommodée d'une certification partielle.

## Conception et développement

La qualité des systèmes, nécessaire pour la sûreté et l'efficacité, s'obtient en suivant des méthodes et des procédures bien définies de conception et de développement. Les recommandations et normes ne manquent pas en la matière, mais elles ne constituent pas un ensemble de règles applicables suffisant, et il faut faire un choix parmi leurs enseignements et adapter ceux-ci à l'activité concernée. Curieusement, alors que de nombreux systèmes modernes se basent sur le traitement de l'information et subissent de multiples évolutions au cours de leur cycle de vie, la gestion de ces évolutions est très mal définie par les principales normes. Nous avons dû élaborer un ensemble de recommandations pour le développement incrémental, chaque incrément étant traité comme un projet en soi au sens de la norme ISO 9000, avec des recouvrements possibles entre les phases de développement des incréments successifs.

Il nous a également fallu définir de nombreux autres aspects du cycle de vie et de l'acquisition. Dans la mesure où nous relevons du ministère de la défense, nous avons décidé d'employer les méthodes et la terminologie de celui-ci. L'une des sources principales de ce savoir-faire est l'ensemble de recommandations RG Aéro. Bien que "Aéro" fasse référence à l'organisme auteur des recommandations (Bureau de la normalisation de l'aéronautique et de l'espace), elles ont été conçues pour être appliquées à toutes les questions concernant les achats en matière de défense, de sorte qu'elles conviennent pour quasiment tous les domaines d'application.

Cela étant dit, les systèmes sont beaucoup plus petits<sup>2</sup> dans notre domaine d'activité que de nombreux systèmes de défense, et il nous a paru malcommode d'utiliser toute la série de recommandations RG Aéro. Nous avons retenu celles qui convenaient le mieux pour définir le cadre et l'organisation de nos systèmes :

- RG Aéro 00040, Recommandation générale pour la spécification du management de programme.
- RG Aéro 00023, Guide pour l'application des principes de gestion de configuration.
- RG Aéro 00008, Guide pour l'élaboration de la spécification technique de besoin.



**Le personnel du SHOM qui a contribué activement à la certification ISO 9001-2000 du service.**

Il existe de nombreuses autres recommandations, et nous estimons que nos concepteurs, nos responsables de projets et nos ingénieurs sauront en faire usage lorsqu'ils auront assimilé les recommandations fondamentales ci-dessus.

## Beaucoup de sémantique

Comme on a pu s'en apercevoir, la qualité, les méthodes et l'organisation sont des domaines où l'on utilise beaucoup de mots généraux auxquels il faut donner une signification précise pour une gestion efficace. Bien que nous nous soyons largement inspirés d'ISO 9000 pour les concepts, définitions et schémas de base, cela ne suffit pas et nous avons dû définir précisément des termes très généraux comme projet, système, ingénierie, incrément... Cela s'explique en partie par le fait que la pléthore des normes et recommandations existantes ne constitue pas un ensemble parfaitement cohérent, si grandes que soient par ailleurs leur qualité et leur utilité. Les choix qui y sont faits ne sont pas universellement valables, puisque les méthodologies doivent, comme on le sait bien, être adaptées à l'environnement dans lequel elles sont mises en œuvre. Ce travail a constitué une lourde charge pour le personnel du SHOM, qui a tout juste atteint la "masse critique" nécessaire.

Un peu plus de normalisation en matière d'hydrographie serait sans doute utile aux services hydrographiques de taille moyenne, et la nouvelle organisation future de l'Organisation Hydrographique Internationale (OHI) devrait permettre une progression rapide vers cet objectif.

Mais comme la qualité, la terminologie n'est pas une fin en soi. C'est seulement un outil pour ceux qui s'en servent. L'important lorsqu'on l'améliore est que les membres de l'organisation disposent d'un outil leur permettant de mieux communiquer et de travailler ainsi plus efficacement en équipe.

## Une vaste révision de la documentation

Beaucoup de documents de référence du Service étaient conservés dans des répertoires différents, gérés manuellement et quelquefois assez anciens. Nous avons dû trier toutes nos références. Ce fut un travail considérable que seule l'informatique pouvait nous permettre de réaliser.

Au lieu d'acheter un système de documentation commercial, ce qui nous aurait imposé une longue procédure d'acquisition, l'un de nos meilleurs informaticiens a développé, à partir d'un programme de gestion de workflow "grand public", un petit logiciel peu coûteux et, en fin de compte, très efficace.

Nous avons recensé au total un millier de références, ce qui semble beaucoup. Nous allons certainement réduire notre inventaire et le rationaliser, mais nous ne changerons pas l'ordre de grandeur. Cela montre que notre profession utilise des compétences et des procédures très complexes : la sécurité ne s'acquiert pas au rabais.

<sup>2</sup> Pour les petits systèmes, de nombreuses recommandations peuvent être suivies d'actions limitées, décrites par quelques lignes de texte alors qu'il faut parfois plusieurs volumes pour les grands systèmes. Il n'en est pas moins toujours intéressant d'en prendre connaissance.

## Les besoins des clients

L'une des caractéristiques les plus importantes d'ISO 9001-2000 est la place éminente donnée aux utilisateurs des produits et services, les "clients". Dans ce domaine, nous avons profité du fait qu'il y a quelques années, nous avons déjà reconnu la nécessité d'améliorer notre marketing et embauché un spécialiste en la matière. Cela peut paraître évident pour certains services hydrographiques, mais pour beaucoup d'entre eux, dont l'action s'inscrit probablement plutôt dans le cadre d'une mission gouvernementale, il peut être utile de signaler que les techniques du marketing sont également utiles pour la qualité. La qualité se fonde sur l'analyse des besoins des utilisateurs, le marketing aussi. Bon nombre de procédures nécessaires pour la qualité se retrouvent plus ou moins dans le marketing, par exemple la segmentation des marchés ou les enquêtes sur la satisfaction des clients. Cela étant dit, la satisfaction des clients ne doit pas être le seul critère des services de l'État : ceux-ci sont par essence tenus par leur mission de service public, en l'occurrence, en ce qui nous concerne, la production des cartes, documents et informations nautiques nécessaires pour une navigation sûre ; aller au-delà est exclu. Nous avons donc dû définir cette limite dans notre déclaration de politique de qualité.

Autre problème, la différence entre les besoins exprimés par les utilisateurs et les impératifs de sécurité. Pour beaucoup d'utilisateurs, le progrès est principalement synonyme d'automatisation et de facilité d'utilisation, mais les systèmes automatisés créent de nouveaux risques. Il n'est pas possible d'aborder cette question en quelques mots, mais on doit souligner que la prévention des catastrophes n'est pas seulement une question d'application d'un système de management de la qualité, parce que (du moins peut-on l'espérer) les catastrophes sont trop rares pour qu'un système de management de la qualité permette d'obtenir un taux d'amélioration "normal". Les milieux maritimes doivent tirer parti des connaissances dans d'autres domaines où existent de nombreuses normes de sécurité des systèmes d'information : cette tâche relève principalement de l'Organisation Maritime Internationale (OMI), l'OHI étant impliquée pour ce qui concerne les informations cartographiques et nautiques. Ce besoin implicite a pour effet apparent de ralentir le développement de certains produits ou services. Dans le même temps, pourtant, nous développons les produits véritablement sûrs, qui font passer la sécurité avant les considérations purement commerciales.

## Conclusion : un outil efficace pour de futurs progrès

Nous ne vivons pas dans un monde statique. Soit l'on progresse, soit l'on régresse, et c'est à nous que revient le choix. Un système de management de la qualité n'est pas une garantie totale de progression, mais l'un des outils nécessaires pour



progresser. Pour commencer, nous devons conserver notre certification, à un rythme au moins annuel, et c'est une puissante incitation à ne pas régresser. Deuxièmement, la nouvelle description homogène et formelle des processus du SHOM est un bon outil pour améliorer notre organisation, tout comme la nouvelle visibilité des documents de référence, aujourd'hui facilement accessibles à tous les membres de notre service. Le SHOM n'est pas seulement en charge de l'hydrographie, mais aussi de l'océanographie et de la météorologie pour la Marine nationale. Nous avons donc décidé de demander, dans un deuxième temps, la certification de ces éléments plus militaires de notre activité. Ce travail est en partie bien avancé, car les progrès que nous

avons faits dans les procédures générales ont déjà été diffusés partout au sein du SHOM, le processus de certification ayant été suivi de près par tous les cadres du Service et l'approche par processus ayant déjà été adoptée sous la forme d'une analyse fonctionnelle.

Le SHOM dispose aujourd'hui d'un tout nouvel outil pour progresser, même s'il comporte beaucoup de dispositifs anciens. Ce n'est cependant qu'un outil. L'important, ce sont les compétences et la motivation de tous les membres de notre service, qui seront encore plus efficaces après la refonte du système de management de la qualité. Autre facteur essentiel, l'amélioration de la communication au sein du service et avec nos partenaires externes. C'est là l'un des avantages de l'amélioration de la qualité : la communication relie des hommes et non des machines et, comme déjà signalé à plusieurs reprises dans cet article, c'est l'homme qui compte finalement le plus. ●

Cet article est paru en anglais dans la revue :  
*Hydro International*, volume 8, N° 8, October 2004.

## ABSTRACT

**ISO 9001 Quality Certification for SHOM**  
*The French Hydrographic Office (SHOM) has been recommended by COFRAC for certification ISO 9001 version 2000. The field of certification concerns all SHOM activities related to the safety of navigation, as listed in international conventions signed by France, notably that on the Safety Of the Life At Sea (SOLAS). This is an important mile-stone for SHOM, which has completely upgraded its quality management system. The multiplicity of activities and the range of their technical field, from the collection of nautical information to its distribution, including design and development, has led SHOM to define a particularly great number of processes (34). Safety of navigation does not suffer weak links and SHOM has since its inception developed a culture of rigour and traceability : this pre-existent culture helped in preparing the certification very fast considering the complexity of the domain. [www.shom.fr](http://www.shom.fr)*

# La catastrophe d'Asie du Sud Est observée par satellite

*Le tsunami qui a touché l'Asie du Sud Est le 26 décembre a été un des cataclysmes naturels des plus dévastateurs et des plus meurtriers des cent dernières années. Les moyens de télédétection spatiale ont été activés dans le cadre de la Charte Espace et Catastrophes Majeures pour fournir très rapidement un support cartographique aux équipes en partance ou présentes sur le terrain.*

### ■ mots clés

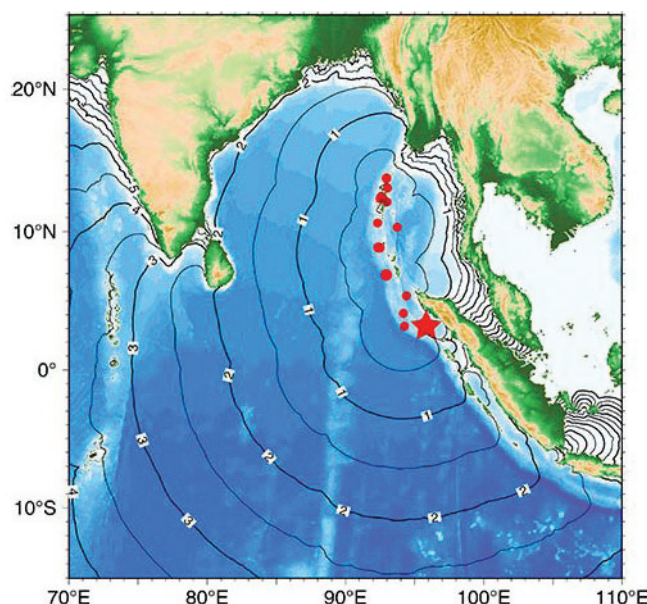
tsunami, satellite, SPOT 5, dégâts, cartographie rapide.

**L**e 26 décembre 2004, un séisme sous-marin d'une magnitude de 9 sur l'échelle de Richter secoue la partie Est du golfe du Bengale. Dès lors naît une vague gigantesque qui devait déferler quelques dizaines de minutes plus tard sur les côtes de l'île de Sumatra, en Thaïlande, puis atteindre au bout de quelques heures les côtes de l'Inde, du Sri Lanka, des Maldives, et enfin s'éteindre sur les côtes de Somalie (figure 1). La vague a pénétré de plusieurs kilomètres à l'intérieur des terres. Les dégâts colossaux générés en quelques minutes par ce tsunami s'étendent sur près de 6000 km de côtes.

Peu de temps après le cataclysme, les demandes d'activation de la Charte Internationale "Espace et Catastrophes Majeures" émanent du Ministère indien de l'Intérieur, de la Sécurité Civile française et des Nations Unies pour obtenir des informations cartographiques fiables sur les différentes côtes touchées. Les besoins d'évaluation de la situation sont immenses afin de pouvoir déployer au mieux les équipes de secouristes et l'aide humanitaire. Il s'agit alors de produire rapidement des cartes localisant les zones touchées, de tenter d'en évaluer l'intensité. Mais c'est aussi la cartographie de base qui fait parfois défaut car même lorsqu'elle existe, elle est souvent obsolète.

## La Charte Internationale Espace et Catastrophes Majeures

Issue de la conférence UNISPACE III de Vienne, en juillet 1999, la Charte Internationale "Espace et Catastrophes Majeures" est un accord entre plusieurs grandes agences spatiales : en premier lieu le CNES (*Centre National d'Etudes Spatiales*, France) et l'ESA (*European Space Agency*), rejoints ensuite par la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*, USA), la CSA (*Canadian Space Agency*, Canada), l'ISRO (*Indian Space Research Organisation*, Inde) et la CONAE (*Comisión Nacional de Actividades Espaciales*, Argentine). Cet accord prévoit l'activation de tous les systèmes d'observation disponibles (SPOT, ERS, Envisat, Radarsat, IRS, GOES...) sur une zone donnée et de mettre gratuitement les données à disposition des autorités compétentes, généralement le service de protection civile des



**Figure 1. Temps de parcours (en h) du Tsunami après la secousse initiale**

<http://staff.aist.go.jp/kenji.satake/Sumatra-E.html>

pays membres de la Charte ou le Bureau des Affaires Spatiales des Nations Unies (*United Nations Office for Outer Space Affairs*, UNOOSA) pour l'ensemble des services des Nations Unies. Chacune des agences spatiales assure à tour de rôle une astreinte afin de réceptionner les demandes et d'organiser les moyens d'acquisition, de traitement et de diffusion de l'information.

La Charte a été utilisée 79 fois (au 15 janvier 2005) depuis sa création. Sa sphère d'intervention couvre tous les risques naturels, comme les risques technologiques : inondations (Elbe, août 2002 ; Gard, septembre 2002 et sud Est de la France, décembre 2003 ; Haïti et la République dominicaine, en mai et septembre 2004 ; Philippines, décembre 2004), séismes (Alger, mai 2003 ; Bam, Iran, décembre 2003), éruption volcanique (Nyiragongo, 2002), marée noire (le Prestige, 2002)... Tous les éléments relatifs aux différentes occurrences d'activation de la Charte peuvent être retrouvés sur son site Internet (<http://www.disasterscharter.org>).



Le SERTIT développe depuis plusieurs années un service de cartographie rapide, fondé sur l'exploitation des données d'observation de la Terre, pour aider à la gestion des catastrophes naturelles. Ce développement de service est actuellement soutenu par l'ESA. Dans un même temps, le CNES a retenu pour trois ans le SERTIT en tant que prestataire de valeur ajoutée sur les données spatiales, pour les activations de la Charte qu'il est amené à gérer depuis janvier 2004. Les bénéfices induits par l'utilisation des moyens spatiaux pour de telles applications sont nombreux : couverture mondiale ; vision instantanée de vastes territoires ; répétitivité de l'observation ; indépendance aux conditions locales telles que la météorologie (dans le cas de l'utilisation des systèmes radar), l'état des infrastructures et des services ; réactivité et vitesse de diffusion d'une information formatée par une chaîne d'acquisition et de production dédiée et expérimentée.

## Actions de la Charte lors du tsunami en Asie

L'activation de la Charte par trois autorités différentes, sur trois zones géographiques distinctes (l'Inde pour l'ISRO, le Sri Lanka pour la Sécurité Civile française, la Thaïlande, l'Indonésie et les Maldives pour les Nations Unies) a donné lieu à un volume très important de programmations des systèmes d'observation de la Terre. Le SERTIT a été amené à trai-

## SERTIT

Le SERTIT est un centre de transfert de technologie et de valorisation de la recherche en télédétection appartenant à l'université Louis Pasteur de Strasbourg. Sa vocation est de produire de l'information consommable à partir de l'observation de la Terre par tous les systèmes spatiaux en utilisant les outils de la photogrammétrie, du traitement d'image, des SIG ainsi que les nouvelles techniques de l'information et de la communication. Soutenu par l'ESA, utilisé par le CNES, le SERTIT développe un service de cartographie rapide dédié à la fourniture d'information de crise sur les catastrophes naturelles fondé sur la donnée satellitaire.

ter les données pour le compte de la Sécurité Civile et des Nations Unies, sur le Sri Lanka et l'Indonésie.

Finalement, c'est une base de données de près de 70 Go qui a été constituée en une semaine et demie. Grâce à cette base, 88 produits cartographiques ont été mis à disposition des services de la Sécurité Civile française, présente sur le terrain, et des Nations Unies. Parmi ces produits, on peut notamment trouver :

- Des cartes de localisation à petite échelle (1/1 000 000) : relief, principaux axes de communication, villes principales...
- Des spatio-cartes obtenues par croisement de données cartographiques, d'imagerie satellitaires et de données altimétriques

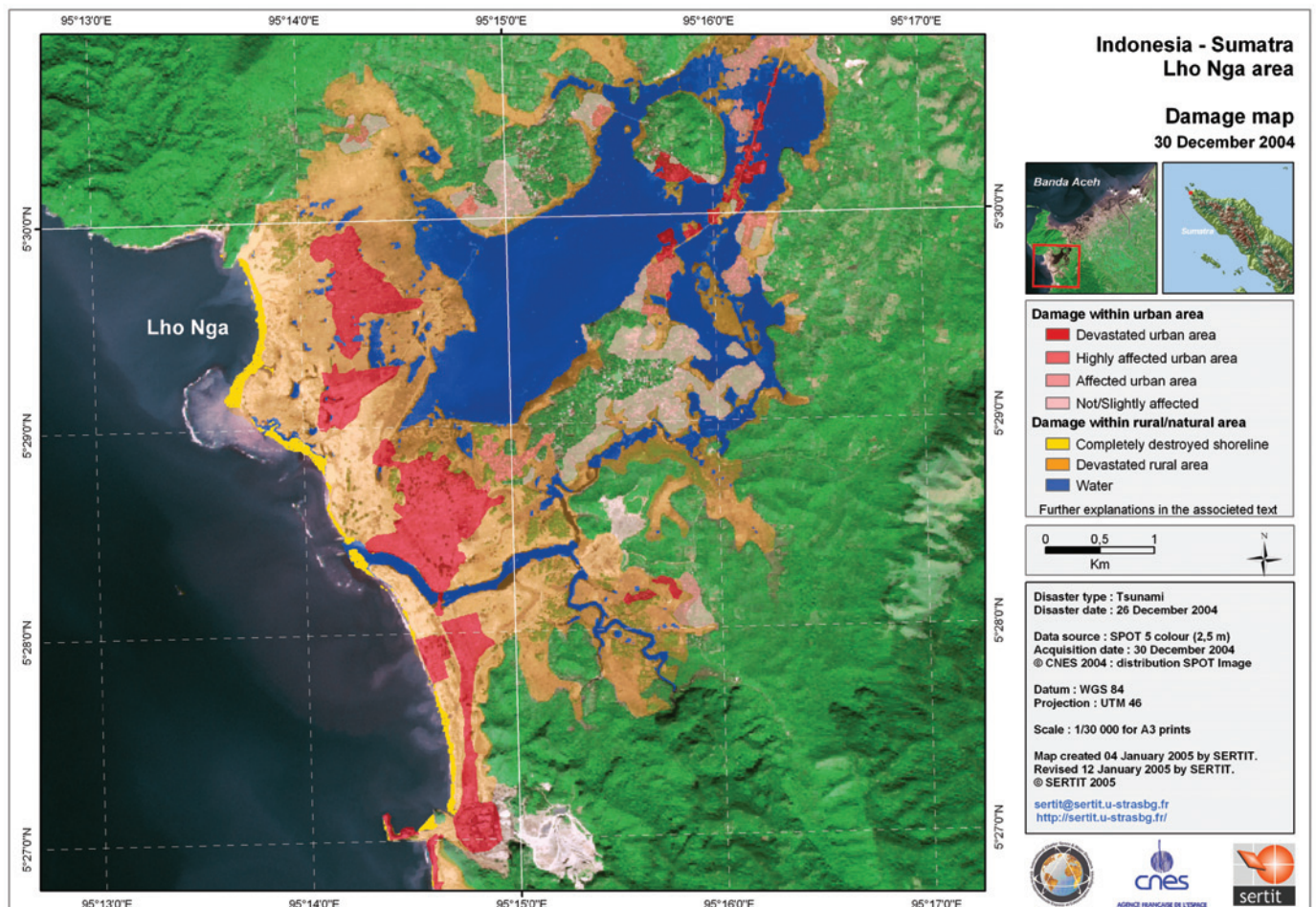


Figure 2. Carte de dégâts sur la zone de Banda Aceh - Lho Nga, au nord de Sumatra.



haute résolution présentant les zones de dégâts potentiels

- Des spatio-cartes (à base d'images satellitaires) à plus grande échelle (au 1/500 000) localisant les zones touchées par la vague
- Des spatio-cartes de détail (1/50 000 au 1/10 000) présentant une localisation fine des dégâts, résultante de l'interprétation des images

La comparaison d'images de référence (acquises avant l'événement) et de crise (acquises après) permet d'obtenir une appréciation de l'intensité et un zonage des dégâts. Deux séries de cartes ont été réalisées : sur le Sri Lanka d'une part et sur la pointe nord de Sumatra (Indonésie) d'autre part. Cette dernière région traitée englobe notamment les agglomérations durement touchées de Banda Aceh (environ 200 000 habitants) ou de Lho Nga (figure 2 et 3).

Les cartes de dégâts sont constituées d'une image de référence affichée en couleurs naturelles pour donner un effet réaliste, proche d'une photographie aérienne, et facilement compréhensible par le non-spécialiste. Cette image est drapée par un zonage de dégâts obtenu par photo-interprétation des couples d'images Avant-Après, aidée par l'analyse d'indices numériques composites, de données SPOT 5 Super Mode, à 2,5 m de résolution spatiale :

#### ■ Zone urbaine

- **Dévastée** : zone urbaine, de densité moyenne à forte, totalement détruite par le passage du tsunami : ces secteurs sont totalement rasés.

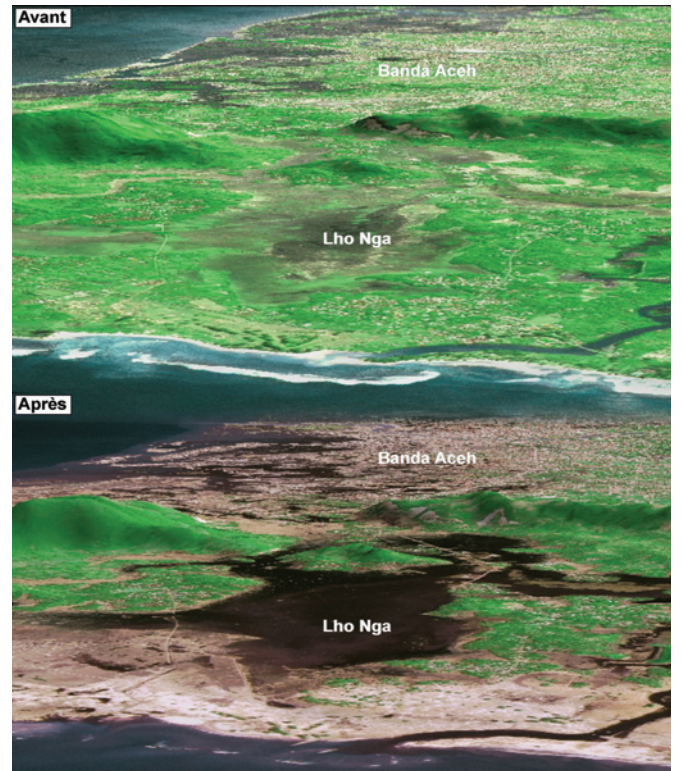


Figure 3. Vue 3D des dégâts sur Lho Nga à partir de données SPOT 5 à 2.5m

© SERTIT 2005

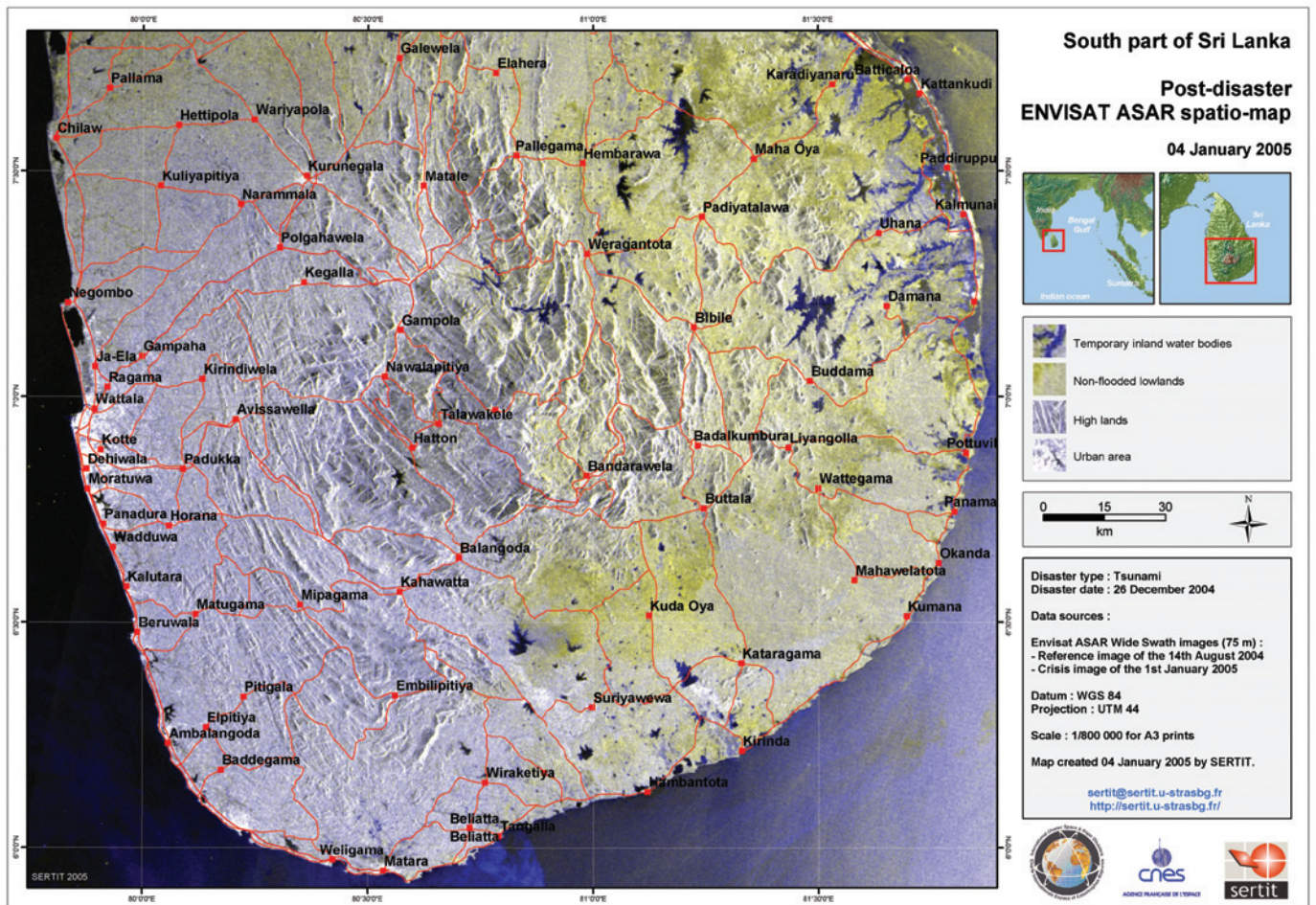


Figure 4. Carte post-crise du Sud du Sri Lanka réalisée à partir de données ENVISAT ASAR à moyenne résolution (75m).

- ■ ■ • **Fortement affectée** : zone urbaine, de densité moyenne à forte, fortement affectées par le passage du tsunami. De nombreux bâtiments sont détruits et/ou fortement endommagés, les espaces ouverts (rues, cours, parcs) sont recouverts de débris et de boue.
- **Affectée** : zone urbaine, de densité urbaine moyenne à forte, affectée par le passage du tsunami : peu de dégâts sur les bâtiments visibles sur les données d'observation de la terre SPOT 5, 2,5 m de résolution, mais encore beaucoup de traces du passage de l'eau, avec d'assez nombreux débris et boues dans les espaces ouverts.
- **Peu ou pas affectée** : zone urbaine, de densité moyenne à forte, pas ou peu affectées par le passage du tsunami. Pas de dégâts sur bâtiments visibles sur données d'observation de la terre SPOT 5, 2,5 m de résolution, mais quelques traces locales du passage de l'eau, présence de boue dans quelques espaces ouverts.

## ■ Cordon littoral détruit

Bande côtière anthropique ou non, disparue du paysage car totalement détruite par le passage du tsunami (figure 5).

## ■ Zone agricole et/ou Milieu naturel dévasté

Dévasté par le passage du tsunami, perte des structures liées aux pratiques agricoles. Décapage de la surface du sol, perte de la végétation, et/ou dépôt important de sédiments, de boues. Comprend également, dans la partie nord-est de la ville, des secteurs moins endommagés.

Il a également été possible, à partir des données THR SPOT 5, de localiser les infrastructures partiellement ou totalement détruites : ports, ponts, routes emportées etc. mais aussi celles demeurées intactes : aéroports, aérodromes.

Hormis les images des satellites optiques, des images radar des satellites Radarsat et Envisat ont également été exploitées sur le Sri Lanka. Un des avantages du satellite radar est de permettre l'acquisition d'images quelles que soient la couverture nuageuse ou les conditions d'ensoleillement constituant ainsi une capacité "tout temps" primordiale pour la gestion de crise. Ces deux satellites possèdent également un instrument radar de prise de vue orientable permettant une revisite plus fréquente. Le mode radar Wide Swath d'Envisat fournit des produits moyenne résolution : produits 150 m, à large couverture : 400 km x 400 km. Ces images permettent d'obtenir une vision globale et une première localisation des zones touchées par le tsunami. (figure 3)

## Conclusion

Lors de ce dramatique événement tellurique, la Charte est sollicitée simultanément trois fois. Le SERTIT est amené à assurer la production de valeur ajoutée sur deux activations et à couvrir le Sri Lanka et l'Indonésie. Sa mission est d'intégrer, d'interpréter et de présenter une information cartographique accessible à tous les utilisateurs opérationnels, des services de Sécurité Civile aux Organisations Non Gouvernementales. La mise en ligne sur les serveurs Internet du SERTIT permet une diffusion rapide de l'information. Très rapidement, des demandes plus spécifiques parviennent afin de concentrer l'attention des analystes sur des zones particulières ou fournir des compléments d'information aux décideurs qui réfléchissent déjà aux mesures de réparation à court et moyen terme, après l'urgence. Cette nouvelle expérience de la Charte montre que le maintien d'un service opérationnel de production d'information de crise nécessite de disposer constamment d'une équipe pluridisciplinaire, dotée de moyens de calculs matériels et logiciels mais aussi d'une plate forme de communication efficace. Le travail déjà réalisé par la Charte depuis sa création doit donc être poursuivi et renforcé, en impliquant toujours un peu plus tous les acteurs, du producteur de donnée à l'utilisateur final de l'information interprétée. ●

## Contact

Service Régional de Traitement d'Image et de Téledétection  
Pôle API - Bd Sébastien Brant - BP 10413  
67412 ILLKIRCH CEDEX  
Tél. 33 (0)3 90 24 46 47 - Fax 33 (0)3 90 24 46 46  
<http://sertit.u-strasbg.fr> - [sertit@sertit.u-strasbg.fr](mailto:sertit@sertit.u-strasbg.fr)

## ABSTRACT

**Key words :** tsunami, satellite, SPOT 5, rapid impact mapping.

*The tsunami that hit SE Asia on the 26th of December 2004 was one of the most damaging and deadliest of natural cataclysms of the last hundred years. In this context, space remote sensing resources were mobilised within the International Charter 'Space and Natural Disasters' to rapidly provide map based supports to teams going into or in the field.*

**Figure 5.** Vue 3D des dégâts dans la zone littorale de Banda Aceh à partir de données SPOT 5 à 2.5m



# Le relevé par scannage 3D du temple d'Opet à Karnak, Egypte

■ Bertrand CHAZALY - Emmanuel LAROZE

*L'essor de la topographie dans le domaine de l'archéologie est récent. Sur le terrain, l'usage quotidien du théodolite pour les relevés des fouilles ou les études architecturales est devenu indispensable. La technique du scannage 3D appliquée à l'archéologie était réservée, jusqu'à maintenant, à des opérations exceptionnelles et complexes dont la plus remarquable reste sans doute le relevé de la grotte Cosquer. En quelques années, le développement de cet outil performant et sa maîtrise par les équipes de topographes tend à démocratiser son usage notamment dans le secteur des études de patrimoine architectural. Une coopération entre la société ATM3D et le Centre Franco-Egyptien d'Étude des Temples de Karnak (CFEETK) a permis l'organisation d'une mission à la fin du mois de février 2004 pour le relevé d'un temple ptolémaïque à Karnak, dont l'étude est en cours.*

### ■ mots clés

Scannage 3D, scanner 3D, numérisation 3D, lasergrammétrie, photogrammétrie, orthophotographie, modélisation, étude architecturale, topographie, archéologie, temple, Egypte antique.

## Présentation du temple

Le site de Karnak constitue le cœur de l'antique capitale de l'Égypte ancienne, Thèbes (aujourd'hui Louqsor). Il se situe à environ 700 kilomètres au sud du Caire. Il est le centre religieux du pays dès le Moyen Empire (environ 2100 av. JC) et le restera pendant près de vingt siècles. Le site de Karnak est composé de trois sanctuaires. Le plus connu est celui consacré au dieu Amon, patron de la royauté égyptienne, dont le grand temple s'étend sur presque 400 mètres d'Ouest en Est (fig. 1).

Le temple d'Opet fait partie des nombreux bâtiments situés au sein de l'espace sacré de ce temple d'Amon que délimite une large enceinte de brique crue. Il est destiné à célébrer la naissance du dieu Osiris, engendré par la déesse Opet la Grande, forme particulière de la déesse du ciel Nout. Il se situe dans l'angle Sud-Ouest du sanctuaire et s'adosse à un temple plus important dédié à Khonsou, le fils du dieu Amon, avec lequel il partage

Temple  
d'Amon

Temple  
de Khonsou

Temple  
d'Opet



Fig. 1 : Le sanctuaire du Temple d'Amon



■ ■ ■ d'étroites relations d'un point de vue du fonctionnement du culte. Ce temple est l'une des réalisations les plus tardives à Karnak. Sa construction est entreprise à l'époque grecque, en 150 av. JC sur les vestiges d'un temple plus ancien, mais la décoration restera inachevée.

Aujourd'hui, dans cette partie du sanctuaire, la porte d'Evergète, les temples d'Opet et de Khonsou sont les derniers vestiges d'un ensemble culturel assez indépendant du grand temple d'Amon. Chacun des deux temples disposait d'une porte qui leur permettait d'avoir une relation privilégiée avec l'extérieur du sanctuaire. Le fonctionnement de cet ensemble et plus particulièrement celui du temple d'Opet demeure malheureusement assez mal connu.

Bien que l'étude épigraphique de ce temple ait déjà été réalisée, aucun relevé précis ni aucune étude architecturale n'a été entreprise sur ce bâtiment qui présente pourtant de grandes qualités constructives. C'est pourquoi, le CFEETK a entrepris son étude architecturale, dont la méthode se base sur un relevé précis pour tenter, entre autres, de mieux comprendre l'organisation et les techniques de mise en œuvre.

## Le contexte du temple

Dans le cas de ce projet, l'intégrité et l'échelle du bâtiment se sont rapidement imposées comme des conditions déterminantes pour le choix de la méthode de relevé par numérisation 3D. Le temple d'Opet couvre une surface limitée de 23 m par 45 m, et se prêtait bien au caractère expérimental du projet. Le CFEETK ne disposait pas de références sur l'application du scan-nage 3D au patrimoine antique, ni de temps suffisant pour se lancer dans un projet plus important.

Le contexte dégagé tout autour du temple fut un argument supplémentaire pour choisir cet outil : il était facile de procéder à un cheminement. L'accès à la toiture en surplomb du temple de Khonsou a également permis de procéder au levé de la couverture du temple d'Opet.

L'objectif initial était de réaliser une série d'orthophotographies des façades et des coupes à l'échelle du 1/50°. L'utilisation de la technologie de numérisation 3D et l'enregistrement photographique permettaient de plus la réalisation d'une véritable archive tridimensionnelle du monument, d'où des informations cartographiques et infographiques pourraient être extraites ultérieurement.

## La technique

Le scan-nage 3D révolutionne le domaine de l'acquisition de la géométrie d'objets ou de sites. Cette technologie s'appuie sur une nouvelle génération d'instruments de mesures utilisés dans les domaines de la topographie, de la modélisation architecturale, de l'infographie et de la métrologie industrielle.

Un scanner 3D est un appareil capable de mesurer et d'enregistrer plusieurs millions de points tridimensionnels en quelques minutes, à une précision de quelques millimètres, à une densité pouvant atteindre plusieurs points au centimètre.

On distingue pour l'instant trois types de scanner, selon :

- **la technologie d'acquisition** : stripe-light, triangulation, temps de vol
- **la portée du capteur** : de quelques mètres à plusieurs kilomètres
- **la précision** : du dixième de millimètre à quelques centimètres

Ils ont tous en commun la capacité d'acquérir rapidement un volume important de points 3D. Pour des applications topographiques terrestres, on citera les scanners Riegl, Trimble-Mensi, Leica-Cyrax, Optech et Callidus.

Le nuage de points tridimensionnels issu du scan-nage est inexploitable en



**Fig. 2 : Le scanner 3D Riegl LMS Z 420i.**



l'état. Il faut donc associer le capteur à un logiciel de traitement particulier. Ces logiciels utilisent les derniers développements informatiques en matière de gestion de données denses, de modélisation et de cartographie automatique. La majorité des fournisseurs de scanner couplent leurs matériels à des solutions logicielles spécifiques. Il existe aussi des solutions indépendantes, compatibles avec la majorité des capteurs disponibles sur le marché.

En matière d'acquisition et de traitement, la méthode de travail est radicalement différente de celle d'un levé topographique classique. On ne choisit pas a priori, c'est à dire au moment du levé, les données à cartographier. On relève "tout", dans la mesure où la densité fixée au moment de la numérisation est compatible avec l'échelle de restitution demandée et où l'on s'est assuré de la bonne couverture de l'objet (élimination des masques par multiplication des stations). C'est a posteriori que l'interprétation est faite, l'opérateur naviguant virtuellement dans le nuage de points pour choisir les éléments à restituer.

Le résultat du traitement aboutit selon les besoins à des exploitations cartographiques de haute précision (restitution filaire équivalente à une restitution photogrammétrique, vues en élévation, coupes, modèle numérique de terrain), à un modèle maillé tridimensionnel, véritable clone numérique exploitable en imagerie de synthèse (modélisation TQC ou "Tel Que Construit"), ou à des analyses géométriques plus fines (auscultation par comparaison de nuages de points).

Généralement cette technologie de pointe apporte :

- un volume d'information en 3D d'une extrême densité
- la visualisation en 3D in situ des données acquises
- une documentation révolutionnaire, un archivage 3D des monuments et sites scannés : les données acquises pourront être exploitées avec précision même si l'objet scanné venait à être endommagé ou détruit.
- une grande liberté d'exploitation des mesures : nul besoin de retourner sur le terrain pour de nouvelles mesures :



tout est acquis dans la limite d'une bonne accessibilité visuelle des objets à scanner.

- moins de contraintes au moment de l'acquisition : la saisie est très rapide et la portée importante, ce qui réduit considérablement les contraintes de sécurité et d'immobilisation inhérentes à ce type d'intervention sur certains lieux (site fréquenté, délai d'intervention).
- l'assurance de ne commettre aucun dommage sur le monument pendant le relevé : les mesures se font sans contact physique, à l'aide d'un laser de classe I (eye safety) ou II.
- la possibilité d'accéder virtuellement à des parties inaccessibles physiquement : les mesures au laser sans réflecteur peuvent être réalisées à plusieurs dizaines voire plusieurs centaines de mètres du monument.





■ ■ ■ A Karnak, ATM3D est intervenue avec le scanner Riegl Z420i (fig. 2). Il s'agit d'un scanner 3D terrestre photogrammétrique. La société l'a en effet équipé d'un appareil photographique numérique 6 millions de pixels, parfaitement calibré (distorsions, orientation externe), ce qui permet la mise en relation de n'importe quel point scanné avec son pixel correspondant dans la

## caractéristiques du scanner Riegl LMS Z420i configuré par ATM3D

- portée maxi 800m
- portée pratique constatée par ATM3D : 500 à 1000m selon l'incidence, le matériau et la couleur
- précision sur 1 point : 10 mm
- précision par interpolation : 5 mm
- champ horizontal : 360°
- champ vertical : 80°
- tête inclinable de 0 à 90°
- résolution angulaire maxi : 0.0025° (soit un point tous les 4 mm à 100m)
- résolution d'un point : 5mm
- vitesse d'acquisition : de 6500 à 10 000 points à la seconde
- information enregistrée pour chaque point acquis : coordonnées XYZ, couleurs RVB, intensité de réflexion
- capteur laser de classe 1
- capteur photographique 6 millions de pixels (interchangeable)
- Optiques calibrées : 14 mm, 85 mm, 180 mm

série de prises de vues qui couvre le champ numérisé (équipé d'un objectif de 14 mm, la couverture photographique d'un champ de 360° aboutit à l'enregistrement d'une image couleur de près de 40 millions de pixels).

Les caractéristiques du capteur 3D (voir encadré) ont permis une acquisition rapide et dense du temple et de son environnement topographique et architectural : l'appareil porte à plus de 800 m, à une précision brute de 10 mm. La réalisation d'une séquence de plusieurs scannages, ou le rééchantillonnage d'un ensemble dense de points, permet d'atteindre sans trop de difficulté une précision de 5 mm. Un nuage de 3 millions de points est acquis en 6 minutes à peine.

Contrairement à un tachéomètre, le scanner n'est pas calé lors de la mesure. La tête peut être inclinée jusqu'à 90°. Le recalage des semis de points s'appuie sur le relevé au tachéomètre de cibles réfléchissantes que le scanner détecte et numérise automatiquement. Ce calage géométrique, réalisé *in situ*, est finalement la phase la plus longue dans la chaîne d'acquisition.

## Les résultats

Une vingtaine de stations de scannage auront permis d'acquérir un nuage dense de 30 millions de points, couplés à des prises de vues numériques pour chaque position (fig. 3). Une autre couverture photographique réalisée avec

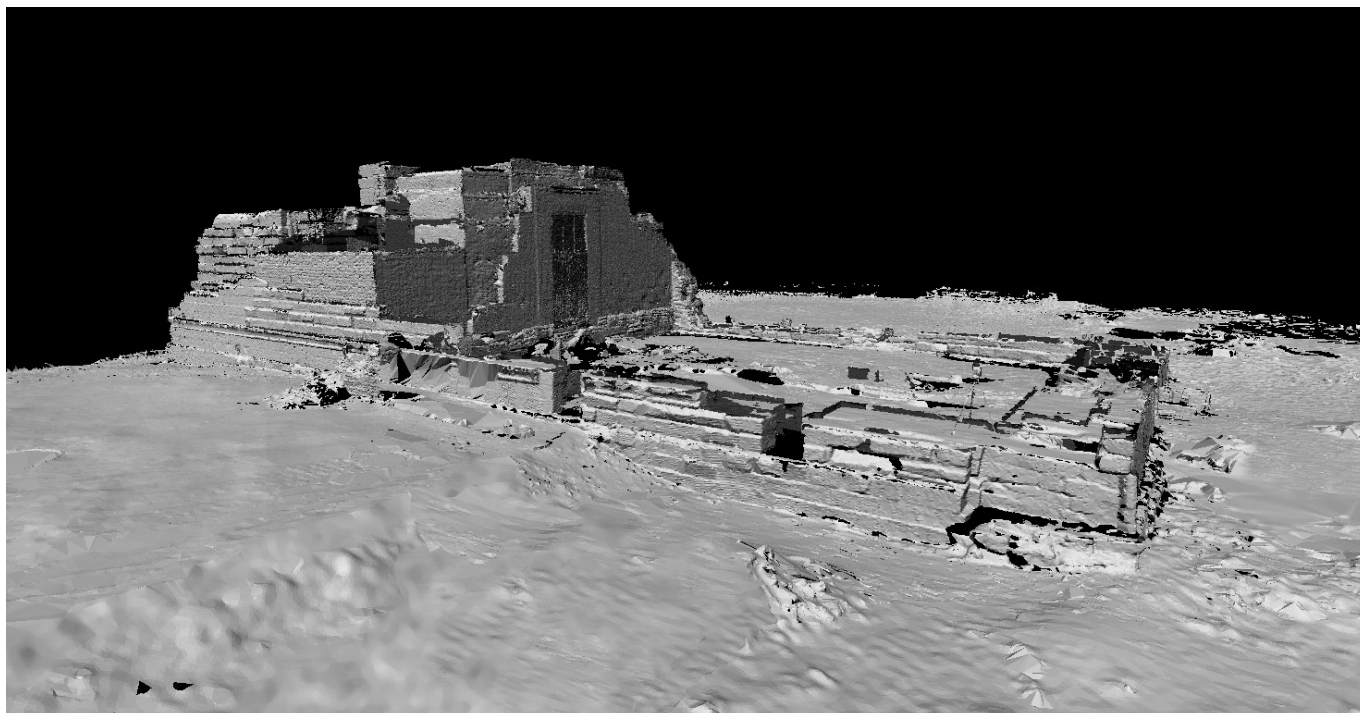
un objectif de 85 mm est venue compléter la première dans le détail, permettant l'enregistrement précis des bas-reliefs. L'ensemble des façades extérieures, la toiture et la salle hypostyle ont pu être relevés. Le travail à l'intérieur du bâtiment fut plus délicat : si les hiéroglyphes sont taillés "en creux" sur les parois extérieures, ils sont en relief, plus fins et colorés à l'intérieur du temple.

De plus, l'exiguïté des salles du temple a rendu difficile l'acquisition des points. Le manque de recul a pu être partiellement résolu par la multiplication des stations. Les "masques", comme les colonnes, corniches, portes se sont révélés plus nombreux qu'à l'extérieur.

L'assemblage des nuages de points a abouti à la production d'une première archive tridimensionnelle, un modèle maillé de précision centimétrique, couvrant 90 % des surfaces intérieures et extérieures du temple (fig. 4). Ce modèle 3D brut d'acquisition a d'abord rendu possible une véritable perception du temple en trois dimensions. Grâce aux outils de visualisation, on peut naviguer virtuellement autour et dans le temple de manière dynamique, s'arrêter sur des points de vues particuliers, zoomer. Bien que l'accès physique à l'intérieur du monument soit soumis à autorisation dans un souci de protection du patrimoine, il est désormais possible de naviguer librement dans le modèle numérique.



Fig. 3 : Extrait et détail du nuage de points 3D colorés acquis sur le temple



**Fig. 4 : Le modèle topographique 3D du temple et de son environnement immédiat**

Concernant l'exploitation cartographique du modèle, l'utilisation d'outils d'extraction automatique a permis de fournir des coupes dans les 3 axes (fig. 5). Ces résultats ont été livrés au format dxf pour être ensuite exploités par le CFEETK. Ultérieurement, des éléments cartographiques pourront être extraits selon les besoins, à partir de plans de coupe particuliers.

Pour chaque élévation, les prises de vues numériques complémentaires ont été réalisées au moment où l'incidence du soleil était rasante, ce qui a permis d'enregistrer des images riches en information épigraphique en évitant un contraste trop fort. Le traitement des mesures denses réalisées parallèlement au scanner a abouti à l'extraction de modèles numériques précis du relief de chaque élévation.

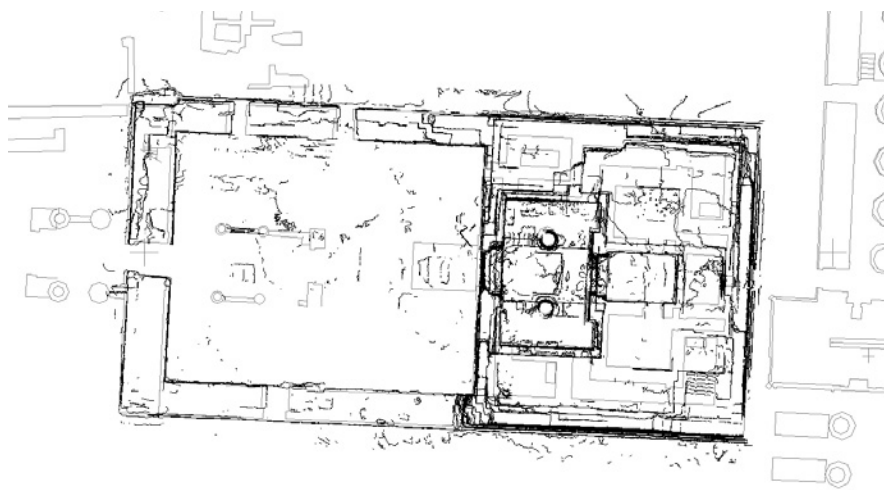
La solution d'orthorectification développée par ATM3D a associé chaque modèle aux prises de vues photographiques pour aboutir à une couverture orthophotographique au 1/50 en couleur des élévations extérieures du temple et des élévations intérieures de sa salle hypostyle (fig. 6). Enregistrés au format spécifique autocad, les documents contiennent chacun une image orthophotographique à l'échelle et calée en alti-

tude, à laquelle est superposée un calque contenant des courbes de niveau représentant le relief de l'élévation.

Ce format permet de superposer d'autres couches d'informations vectorielles. Il est par exemple possible de digitaliser les contours de chaque élément visible, de mesurer des distances ou des rayons de courbure et d'ajouter des commentaires. L'orthophotographie constitue alors un document de fond sur lequel l'architecte peut appuyer son étude. C'est aussi un document d'archive remarquable,

figeant précisément la géométrie et l'état du monument à l'instant de la prise de vues.

Les orthophotographies permettent aussi d'affiner le réalisme d'une modélisation infographique du monument. Le traitement du modèle 3D brut d'acquisition consiste à dégauchir les principales arêtes puis à alléger considérablement le maillage couvrant les surfaces relativement planes. Le but est d'obtenir un fichier le plus léger possible qui conserve un maximum de précision géométrique. La perte de précision graphique est compensée en utilisant les



**Fig. 5 : extraction de 52 coupes horizontales, à raison d'une coupe tous les 20 cm**





Fig. 6 : vue de l'élévation intérieure Nord de la Salle hypostyle et orthophotographie correspondante

orthophotos comme texture drapée sur chaque élévation. Le résultat est un modèle très réaliste exploitable en imagerie de synthèse pour des productions vidéos destinées au grand public.

## Les perspectives

Les performances et la rapidité d'acquisition de cette technologie de relevé entraîne de profonds changements dans la méthode d'analyse de l'étude architecturale.

Traditionnellement, c'est pendant le relevé dessiné qu'est menée l'étude proprement dite. Bien que longue et parfois fastidieuse, cette étape du travail impose une concentration et une attention qui assure une bonne observation du vestige. Désormais avec le scannage 3D, les étapes sont dissociées : le relevé devient plus objectif et se rapproche du document photographique. Si la méthode se généralise, l'analyse et l'observation minutieuse de l'architecte se feront désormais en aval, une fois le relevé réalisé.

D'autre part, la précision de cette technique permet de procéder en une seule étape au relevé architectural et épigraphique, où habituellement la discipline

égyptologique dissocie les deux types d'observation. Cet aspect fédérateur qu'apporte le scannage 3D photogrammétrique est une avancée déterminante dans l'observation des monuments de l'Égypte antique car elle permet de mettre en relation architecture et décors.

Ces changements dans l'acquisition des données et la méthode d'analyse impliqueront inévitablement une modification du regard sur les vestiges étudiés. Mais ces dernières remarques demeurent sans doute insignifiantes au vu des bouleversements qu'apportera l'usage généralisé du scannage 3D. ●

## Quelques liens Internet

<http://cipa.icomos.org> : le 6<sup>e</sup> groupe de travail du CIPA, Comité International pour la Documentation du Patrimoine Culturel (comité mixte ISPRS/Icomos), étudie les outils et méthodes d'acquisition par scannage 3D appliqués au Patrimoine Culturel.

<http://www.cfeetk.cnrs.fr> : le site internet du Centre Franco-Egyptien des Etudes des Temples de Karnak.

<http://www.atm3d.com/scan3d.htm> : quelques exemples de réalisation dans le domaine du Patrimoine Culturel.

## Contact

### Bertrand CHAZALY

Ingénieur Géomètre Topographe  
Société ATM3D - Savoie technolac  
House Boat n° 7 - BP 269  
73375 Le Bourget du Lac CEDEX  
Tél. : 04 79 25 11 73  
Mel : [contact@atm3d.com](mailto:contact@atm3d.com)  
Site internet : <http://www.atm3d.com>

### Emmanuel LAROZE

Architecte CNRS – CFEETK - Karnak  
Tél./fax : 0020 95 2376227  
Mel : [laroze@ifrance.com](mailto:laroze@ifrance.com)

## ABSTRACT

*The complete 3D scanning of the Opet temple in Karnak, Egypt was undertaken in February 2004, thanks to cooperation between the company ATM3D and the CFEETK. Over three days, the staff recorded more than 30 million 3D colored points. The exterior faces, the roof and the hypostyle hall were surveyed and photographed. The work with the 3D pointcloud has already enable to produce various graphics documents : digital plans, axonometric views, videos, orthophotos.*



# Résultats du Prix AFT 2004

*Le deuxième Prix AFT réservé aux jeunes ingénieurs diplômés en topographie vient d'être attribué. Les étudiants, ou plutôt les ex-étudiants, ont soumis un article de synthèse de leurs travaux de fin d'études. Chaque article a été relu par les membres du jury composé de deux représentants des écoles d'ingénieurs françaises (ESGT, ENSG, ESTP, INSA).*

*Sept candidats ont soumis un article. Nous publions dans ce numéro les trois articles primés et les résumés des travaux des autres postulants.*

*L'excellente qualité du travail réalisé par nos jeunes collègues est à souligner. Ils se sont investis dans des thèmes et des disciplines de haute technicité nous offrant un large éventail des domaines de la topographie.*

*Pour départager les candidats, les commentaires et les appréciations de chaque membre du jury ont été pris en compte ; les délibérations ont conduit le comité de rédaction de la revue XYZ au classement suivant :*

**Premier prix ex æquo** avec une dotation de 600 euros pour chaque candidat  
*Elise MEYER et Luc CHALAYE*

**Troisième prix** avec une dotation 300 euros  
*Anne KARSENTY*

*Toutes nos félicitations aux lauréats qui se verront remettre leur récompense le 17 mars prochain lors de la journée de l'AFT organisée à l'ENSG. Nous tenons à remercier les autres candidats pour leur participation : Séverine EBURDY, Nicolas KARPOFF, Nicolas JEAN et Jean-David MAILLEFAUD.*

*Le comité de rédaction encourage les futurs ingénieurs qui seront diplômés en 2005 à préparer activement leur contribution au troisième prix de l'AFT. Nous leur souhaitons un passionnant projet de fin d'études.*

*Emmanuel Natchitz.*

# L'AFT organise la 3<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 2005.*

### 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 2005 (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 2006 ;
- 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 2006.



#### ASSOCIATION FRANCAISE DETOPOGRAPHIE

(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  
E-mail : [info@aftopo.org](mailto:info@aftopo.org) - Internet : <http://www.aftopo.org>  
Secrétariat du lundi au vendredi de 9 heures à 17 heures

# La photogrammétrie pour le relevé épigraphique des colonnes de la salle hypostyle du temple de Karnak

■ Élise MEYER

*Le relevé épigraphique d'un temple est essentiel pour comprendre son fonctionnement et pour procéder à sa reconstitution. En effet, les hiéroglyphes forment un discours qui peut permettre de relier les blocs et fragments éparpillés de l'édifice. Il est nécessaire de pouvoir le réaliser aussi bien pour des murs que pour des éléments architecturaux plus complexes (colonnes, statues,...) et souvent inaccessibles. À l'heure actuelle, le relevé de l'épigraphie des temples égyptiens est effectué essentiellement à main levée sur un support papier. La plupart du temps il est réalisé uniquement sur des surfaces planes. L'étude présentée dans cet article propose une méthode permettant de relever par informatique des décors gravés sur des colonnes. Elle réalise l'adaptation et la programmation de formules de calcul générales de la photogrammétrie pour la reconstitution tridimensionnelle d'une colonne de la salle hypostyle du temple de Karnak et le relevé bidimensionnel de son épigraphie.*

## ■ mots clés

photogrammétrie  
architecturale, épigraphie,  
modélisation informatique,  
archéologie.

Cet article expose une méthode utilisant la photogrammétrie pour relever un décor pariétal gravé sur une surface non plane. L'étude réalisée a fait l'objet d'un Projet de Fin d'Études de l'INSA de Strasbourg. Elle s'inscrit dans le cadre de recherches menées conjointement par le GRCAO (Groupe de Recherche en Conception Assistée par Ordinateur) de l'Université de Montréal et le laboratoire MAP-PAGE (Photogrammétrie Architecturale et GEomatique) de l'INSA Strasbourg. Ces recherches portent sur un projet intitulé : "La modélisation informatique comme moyen de réflexion en archéologie : une approche nouvelle du relevé épigraphique et architectural appliquée au temple de Karnak." Le GRCAO en a été chargé par le Karnak Hypostyle Hall Project de l'Université de Memphis. Le contrat de collaboration signé entre les deux institutions permet au GRCAO de disposer de l'ensemble des données et matériels liés au projet de l'université américaine. Un des buts du projet est de relever les inscriptions des murs, mais aussi des 134 gigantesques colonnes de la Grande Salle Hypostyle. De plus, comme un des objectifs était notamment de pouvoir publier les textes hiéroglyphiques sous une forme papier, la méthode développée devait avoir un résultat bidimensionnel.

Ainsi, cette étude propose un moyen pour relever les décors pariétaux des colonnes dans un environnement bidimensionnel. Des outils informatiques ont donc été développés pour permettre aux épigraphistes de dessiner informatiquement des scènes et d'enregistrer leurs dessins avec leur signification, à des fins de manipulations ultérieures. La méthode mise au point est intéressante parce qu'elle se base uniquement sur une série de photographies de la surface de la colonne. Grâce au partenariat avec l'université de Memphis, elle a été testée au final sur une colonne de la Salle Hypostyle de Karnak.

Les outils de relevé ont été mis au point dans le logiciel AutoCAD, car il est universel, programmable et surtout accessible à tous. Le but des recherches effectuées étant de faire évoluer les méthodes de relevé épigraphique actuelles, il est nécessaire que les outils développés soient simples d'utilisation pour les épigraphistes à qui ils sont destinés.

La méthode de relevé épigraphique mise au point compte deux phases essentielles : la reconstitution tridimensionnelle d'une colonne, puis le développement de sa surface pour pouvoir y dessiner les signes hiéroglyphiques.

Cet article explique dans une première partie la construction d'un modèle filaire tridimensionnel de la colonne. Trois points sont à considérer : la stratégie d'acquisition des données, les données initiales de l'étude, et le tracé d'un cône théorique représentant la colonne.

La deuxième partie traite plus particulièrement du relevé épigraphique de la colonne. Elle se décompose aussi en trois phases : le développement du cône obtenu précédemment, l'orthorectification des photographies originales de la colonne, et enfin l'assemblage de ces orthophotographies pour pouvoir y dessiner les hiéroglyphes.

## Reconstitution tridimensionnelle d'une colonne

La modélisation en trois dimensions d'une partie du fût de la colonne est réalisée par photogrammétrie, à partir de photographies couvrant toute la surface considérée et de points d'appui bien répartis sur cette surface.

■ ■ ■



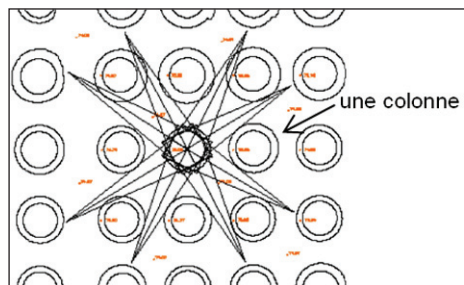
**Figure 1 :** Colonnes de la salle hypostyle du temple de Karnak.

## ■ Stratégie d'acquisition des données

Comme on peut le voir sur les photographies ci-dessus (Figure 1), la densité des colonnes dans la salle hypostyle est très importante. Le diamètre des colonnes mesure autant que l'espacement entre elles : les fûts ont plus ou moins 2,8 mètres de diamètre alors que l'espace entre les fûts varie entre 2,6 et 3 mètres.

Il en résulte une telle compacité qu'il est difficile de trouver l'espace et le recul nécessaire pour prendre les photographies.

On peut cependant couvrir la colonne par huit prises de vues (situation idéale, mais on en a souvent moins) et assurer ainsi une couverture et un chevauchement suffisant de sa surface (Figure 2).

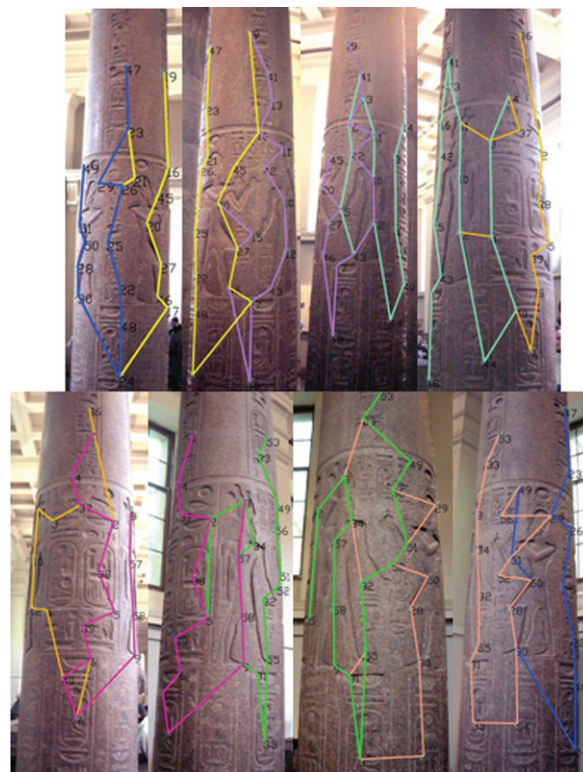


**Figure 2 :**  
Configuration  
idéale pour les  
prises de vues  
initiales.

Par contre, le recul maximal possible est de 8 à 9 mètres du centre de la colonne, soit 6.5 à 7.5 mètres de sa surface.

Étant donné la proportion de ces colonnes, la hauteur du fût est d'environ 12.5 mètres, ce qui représente "deux fois plus haut que loin". Il faut donc deux stations photographiques : une à 3 m pour couvrir de 0 à 6 m, et l'autre à 9 m pour couvrir de 6 à 12 m (plus justement deux fois huit stations pour toute la surface). Il reste que, près des murs de l'enceinte, le recul est encore réduit et il peut être nécessaire de prendre des clichés à trois niveaux. Ces contraintes sont imposées par le fait que l'on considère que les photographies vont être prises par l'épigraphiste lui-même avec le même appareil, sans changement d'objectif.

Le même problème se pose pour le levé topographique des points d'appui servant à la modélisation photogrammétrique. Ces points doivent être bien répartis sur toute la surface de la partie de colonne considérée et, l'espace étant restreint, il faut multiplier les stations topographiques. Cela demande du temps et des moyens matériels importants. Si on en dispose



**Figure 3 :** Photographies avec points homologues et polygones.

pas, il est toujours possible de créer un modèle indépendant de la colonne grâce au logiciel Photomodeler®. Ce modèle pourra ensuite être replacé "dans l'espace réel" grâce à trois points d'appui uniquement ou mis à l'échelle grâce à des mesures prises sur la colonne.

## ■ Données initiales de l'étude

Les seules données requises pour créer un modèle 3D d'une partie de la colonne sont donc huit clichés couvrant sa surface, et des points de calage bien répartis. Un minimum de six points homologues entre deux photos consécutives sont nécessaires, et trois points plus communs entre trois photos consécutives. Ces points sont cliqués sur les clichés dans Photomodeler® pour obtenir leur coordonnées 3D. Ils sont aussi placés sur les photos préalablement importées dans AutoCAD®, et reliés par des polygones pour une meilleure visualisation (Figure 3).

Le fichier des coordonnées tridimensionnelles des points, calculées par Photomodeler®, est aussi importé dans AutoCAD®. Un modèle filaire 3D de la colonne peut alors être réalisé.

## ■ Tracé d'un cône théorique à partir des points d'appui

La surface théorique des colonnes égyptiennes semble être celle d'un cône présentant un angle faible entre son axe et ses génératrices.

Pour mieux estimer la surface du fût de la colonne que l'on souhaite relever – et pour pouvoir ensuite développer cette surface (2<sup>e</sup> étape de l'étude) – une polygone 3D a été tracée sur la base de points remarquables décrivant géométriquement ce cône (sommet, centre de la base...).

Elle nous permettra, à partir des points d'appui, d'avoir une vision filaire de la surface de la colonne à modéliser.



Les paramètres de la portion de cône qui forme le fût de la colonne sont obtenus grâce à un "algorithme de calcul du cône moyen d'un nuage de points"<sup>1</sup>. Ces paramètres sont :

- les nombres directeurs de l'axe (a, b, c),
- un point de passage de l'axe (x, y, z),
- l'angle entre l'axe et une génératrice,
- la distance du point de passage à une génératrice.

On trouve une solution en modifiant de façon itérative les paramètres du cône, jusqu'à ce que la distance moyenne du nuage de points à la surface calculée du cône soit minimale.

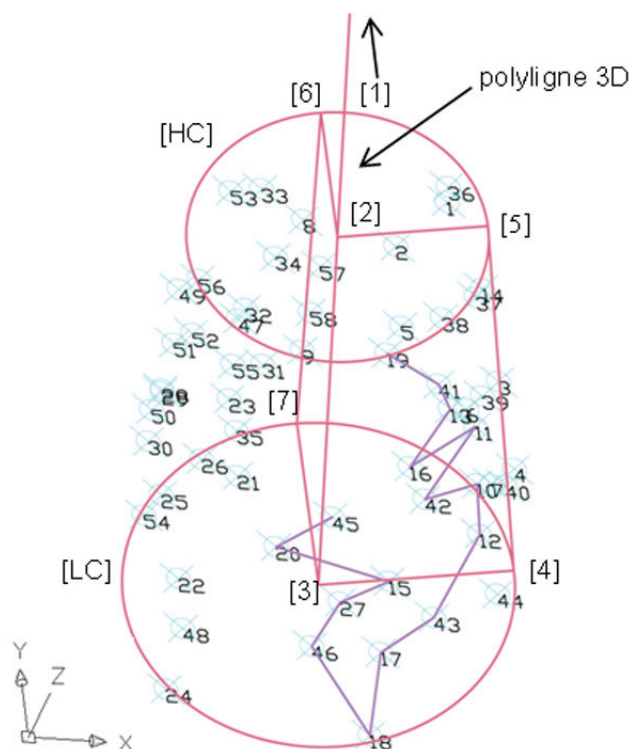
**Le cône est construit et mémorisé par les sept points suivants :**

- le sommet [1]
- le point d'intersection entre l'axe du cône et un plan qui lui est perpendiculaire passant par le point de contrôle le plus haut (représenté par le "cercle haut [HC]") [2]
- le point d'intersection entre l'axe du cône et un plan qui lui est perpendiculaire passant par le point de contrôle le plus bas (représenté par le "cercle bas [LC]") [3]
- le point d'intersection entre "l'axe (OX)" et le cercle [LC] [4]
- le point d'intersection entre "l'axe (OX)" et le cercle [HC] [5]
- le point d'intersection entre "l'axe (OY)" et le cercle [HC] [6]
- le point d'intersection entre "l'axe (OY)" et le cercle [LC] [7]

Il est à noter que la recherche du meilleur cône passant par un nuage de points peut mener à un cône dont l'axe n'est pas nécessairement vertical, puisque la colonne peut avoir subi un léger affaissement ou inclinaison au cours du temps.

Le dessin suivant représente les points calculés dans Photomodeler® et la polygline 3D représentant le cône moyen de ces points (Figure 4).

(1) Shakarji, Craig M., [1998], Least-Squares Fitting Algorithms of the NIST Algorithm Testing System, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, Vol. 103, No. 6., november-december.



**Figure 4 :** Cône théorique dessiné à partir des points 3D.

Pour une meilleure visualisation en 3D, une des polyglines joignant les points communs entre deux photos a également été tracée. Grâce à cette représentation vectorielle de la colonne, il nous est désormais possible de développer la polygline précédente dans un plan, pour pouvoir y tracer l'épigraphie dans un environnement 2D.

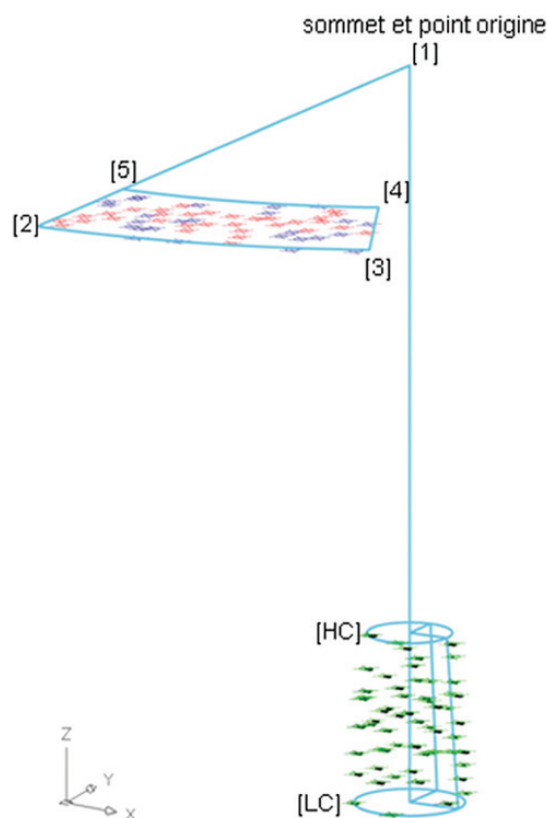
## Relevé épigraphique de la colonne

Afin de pouvoir restituer les hiéroglyphes de la colonne de manière fidèle (dessin à l'aide de courbes de Bézier), l'idée est de transformer cette surface conique en une surface plane. Ainsi, le relevé épigraphique des colonnes va pouvoir être assimilé au relevé des murs (ou autres surfaces planes). Des fonctions de dessin de hiéroglyphes, qui avaient déjà été développées par le GRCAO avant le début de cette étude, vont ainsi pouvoir être réutilisées également pour le relevé des surfaces coniques.

### ■ Développement du cône

Avant de pouvoir "aplatir" la surface de la colonne, il faut redresser le cône trouvé à partir des points d'appui. En effet, on se rappelle que le meilleur cône approximant le nuage de points n'est pas nécessairement vertical. Or, pour la simplicité des calculs de développement, il est plus simple de travailler sur un cône dont l'axe est vertical.

Un changement de repère a été calculé : il permet de déplacer le sommet du cône au point de coordonnées (0,0,0) et de



**Figure 5 :** Lien entre le modèle 3D et le développement du cône.

- rendre l'axe du cône parfaitement vertical. Le passage d'un système de coordonnées à un autre est possible à partir de quatre points homologues (non coplanaires) connus dans chaque système.

Ces quatre points sont choisis parmi les points de la polyligne décrivant le cône. Sachant que l'on souhaite amener le sommet à l'origine, les coordonnées de trois autres points dans le nouveau système se déduisent facilement.

Une matrice de transformation est calculée pour permettre le passage de tous les points du cône d'un système à l'autre. Les points d'appui sont replacés exactement "sur" la surface (théorique) du cône redressé par projection orthogonale. Le cône vertical peut alors être développé, c'est-à-dire que l'on va placer les points de la polyligne 3D dans un même plan.

**Ainsi, la colonne peut aussi être décrite par le développement de sa surface soit :**

- le sommet [1]
- la génératrice passant par le point d'intersection entre (OX) et le cercle [LC] (voir plus haut) [1-2]
- l'arc décrivant le développement de la circonférence du cercle, intersection entre [LC] et la surface du cône [2-3]
- la génératrice représentant la fin du déroulement [3-4]
- l'arc décrivant le développement de la circonférence du cercle, intersection entre [HC] et la surface du cône [4-5]

Soit un total de cinq points en plan (Figure 5).

Les points d'appui, qui avaient été projetés précédemment sur la surface du cône, sont également replacés sur le développement.

La méthode de calcul des coordonnées (X,Y) des points d'appui sur le développement est la même que pour les points de la polyligne (matrice de rotation). Leur coordonnée Z provient de la distance entre le point réel et le point projeté, qui est reproduite à la verticale de la surface développée.

Pour pouvoir dessiner les inscriptions hiéroglyphiques, il est désormais nécessaire d'orthorectifier les photographies originales de la colonne et de les insérer dans le développement.

## ■ Orthorectification des photographies

Pour placer les clichés "dans" le développement, il faut les transformer en orthophotographies. Les parties des photographies où apparaît le fût de la colonne vont être redressées, pour en avoir une "vue de face" sur laquelle l'épigraphie pourra être relevée en plan.

**Le processus se fait en plusieurs phases :**

- la première consiste à tracer sur la photographie de départ les bords du fût de la colonne (génératrices) et à générer leurs homologues sur le développement, de sorte à avoir les limites de l'orthophotographie à construire,
- la seconde réalise le transfert des "valeurs de couleur" des pixels de la photographie originale au développement.

Une nouvelle image est alors créée, à partir de l'assemblage de ces pixels, dans les limites tracées précédemment.

Pour obtenir les limites des sept photographies à construire sur le développement du cône, on utilise une fonction de "ré-enveloppement" permettant le passage de points du développement à la photographie originale.

**Les étapes sont les suivantes :**

- sur le développement, création d'un point et de la génératrice du cône passant par ce point,
- placement de ce point et de la génératrice sur le cône redressé : ceci se fait par changement de repère grâce à la polyligne décrivant le développement et à celle décrivant le cône normalisé,
- application des équations de la DLT inversées (passage "3D → photo") aux coordonnées-objets du point considéré (sur le cône redressé) et des deux points extrêmes de la génératrice, pour les replacer sur la photographie originale et tracer ensuite la génératrice.

Les équations de la DLT sont initialisées (calcul des coefficients de la transformation) en cliquant une polyligne reliant les points d'appui homologues entre une photographie et l'espace 3D du cône redressé.

La procédure d'enveloppement a été faite de sorte que l'on puisse voir "en temps réel" – simultanément aux mouvements de la souris – le déplacement du point choisi et de sa génératrice, en même temps sur le développement, le cône 3D redressé et la photographie.

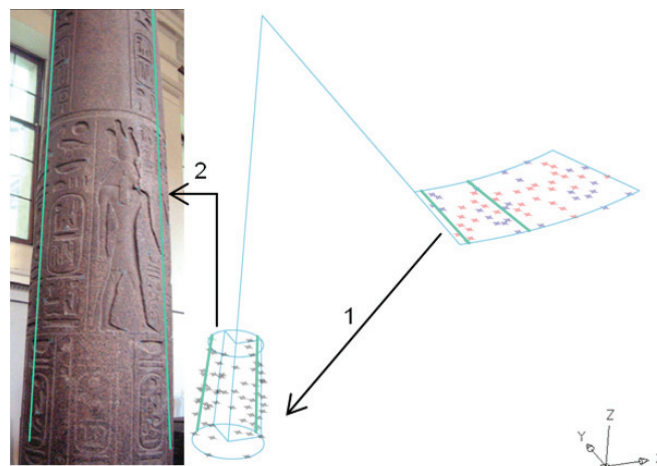
Il est désormais possible de créer sur le développement les génératrices représentant les limites du fût de la colonne. Elles sont tracées en déplaçant la souris sur le développement et en contrôlant notre position sur la photographie originale (Figure 6).

Les photographies redressées sont ensuite générées de manière similaire, en appliquant la procédure de "ré-enveloppement" à toutes les positions (sur le développement) des pixels de l'image à générer dans les limites tracées précédemment.

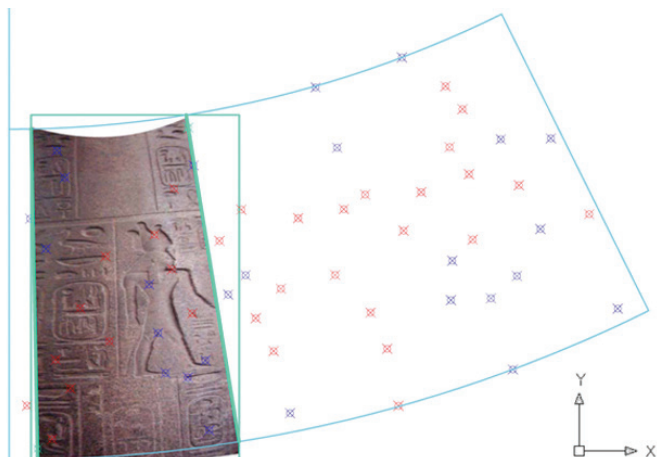
Les pixels de la photographie originale correspondant à ces positions sont alors recherchés et leurs "valeurs de couleur" sont transférées dans le développement.

L'orthophotographie est alors créée en "assemblant" tous les pixels ainsi définis (Figure 7).

Il est possible de vérifier la position de l'orthophotographie créée grâce aux points d'appui, qui se retrouvent à la fois sur le cliché original et sur la photographie redressée.



**Figure 6 : Tracé sur le développement des limites de l'orthophotographie à construire.**



**Figure 7 :** Vue de face du développement avec une photographie orthorectifiée.

### ■ Assemblage des orthophotographies et dessin de l'épigraphie

Après avoir redressé tous les clichés, on peut en faire une seule image, sur laquelle toutes les inscriptions de la partie de colonne traitée pourront être dessinées.

L'assemblage des orthophotographies peut s'avérer délicat, car il faut impérativement respecter les positions exactes de différentes orthophotos les unes par rapport aux autres, ainsi que leurs échelles. De plus, il peut y avoir de grandes différences de luminosité entre les clichés (voir Figure 3), ce qui implique un traitement d'image ultérieur pour obtenir une image homogène de toute la surface de la colonne. Ce problème peut être évité en prenant les photos dans de bonnes conditions d'exposition (à différentes périodes de la journée).

L'assemblage des photos a été réalisé malgré tout, ce qui permet d'obtenir une "photographie" de la surface développée du fût de la colonne. L'image suivante est donc une surface plane sur laquelle les hiéroglyphes peuvent être dessinés (Figure 8).

Les signes hiéroglyphiques sont tracés sur la mosaïque d'images à l'aide de fonctions de construction en interactif de



**Figure 8 :** Mosaïque des orthophotos de la "colonne test" et dessin de quelques hiéroglyphes.



**Figure 9 :** Relevé épigraphique sur la surface développée d'une colonne de la salle hypostyle du temple de Karnak.

courbes de Bézier. Des procédures ont été développées pour que ces courbes soient modifiables à volonté, afin de les adapter au mieux au signe à dessiner.

Elles peuvent aussi être groupées puis enregistrées comme un "signe-type", qui peut ensuite être réinséré à un endroit particulier pour éviter de redessiner plusieurs fois le même signe. Chaque occurrence particulière d'un signe peut elle aussi être enregistrée avec sa position exacte sur la photographie.

À terme, ceci permettra de constituer une base de données de signes-types, qui sera manipulable et interrogeable, comme toute autre base de données. Le relevé épigraphique total d'un mur ou d'une colonne pourra alors être réalisé très rapidement et des fichiers plus pérennes des textes des temples égyptiens pourront être constitués. La publication de l'épigraphie d'un monument pourra toujours être faite sous forme papier (relevé 2D), mais désormais aussi de manière numérique.

De plus, la méthode développée par le GRCAO réunit la saisie du sens et de la forme particulière de chaque occurrence de signe. Ceci permettra de réaliser des études statistiques sur la forme des hiéroglyphes, de traduire automatiquement des textes ou de rechercher des éléments manquants, autant sur des critères géométriques que grammaticaux.

La méthode présentée dans cet article pour le relevé épigraphique de surfaces coniques (ou cylindriques) a été mise au point sur la base de photographies d'une colonne du British Museum (Red granite column with palm capital, 19<sup>th</sup> Dynasty, about 1250 BC, from Heracleopolis), parce qu'elle est de taille moyenne et que ses inscriptions hiéroglyphiques sont bien préservées. Elle a ensuite été appliquée sur une colonne de la Grande Salle Hypostyle du Temple de Karnak, pour laquelle nous disposons de sept photos en noir et blanc. Cette colonne est beaucoup plus grande que la précédente (2,8 m de diamètre et 13,2 m de haut), c'est pourquoi le développement de sa surface à l'air d'être rectangulaire. Quelques signes hiéroglyphiques y ont aussi été tracés (Figure 9).



## ■ ■ ■ Conclusion

Cet article présente une méthode de relevé épigraphique pour tous les éléments coniques et cylindriques des temples égyptiens notamment (mais elle peut être adaptée pour d'autres types d'inscriptions également). Un des buts du projet étant de publier les textes hiéroglyphiques et l'iconographie, le résultat est bidimensionnel. En conséquence, l'aspect tridimensionnel des colonnes est perdu. Mais sachant que les inscriptions de tous les monuments se dégradent très vite de nos jours, il était primordial de concevoir pour les archéologues du Karnak Hypostyle Hall Project, une méthode simple et rapide pour le relevé et la publication des textes de la Salle Hypostyle de Karnak. Cette étude a donc été menée dans ce sens. Les outils informatiques développés sont simples d'utilisation pour les épigraphistes sur le terrain, avec un équipement informatique minimal.

Le but ultime des recherches menées par le GRCAO est de concevoir un assistant informatique pour valider les hypothèses de reconstitution en archéologie, qui va intégrer les nouveaux outils développés ici. C'est un bon exemple de l'utilisation de la modélisation informatique dans les domaines de la conservation du patrimoine et de la reconstitution architecturale en archéologie.

Ce projet a été réalisé grâce au soutien du Conseil de Recherches en Sciences Humaines du Canada (CRSH). ●

## Bibliographie

### Références de livres

Karara, H. M., [1989], Non-topographic Photogrammetry, 2nd edition. Sciences and Engineering Series, Falls Church, Virginia. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. ISBN 0-944-42610-7, 445 p.

Kraus, K., Jansa, J., Kager H., [1997], Photogrammetry. Advanced Methods and Applications, vol. 2, 4th edition. Dümmler, Bonn. Translated by Peter Stewardson. ISBN 3-427-78694-3, 466 p.

Kraus, K., Waldhäusl, P., [1998], Manuel de Photogrammétrie. Principes et procédés fondamentaux, vol.1. Éditions Hermès, Paris. Translated by Pierre Grussenmeyer and Olivier Reis, Mayenne. ISBN 2-86601-656-4, 407 p.

### Autres références

Parisel, C., [2002], Stratégie informatique: programme relevé, rapport de travail interne au GRCAO, mars, 17 p.

Parisel, C., [2003], Rapport de travail sur le relevé des colonnes et de l'épigraphie sur les colonnes, rapport de travail interne au GRCAO, janvier, 6 p.

## Contact

### Élise MEYER

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

## Curriculum Vitae

### Élise MEYER

Classe préparatoire intégrée à l'ENSAIS, puis intégration de la filière Topographie. Trois ans de formation pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur Géomètre-Topographe de l'INSA de Strasbourg (changement de statut de l'école en 2003) en septembre 2003.

En parallèle avec la 3<sup>e</sup> année de formation d'ingénieur, DEA Modélisation et Simulation des Espaces Bâties de l'École d'Architecture de Nancy. Obtention du diplôme en octobre 2003.

Projet de Fin d'Étude à l'INSA Strasbourg (confondu avec le stage de DEA) réalisé au sein du laboratoire MAP-PAGE de l'INSA Strasbourg, sous la direction de Pierre Grussenmeyer, en partenariat avec le GRCAO de l'Université de Montréal (collaboration entre les 2 laboratoires). Intitulé exact du projet de fin d'études/stage de DEA : "Modélisation Photogrammétrique de l'épigraphie des colonnes de la salle hypostyle du temple de Karnak".

Désormais étudiante au Doctorat Modélisation et Simulation des Espaces Bâties, rattachée au laboratoire MAP-CRAI de Nancy, basée au MAP-PAGE à l'INSA Strasbourg (directeurs de thèse : P. Grussenmeyer et J-P. Perrin).  
Sujet : "Acquisition tridimensionnelle, Restitution et Imagerie en Archéologie : vers une plate-forme liant informatique graphique et données patrimoniales."

## ABSTRACT

**Key words :** architectural photogrammetry, epigraphy, data processing modelling, archaeology

*Epigraphic surveying of Egyptian temples is essential to understand and to reconstitute these ancient monuments. Since hieroglyphic engravings describe the nature of the rituals that took place in the temple, they are key elements enabling scattered blocks to be put back in their original place. It is important to be able to make this survey on walls as much as on more complex architectural elements (columns, statues, and so on). Nowadays, these surveys are still for the most part carried out in a traditional handmade fashion, and only on plane surfaces. The following paper presents a method to make a computerized epigraphic survey of inscriptions engraved on columns. It carries out the adjustment and the programming of photogrammetry general formulas, in order to reconstitute in three dimensions a column of the Great Hypostyle Hall of Karnak Temple and to achieve a two-dimensional surveying of its epigraphy.*

# Utilisation du GPRS pour le RTK

■ Luc CHALAYE

*Un Travail de Fin d'Etudes proposé au sein de l'ESGT a été réalisé afin de connaître l'intérêt du GPRS pour le RTK. Ce stage a d'abord nécessité l'installation de composants pour pouvoir utiliser cette technologie avec la station permanente du Mans puisque aucune solution globale n'est commercialisée par les constructeurs de récepteurs GPS en France. Une installation spécifique doit se faire également au niveau du récepteur mobile. Le GPRS a ensuite été comparé au GSM en afin de connaître ses performance pour le RTK, notamment en ce qui concerne la précision du positionnement. Enfin, une étude financière a permis d'aborder l'intérêt économique du GPRS.*

## ■ mots clés

GPS - RTK - GPRS - format RTCM - modems - latence - protocoles TCP/IP - internet

**L**e RTK (RealTime Kinematic) est une stratégie d'observation GPS qui permet d'obtenir en temps réel des coordonnées avec une précision centimétrique. Pour ce faire, deux récepteurs GPS sont utilisés :

- La référence, située sur un point connu en coordonnées, envoie au deuxième récepteur les observations qu'elle réalise,
- Le récepteur mobile reçoit ces observations à partir desquelles il calcule les corrections à apporter à ses propres observations pour obtenir une précision centimétrique.

Cette technique permet de compenser les erreurs dues à la traversée de la ionosphère, de la troposphère et aux erreurs d'orbite. Ces erreurs dépendent des lieux où l'on se trouve. La station de référence et le récepteur mobile doivent donc se trouver à une distance assez courte (moins de 15 km) pour que les conditions présentes à la station de référence soient quasi-identiques à celles du récepteur mobile afin d'obtenir une précision centimétrique.

Pour pouvoir réaliser des mesures en RTK, les utilisateurs de GPS disposent aujourd'hui de deux modes de transmission pour permettre l'échange de données entre la station de référence et le récepteur mobile (cf. Figure 1) :

- La radio, dont la portée est faible (moins de 10 km) mais qui n'impose pas de coût de communication,
- Le GSM, dont les coûts de communication sont élevés, mais qui n'a pas de limite spatiale, si ce n'est la couverture du réseau et la validité des corrections différentielles entre les deux récepteurs GPS.

L'émergence de nouvelles technologies de type internet mobile telles que le Wifi et le GPRS peut apporter de nouvelles possibilités. Cependant, il paraît déjà clair que la technologie Wifi, dont la portée est encore plus faible que la radio (quelques centaines de mètres), semble peu intéressante. Par contre, le GPRS, disponible dans toute la couverture du réseau GSM, pourrait être une alternative au GSM.

Le GPRS (General Packet Radio Service) est un mode de transmission de données par paquets. Il s'agit d'une extension du réseau GSM nécessitant seulement quelques ajouts au niveau des stations de base GSM. Par conséquent, le GPRS est accessible dans toute la couverture GSM, et ce pour les

trois opérateurs de téléphonie mobile français. Il permet à un utilisateur de se connecter directement à internet. Cela se fait dès la connexion de l'utilisateur au réseau de son opérateur GPRS, qui lui attribue alors une adresse IP dynamique (qui change à chaque connexion), comme le fait un fournisseur d'accès lorsque l'on se connecte à internet à l'aide d'un modem classique. Par GPRS, on récupère les données en se connectant à une adresse IP et non en composant un numéro de téléphone comme pour le GSM.

Le mode de facturation est également différent de celui du GSM. En effet, pour le GPRS, les opérateurs se basent sur la taille de données échangées et non sur le temps de communication. Enfin, un autre avantage du GPRS par rapport au GSM est le débit qu'il propose pour la réception des données. En émission des données, la plupart des mobiles GPRS proposent le même débit que le GSM. Le débit théorique en réception des données est de 171,2 kilobits par seconde (kbps) mais, en réalité, la plupart des mobiles permet un débit en réception des données compris entre 36 et 53,6 kbps, ce qui reste 3 à 5 fois plus rapide que celui du GSM (9,6 kbps).

Afin d'étudier cette nouvelle technologie, l'ESGT a proposé un Travail de Fin d'Etudes sur le sujet. Celui-ci se décompose en trois parties distinctes :

- Installer les composants permettant d'utiliser le GPRS pour le RTK sur la station permanente du Mans (intégrée au RGP),
  - Evaluer les performances du GPRS en réalisant des tests portant sur divers paramètres (effets de la latence, de la distance),
  - Evaluer l'intérêt économique du GPRS par rapport au GSM.
- Avant de décrire l'installation sur la station du Mans, intéressons-nous à cette technologie.

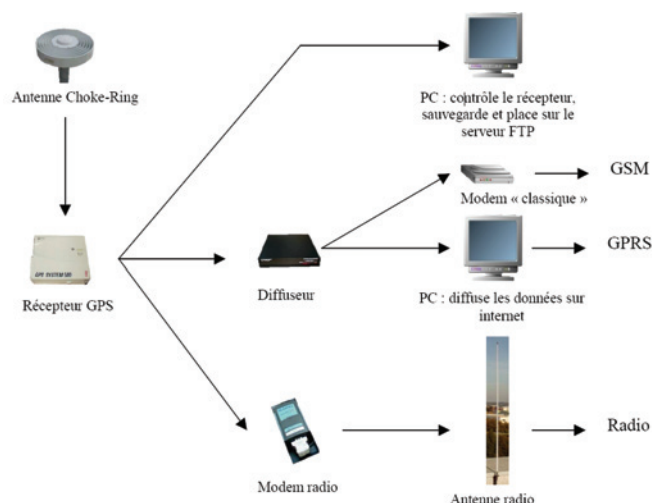
## Installation du GPRS pour le RTK

Pour pouvoir utiliser le GPRS pour le RTK, il faut mettre en place deux composantes différentes :

- Une composante "serveur", au niveau de la station de référence, qui met les messages RTCM à disposition sur internet,
- Une composante "client", au niveau du récepteur GPS mobile, qui reçoit ces données, les transmet au récepteur mobile et lui permet de les traiter.

■ ■ ■





**Figure 1 : La diffusion des données par la station permanente du Mans**

### ■ La station de référence

La configuration de la station permanente du Mans est décrite dans la Figure 1.

Pour le GPRS, le récepteur GPS utilisé comme station de référence réalise des observations et les transmet à un ordinateur au format RTCM. La station permanente du Mans envoie plus particulièrement les messages de type 3, 22 qui contiennent les coordonnées submillimétriques de la station de référence et les messages de type 18, 19 qui contiennent les observations brutes de la station respectivement sur la phase et le code. Ces messages sont réceptionnés sur un port série de l'ordinateur qui va agir comme serveur (cf. Figure 1). Il faut ensuite installer un logiciel pour récupérer les données arrivant sur le port série et les transmettre sur internet. Nous avons utilisé le logiciel Comfoolery qui utilise le protocole TCP et qui est disponible gratuitement sur internet. Un logiciel utilisant le protocole UDP pourrait être également utilisé, mais nous n'avons trouvé aucun logiciel gratuit sur internet pour ce protocole. Les protocoles TCP et UDP font partie de la couche "transport" de la famille de protocoles TCP/IP. Le protocole TCP permet d'établir une véritable négociation entre le serveur et le client. En effet, le serveur envoie des messages et attend d'avoir la confirmation de la bonne réception de ces messages de la part du client avant d'envoyer la suite des données. Ainsi, avec ce protocole, toutes les données envoyées sont reçues, et ce dans le bon ordre. Avec le protocole UDP, les données sont envoyées sans aucune garantie de réception de la part du client si bien qu'il peut y avoir des pertes et des messages qui n'arrivent pas dans le bon ordre. Toutefois, puisque aucune attente n'est nécessaire, le transfert des données grâce à ce protocole se fait plus rapidement qu'avec le protocole TCP. Le plus intéressant pour le RTK est de disposer des données le plus rapidement possible, même si elles risquent d'être perdues (à condition que le taux de pertes reste acceptable). Le protocole UDP semble être le mieux adapté aux besoins du RTK et il est donc dommage de ne disposer que d'un logiciel utilisant le protocole TCP.

Le PC jouant le rôle de serveur doit avoir un accès permanent à internet et son adresse IP doit être fixe et connue. Le port TCP

**Figure 2 : Interactions entre utilisateur, récepteur GPS et modem GPRS**

sur lequel sont distribuées les données doit également être situé au-delà d'un éventuel pare-feu qui interdirait l'accès à ce port depuis l'extérieur.

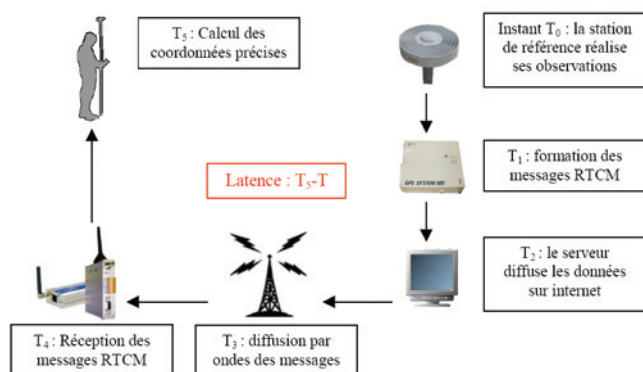
### ■ Le récepteur GPS mobile

Afin de pouvoir recevoir les données émises par le serveur sur internet, il faut disposer d'un modem GPRS dans lequel on insérera au préalable une carte SIM permettant l'emploi du GPRS. Il faut ensuite configurer ce modem en commençant par entrer l'APN (Acces Point Name) de l'opérateur. Il s'agit du point d'accès auquel le modem doit se connecter pour pouvoir accéder à internet. En l'occurrence, il doit passer par le portail que lui fournit l'opérateur. Ensuite, il faut indiquer l'adresse IP et le port TCP du serveur. Le modem est donc prêt à récupérer les données.

Cependant, les modems GPRS n'étant pas encore prévus par les constructeurs de matériels GPS, il n'existe pas de câble permettant de lier le modem au récepteur GPS. Il faut donc fabriquer les câbles adéquats. De même, les modems GPRS ne sont pas prévus dans les configurations des récepteurs GPS. Comme le montre la Figure 2, il faut donc tout d'abord créer un jeu de configuration contenant les paramètres de connexion du modem, ainsi que les différentes commandes nécessaires pour que le récepteur puisse initialiser le modem et enfin se connecter à la station permanente. Ensuite, sur le terrain, il faut utiliser le récepteur GPS pour donner au modem GPRS les commandes d'attachement au réseau puis de connexion à internet et enfin de connexion à l'ordinateur de la station de référence dont l'adresse IP a au préalable été renseignée. On peut alors utiliser le GPRS pour le RTK.

### Evaluation des performances

L'objectif est de connaître les performances du GPRS pour le RTK par rapport au mode de transmission par GSM. Il ne s'agit donc en aucun cas d'étudier l'intérêt du RTK par rapport à une autre stratégie d'observation GPS ou même à un autre moyen de mesure. Avant de réaliser des tests pour comparer les deux moyens de transmission, il faut étudier en détail leurs différences. Nous allons tout d'abord voir ce qu'est la latence, comment elle est prise en compte puis l'effet de la distance sur le temps d'initialisation et le positionnement.



**Figure 3 : Les différentes Étapes responsables de la latence en mode GPRS**

### ■ La différence entre GSM et GPRS : la latence

Comme le montre la Figure 3, la latence est le temps compris entre l'instant  $T_0$  où la station de référence réalise des observations et l'instant  $T_5$  où les coordonnées du récepteur GPS mobile sont calculées à l'aide de ces observations.

Pour connaître l'écart qu'il y a entre les différents moyens de transmission au niveau de la latence, l'idéal serait de pouvoir mesurer celle-ci. Malheureusement, la mesure de cette latence est difficile à réaliser directement. Cependant, on peut remarquer que, pour la transmission par GSM, le schéma serait le même qu'à la Figure 3 de  $T_0$  à  $T_2$  (en remplaçant l'ordinateur par un modem classique), puis de  $T_4$  à  $T_5$ . Seule la partie concernant internet et le GPRS change (de  $T_2$  à  $T_4$ ). En calculant seulement la partie de la latence entre  $T_2$  et  $T_4$ , on peut donc effectuer des comparaisons entre les moyens de communication au niveau de la latence avant d'en constater les effets. Il n'est donc pas nécessaire de calculer les autres parties de la latence, puisque ce qui nous intéresse est une comparaison par rapport à l'existant, et non une détermination absolue. De plus, la durée de la latence induite par la transmission des données est largement supérieure à celle induite par les autres étapes.

En utilisant un logiciel permettant de donner l'instant de réception des données, il est possible de faire une estimation du temps compris entre l'émission des données par la station permanente ( $T_2$ ) et la réception de ces données par les modems ( $T_4$ ). Cette estimation est peu précise mais permet de donner un ordre de grandeur et surtout de savoir lequel des deux moyens a une latence plus importante. Ainsi, on estime que le GSM a une latence visiblement plus faible (200 à 300 ms) que le GPRS (900 ms en moyenne). De plus, la latence du GPRS varie entre 300 et 1400 ms. Cela est certainement dû, d'une part au réseau internet qui connaît parfois des ralentissements, et d'autre part au réseau de téléphonie mobile puisque le GSM est considéré comme prioritaire dans les stations de base. Le GPRS souffre donc plus des éventuels encombrements du réseau.

### ■ La prise en compte de la latence

Bien que l'on ait à présent une idée des ordres de grandeur de la latence par GSM et par GPRS, la manière dont cette latence est gérée par les récepteurs peut également influencer sur le résultat final. Cette latence peut être traitée de façon diffé-

rentes par les récepteurs GPS. Les deux modes les plus répandus ont :

- Le mode synchronisé,
- Le mode extrapolé.

En mode synchronisé, à un instant  $T_A$ , la station de référence réalise des observations alors que le mobile se trouve sur un point A. La référence convertit ces observations en messages RTCM. Ceux-ci sont alors transmis (par le biais du mode de transmission utilisé) puis réceptionnés par le mobile à l'instant  $T_B$  qui est alors situé sur un point B. À l'aide des observations de la référence à l'instant  $T_A$ , le mobile calcule alors ses coordonnées de l'instant  $T_A$ . Ainsi, les coordonnées ne sont pas affectées par la latence et sont les plus précises possibles. Cependant, elles arrivent avec le retard impliqué par la latence. Ainsi, le mobile obtient les coordonnées du point A alors qu'il se trouve sur le point B. Ce mode est donc gênant pour les utilisations en mouvement.

Pour le mode extrapolé, le temps que les messages RTCM soient fabriqués puis acheminés et enfin calculés ( $T_5 - T_0$ ), les conditions présentes lors des observations à  $T_0$  (traversée de la troposphère, de la ionosphère et erreurs d'orbite) ont changé. Les observations prises en compte à  $T_5$  ne sont pas exactement les bonnes. En effet, le récepteur mobile va recevoir les observations correspondant aux conditions présentes à l'instant  $T_0$  alors qu'il est en présence des conditions à l'instant  $T_5$ . La précision de la position du mobile est dégradée par la différence des conditions entre ces deux instants. Pour combler cela, les observations de la référence sont extrapolées en fonction de celles des instants précédents. Cependant, cela ne permet pas d'avoir exactement les observations réelles.

Nous ne savons pas quel mode est utilisé dans les récepteurs que nous avons utilisés, cependant il est certain que la latence a une influence néfaste. Une connaissance plus approfondie du traitement des messages RTCM par le récepteur mobile permettrait de savoir comment la latence est gérée. Cependant, par manque de temps et d'information sur les récepteurs, nous nous sommes uniquement consacrés à observer les effets de cette latence. On peut toutefois penser que, si la distance entre la station de référence et le récepteur mobile augmente, alors la latence sera également plus importante, c'est pourquoi nous avons décidé de mesurer les effets de la distance.

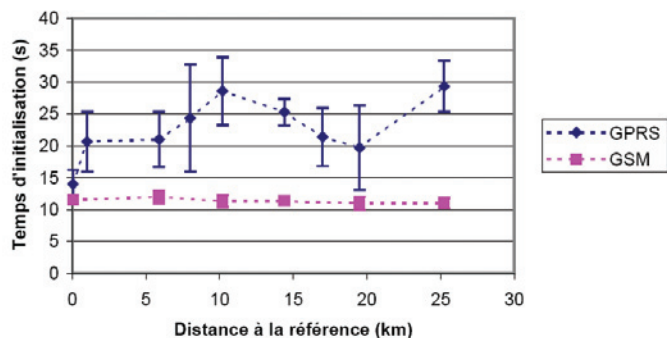
### ■ Mesurer l'effet de la distance

Un des facteurs essentiels que l'on a essayé de tester est l'influence de la distance par rapport à la station de référence. Les conditions impliquant la création de messages RTCM (traversée de la ionosphère, de la troposphère, erreur d'orbite) varient selon l'endroit où l'on se trouve. Par conséquent, les conditions ne sont pas les mêmes à l'endroit où est située la station de référence et à celui où se trouve le récepteur GPS mobile. On dit donc que la distance entraîne une décorrélation spatiale.

La distance peut avoir un effet sur les deux étapes du RTK :

- Le temps d'initialisation, correspondant au temps mis par le mobile pour effectuer le calcul de résolution des ambiguïtés entières. Plus les conditions entre référence et mobile sont différentes, plus ce calcul est long, et donc la distance et la latence influent sur cette étape.





**Figure 4 : Temps d'initialisation en fonction de la distance par rapport à la référence**

■ La position. Une fois les ambiguïtés entières fixées, la distance et la latence impliquent toujours des conditions différentes entre référence et mobile. Les corrections apportées seront donc affectées par ces influences négatives.

Le but des premiers tests est donc de mesurer les effets de la distance et de la latence sur ces deux étapes. Pour ce faire, des lieux de tests ont été choisis à différentes distances de la station de référence : moins de 100m, 1 km, 3 km, 6 km, 10 km, 20 km et 25 km.

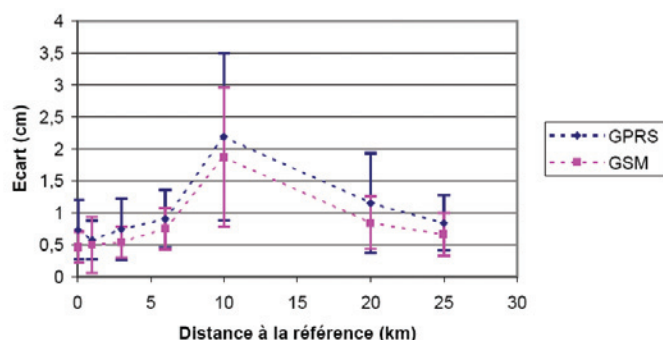
### ■ Effets de la distance sur le temps d'initialisation

Pour chacune des distances précédentes, plusieurs mesures des temps d'initialisation ont été faites avec le GSM et le GPRS. Ces mesures correspondent au temps compris entre le moment où les messages RTCM sont transmis au récepteur mobile et le moment où les ambiguïtés entières sont fixées. Des moyennes de ces mesures ont été faites à chacune des distances et on obtient la Figure 4.

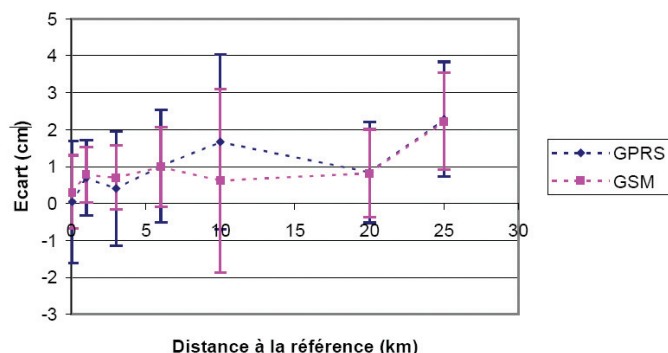
On voit clairement que les temps d'initialisation avec le GSM restent presque constants. De plus les barres d'erreur sont petites (moins d'une seconde), donc les mesures sont cohérentes entre elles. On en déduit donc que, jusqu'à 25 km, il n'y a pas d'influence de la distance sur le temps d'initialisation avec le GSM. Avec le GPRS, on constate que le temps d'initialisation est variable selon la distance sans qu'on remarque de lien direct entre la distance et le temps d'initialisation et que les barres d'erreur sont beaucoup plus grandes (jusqu'à 16 s) que par GSM. Cela montre que le GPRS n'a pas de latence constante, même à une distance donnée et que cette latence est plus importante qu'avec le GSM. De plus, la distance n'a pas d'influence directe sur le temps d'initialisation puisque les valeurs de celui-ci n'augmentent pas directement avec la distance. Ces différences sont certainement dues à des problèmes de réseaux : le réseau internet connaît parfois des ralentissements, et le réseau GSM est prioritaire par rapport au GPRS. Par conséquent les encombrements des réseaux de téléphonie se ressentent plus en GPRS.

### ■ Effets de la distance sur la position

A chaque distance, un trépied avec une antenne reliée à deux récepteurs par l'intermédiaire d'un doubleur (ou Dcblock) était installé. L'un des récepteurs recevait les données de la station de référence par le biais du GSM, l'autre par le biais du GPRS. Pour chaque distance on obtient donc :



**Figure 5 : Ecart planimétrique en fonction de la distance à la référence**

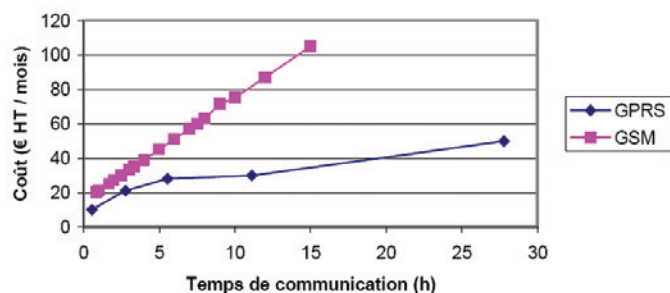


**Figure 6 : Ecart altimétrique en fonction de la distance à la référence**

- La position calculée en temps réel par le récepteur grâce aux données transmises par GSM,
- La position calculée en temps réel par le récepteur grâce aux données transmises par GPRS,
- La position calculée par un logiciel de post-traitement à partir des observations enregistrées par la station permanente et le récepteur mobile. Cette position n'est donc pas affectée par la latence.

Les écarts entre positions calculées en RTK et celles post-traitées ont été calculés pour chaque moyen de transmission. Par la suite, des moyennes et des écarts types de ces valeurs ont été réalisés pour chaque distance et on obtient les Figures 5 et 6. Il ressort de ces graphiques que le GPRS implique toujours une moins bonne détermination de la position que le GSM. De plus, les barres d'erreur sont plus grandes en GPRS qu'en GSM ce qui signifie que l'on a plus de chances d'avoir des valeurs différentes pour deux mesures successives. Toutefois, on constate que l'écart entre les positionnements avec les deux modes de transmission n'est pas très grand : 3 mm maximum sauf en un point en altimétrie où il est de 1 cm. On peut donc dire que le GPRS est légèrement moins précis que le GSM pour le RTK.

On voit également que la détermination altimétrique est moins précise que la détermination planimétrique, que ce soit avec le GSM ou le GPRS. En effet, les barres d'erreur sont beaucoup plus grandes en altimétrie qu'en planimétrie. Enfin, on voit que toutes les courbes ne sont pas constantes mais n'augmentent pas en fonction de la distance. On peut donc dire que la distance n'a pas d'influence directe sur la latence et donc sur le positionnement au vu des tests qui ont été réalisés.



**Figure 7 : Coût en fonction du temps de communication**

## Intérêt économique du GPRS pour le RTK

Les transmissions de données GPRS sont facturées à la quantité de données échangées. Le GSM est lui facturé au temps de communication. Pour comparer les deux, il faut d'abord pouvoir passer d'une unité à l'autre. Pour ce faire, nous avons mesuré la taille des messages RTCM envoyés par la station permanente pendant une heure. Nous avons alors estimé que le débit de transmission des données était de 1,8 Mo par heure. En utilisant cette estimation, on peut alors convertir les forfaits GPRS proposés par les opérateurs et les comparer aux forfaits GSM. On obtient alors la Figure 7.

Sur ce graphique, on voit que le GPRS est moins cher que le GSM pour notre application. On voit également que les forfaits GSM augmentent linéairement avec le temps de communication alors que les forfaits GPRS augmentent de façon dégressive. Cela implique que, plus on souhaite faire du RTK, plus le GPRS s'avère intéressant. Sur ce graphique nous n'avons pas représenté les forfaits GPRS qui permettent plus de temps de communication pour ne pas rendre le graphique illisible mais il existe un forfait GPRS de 300 Mo pour 80 € HT par mois, ce qui permet 166 heures de RTK ! Le GPRS permet, pour un prix donné, de réaliser du RTK pendant 2,5 à 15 fois plus de temps. Le GPRS apparaît donc beaucoup plus intéressant financièrement que le GSM pour le RTK.

## Conclusion

Actuellement, l'utilisation du GPRS pour le RTK n'est pas simple puisque aucune solution globale n'est actuellement commercialisée par les constructeurs de GPS en France. Si ceux-ci décidaient de fournir une telle solution, il serait alors aussi simple d'utiliser le GPRS que le GSM ou la radio. Au niveau des performances, nous avons vu que le GPRS avait une plus grande latence que le GSM. Toutefois, nous avons vu que l'écart entre les deux moyens de transmission est faible et en deçà de 3 mm. De plus, il faut bien rappeler que nous avons utilisé le protocole TCP, alors que le protocole UDP permettrait peut-être une latence plus petite et donc une dégradation de précision moins importante.

Enfin, nous avons également vu que le GPRS était beaucoup plus avantageux financièrement pour le RTK que le GSM. Nous pouvons dire que les économies réalisées en utilisant le GPRS plutôt que le GSM sont plus importantes que les quelques millimètres perdus en précision. Nous pouvons donc conclure que le GPRS n'est pas une révolution pour le RTK mais apporte un avantage financier appréciable. Dans le

cadre de l'élaboration d'un réseau de stations permanentes, cette technologie est donc à considérer sérieusement. ●

## Remerciements

Ce Travail de Fin d'Etudes n'aurait pu être réalisé sans l'aide du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées qui a prêté à l'ESGT le matériel nécessaire à cette étude.

## Contact

**Luc CHALAYE**

Ingénieur ESGT promotion 2004

E-mail : luc\_chalaye@yahoo.fr

## Références

**Botton Serge, Duquenne Françoise, Egels Yves, Even Michel, Willis Pascal, 1997, GPS, localisation et navigation**, 159 pages, Editions Hermes

**Chalaye Luc, 2004, Evaluation du GPRS pour les applications RTK** - Mémoire de Travail de Fin d'Etudes ESGT

**Radio Technical Commission For Maritime Services, 1998, RTCM Recommended Standards For Differential GNSS Service Version 2.2**

**Souvignet Damien, 1998, Mise en place d'une station permanente GPS à l'ESGT** - Mémoire de Travail de Fin d'Etudes ESGT

**Lien internet** [www.brianpoe.com/comfoolery/](http://www.brianpoe.com/comfoolery/) : Logiciel Comfoolery

## Curriculum Vitae

**Luc CHALAYE**

**A partir d'août 2004** : Stagiaire dans un cabinet de Géomètre-Expert

**Février à Juillet 2004** : TFE à l'ESGT "Evaluation du GPRS pour les applications RTK"

**Septembre 2003 à Janvier 2004** : 3<sup>e</sup> année à l'ESGT, filière géomatique

**Septembre 2001 à Août 2003** : 1<sup>ère</sup> et 2<sup>e</sup> année ESGT

## ABSTRACT

*An engineer final project performed at the ESGT has been achieved in order to evaluate the interest of the GPRS for RTK. This training required first the installation of components to be able to use this technology on the permanent station of Le Mans as no global solution is commercialized by the GPS manufacturers in France. This installation must be done in two steps: on the permanent station and on the mobile receiver. Then the GPRS has been compared to the GSM thanks to different tests to know the performances of GPRS for the RTK, and more precisely on positioning accuracy. Finally, a financial study permitted to analyze the economic interest to GPRS.*



# Classification orientée objet de la perméabilité des sols en zone urbaine à l'aide d'imagerie très haute résolution et de données laser scanner à Curitiba (Brésil)

■ Anne KARSENTY

*En zone urbanisée, disposer d'outils permettant de prévoir les écoulements occasionnés par les pluies, est indispensable à la prévention des risques et au dimensionnement d'ouvrages. Depuis plus de 30 ans, les spécialistes en hydrologie et en télédétection unissent leurs connaissances pour modéliser le comportement des bassins versants et cartographier la perméabilité des sols. Dans ce domaine, le développement de l'imagerie THR, du laser scanner et de l'approche orientée objet est très prometteur. Cette étude se propose donc d'associer ces trois techniques et d'évaluer la fiabilité avec laquelle, elles permettent d'extraire les données nécessaires à la modélisation hydrologique.*

## ■ mots clés

Modélisation hydrologique, Imagerie THR, Laser scanner, Segmentation, Logique floue

## Introduction

### ■ Problématique de la perméabilité des sols

L'urbanisation entraîne la modification de la topographie, de la morphologie... mais surtout de la couverture du sol d'un bassin versant. Ces changements influent sur le cycle naturel de l'eau. L'imperméabilisation des sols, en particulier, entraîne une augmentation importante des ruissellements de surface. Ce phénomène a diverses répercussions environnementales : accroissement de l'érosion et de la production de sédiments, diminution de la qualité de l'eau, assèchement des nappes d'eau souterraines qui ne sont plus alimentées par l'infiltration, recrudescence de la fréquence des crues et des dégâts matériels, écologiques et humains.

La modélisation hydrologique des bassins versants est donc un outil indispensable, dès lors que l'on s'intéresse à des problèmes relatifs à la gestion des ressources en eau, à l'aménagement du territoire ou à l'un des différents aspects du risque hydrologique. Elle est sensée pouvoir décrire de façon fidèle les différentes étapes de la transformation pluie débit, en particulier les processus liés à la formation des crues.

Pour modéliser le comportement des bassins versants, les hydrologues disposent d'outils mathématiques complexes,

intégrant une grande quantité de données, dont la perméabilité du sol. Or une approche courante pour estimer la perméabilité, est de délimiter diverses catégories d'occupation des sols grâce à une carte, des photographies aériennes ou des images satellitaires.

### ■ Télédétection et hydrologie

Depuis son apparition dans les années 70, les hydrologues exploitent l'imagerie satellitaire pour cartographier la perméabilité des sols. Cette technique présente en effet des avantages incontestables par rapport aux méthodes classiques : en terme de coût, mais aussi de superficie couverte, de rapidité et de facilité de mise à jour. Aussi chaque évolution technologique dans ce domaine est suivie avec intérêt et de nouvelles solutions sont sans cesse à l'étude, pour obtenir des données plus fiables.

L'imagerie très haute résolution (THR), présente un niveau de détail bien meilleur que l'imagerie classique, c'est donc un outil puissant pour déterminer l'impact de l'urbanisation sur l'hydrologie des bassins versants. Cependant, les techniques de classification classiques, dites "par pixel", conviennent mal au traitement d'images aussi riches en informations ; elles aboutissent à un effet "poivre et sel", qui rend difficile l'interprétation de l'image. Pour pallier le problème, de nouvelles approches ont été développées, telles que la classification orientée objet. Dans le même temps, le développement du laser scanner aéroporté permet aujourd'hui de générer des modèles numériques de terrain et d'élévation de grande qualité ; ainsi, en zone urbaine, peut-on extraire les bâtiments de manière très précise.

### ■ Objectifs

L'objectif de l'étude résumée ici réside en l'exploitation des dernières avancées technologiques en télédétection, pour réaliser une classification de l'occupation des sols sur le site de L'UFPR (en périphérie de Curitiba) et en déduire la perméabilité des sols. Les classes définies sont basées sur le modèle du "Curve Number", développé par le "Natural Resources Conservation Service" (agence du "United States Department of Agriculture"). Ce modèle comporte en effet une table associant à chaque type d'occupation des sols un coefficient de perméabilité, permettant de calculer la perméabilité globale d'un bassin versant.

Cette recherche se fonde sur la classification orientée objet simultanée d'une image Quickbird et de données laser scanner.

Cette étude est réalisée à l'aide du logiciel eCognition, développé par Definiens Imaging en Allemagne, pionnier dans le domaine de l'analyse orientée objet. Elle vise à tester l'efficacité de l'approche orientée objet pour la classification d'image THR et l'apport des données laser scanner dans la détermination de l'occupation des sols en zone urbaine.

## Classification de la perméabilité des sols

### ■ Matériel et méthodes

Les données Quickbird et laser scanner ont été traitées avant utilisation pour faciliter l'étude. Au final, les données intégrées au projet sont :

- Une image hybride Quickbird, fusion de l'image multispectrale et panchromatique, composée des bandes spectrales rouge, verte, bleue et proche infrarouge.
- Une image laser, issue de données laser scanner, représentant l'élévation des objets par rapport au sol.
- Le tout ayant été ramené à une résolution spatiale de 0,7 mètres. Pour diminuer les temps de calcul, l'étude a été réalisée sur deux zones découpées dans les images : une "Zone 1" très verte et de forme urbaine simple et une "Zone 2" de densité urbaine plus élevée.

### ■ Démarche

#### Choix des classes

L'objectif premier de l'étude est de classer l'image pour en tirer des classes d'occupation des sols intégrables à un modèle hydrologique, ici le modèle du Curve Number. Huit classes ont ainsi été déterminées :

- "Toits" : bâtiments
- "Imperméable" : sol imperméable (béton, bitume)
- "Perméable" : sol perméable (terre, gravier)
- "Végétation urbaine" : végétation dans un cadre urbain
- "Végétation rurale" : forêt
- "Herbe" : pelouse
- "Ombre sur bâti" : ombre projetée sur de l'imperméable
- "Ombre sur végétal" : ombre projetée sur de la végétation

La classification orientée objet sous eCognition se divise ensuite en deux étapes :

- Une segmentation multirésolution
- Une classification supervisée basée sur la logique floue

#### Segmentation

La segmentation de l'image consiste à diviser l'image en régions homogènes, de manière à faire ressortir les objets réels du terrain. Les objets sont créés par croissance de région, c'est-à-dire, par fusion de pixels adjacents. Un "paramètre d'échelle" ou "critère d'hétérogénéité" est fixée par l'utilisateur, pour stopper le processus : il intègre la couleur et la forme des objets. La forme prend

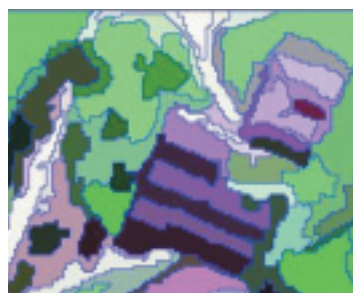
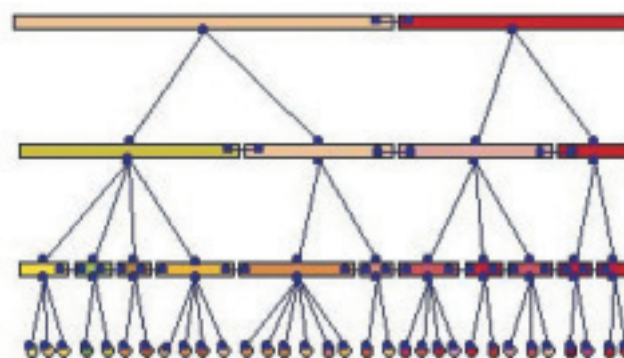


Figure 1 : segmentation et réseau hiérarchique de l'image



elle-même en compte deux paramètres : compacité et lissage. Ce critère est en fait une valeur abstraite qui permet d'influencer la taille et la forme de l'objet suivant la pondération accordée à chaque paramètre.

En segmentant successivement l'image à différentes résolutions on obtient un réseau hiérarchique d'objets qui représente différents niveaux de réalité sur le terrain. Dans ce réseau, chaque objet "connaît" son contexte, c'est à dire ses voisins, ses sous-objets et son super-objet. (Figure 1). L'avantage de travailler avec des objets plutôt que des pixels, est qu'en plus de caractéristiques spectrales, un objet possède des caractéristiques géométriques (longueur, périmètre...), topologique (position dans l'image et par rapport aux autres objets) et sémantiques (liée à sa signification).

Les classes choisies correspondent à différents niveaux de détail sur le terrain. Aussi, trois niveaux de segmentation ont été définis. Un premier avec un "critère d'hétérogénéité" de

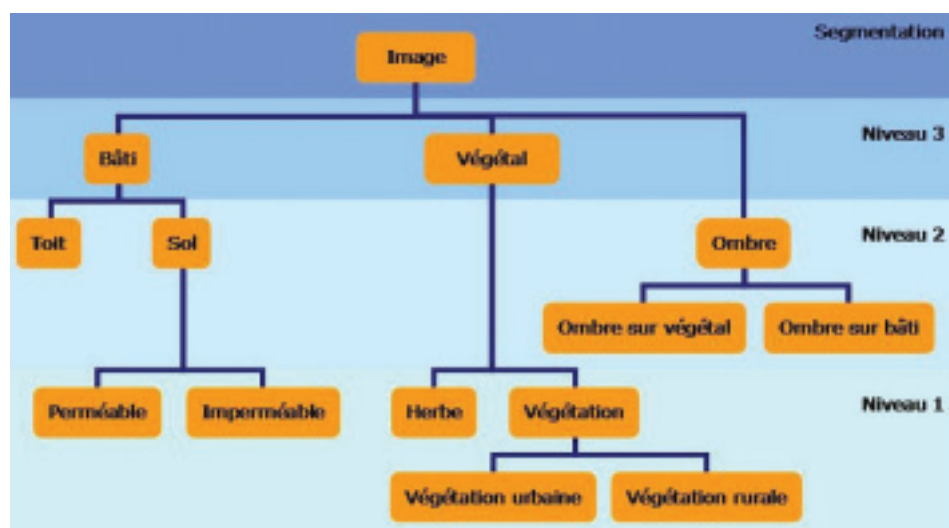


Figure 2 : Répartition des classes dans les niveaux de segmentation définis



10 pour distinguer les petits objets, un de 25 pour mettre en valeur la structure urbaine, notamment les bâtiments et un de 40 qui représente le découpage global de l'image. (Figure 2)

Le but étant de distinguer des structures urbaines, le poids accordé à la forme était élevé (0,3) dans les niveaux 1 et 2. Il a été diminué à 0,2 pour le niveau 3, afin d'éviter un amalgame excessif des objets. Pour extraire les bâtiments la compacité des objets a aussi été prise en compte à hauteur de 0,6. Néanmoins la pondération de la segmentation reste empirique et son appréciation visuelle. Aucune segmentation n'est parfaite.

## Classification

La classification se base sur la théorie des ensembles flous. Ce concept utilise, pour définir un ensemble, des valeurs graduées entre 0 et 1 et non strictement vraies ou fausses. Un ensemble flou est défini par une fonction d'appartenance, qui décrit le degré avec lequel un élément  $x$  appartient à l'ensemble. La logique floue permet ainsi de représenter des modèles vagues; elle convient bien à la description des dépendances entre différents types d'informations et à la représentation des données géographiques.

Dans une classification floue, une classe est définie par une combinaison de fonctions floues, portant sur différentes caractéristiques des objets. Chaque objet se voit attribuer, selon ces fonctions, un degré d'appartenance à chaque classe: cette valeur n'est pas une probabilité mais une possibilité admise. Généralement, l'objet est au final attribué à la classe pour lequel il a le plus haut degré d'appartenance.

La méthodologie utilisée pour cette étude se base essentiellement sur la hiérarchie des classes et l'opérateur logique "NON". La séparation de deux classes se base sur le choix d'une classe "A" facile à décrire grâce à une fonction floue simple, la définition des autres est défini comme étant "Non A". On peut associer à la classification toutes les données disponibles: relations hiérarchiques, sémantiques, données laser... On crée ainsi une structure où chaque classe est définie dans un niveau donné et où toutes les classes sont liées. La structure peut être sauvegardée et appliquée à une autre image (Figure 3). Cette méthode permet donc d'intégrer directement les connaissances de l'opérateur et la classification obtenue est transparente et facilement adaptable d'une image à une autre, c'est-à-dire dans cette étude, d'une zone à l'autre.

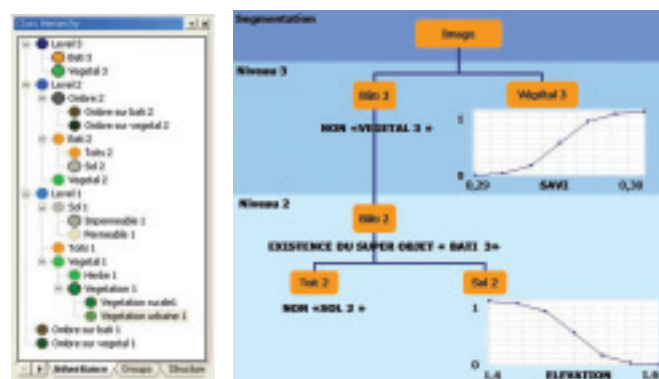


Figure 3 : Structure de la classification et extrait de la définition des classes

## Résultats et analyse

### Résultats

La classification aboutit à trois niveaux de classification, du plus large au plus détaillé, ce dernier représentant la carte de l'occupation des sols. (Figure 4)

### Analyse

La première constatation pouvant être faite est que la segmentation préalable de l'image améliore significativement la lecture de l'information géographique, puisque l'effet "poivre et sel" est inexistant.

L'analyse de la classification à travers une matrice de confusion ayant pour référence la monorestitution des zones d'étude permet de quantifier la fiabilité ou "précision pour l'utilisateur" de

Classes	Précision pour l'utilisateur (%)	
	Zone 1	Zone 2
Toits	84,75	71,47
Imperméable	84,76	82,75
Perméable	51,24	2,11
Végétation	88,09	39,84
Herbe	81,57	57,07
<b>Précision Totale (%)</b>	<b>77,21</b>	<b>59,79</b>

Figure 5 : Matrice de confusion



Figure 4 : trois niveaux de classification obtenus

la classification. Plusieurs remarques peuvent être faites (Figure 5):

- La classification de la "Zone 1" donne de meilleurs résultats que celle de la "Zone 2", ce qui était prévisible puisque la forme urbaine de la deuxième zone était beaucoup plus complexe.
- Dans les deux cas, on obtient une très bonne fiabilité en ce qui concerne les zones imperméable, c'est-à-dire les structures urbaines.
- Au contraire la classe "perméable" donne à chaque fois des résultats inférieurs aux autres classes. Une étude supplémentaire pourrait consister à améliorer la définition de cette classe. Cependant plusieurs sources d'erreur peuvent expliquer les résultats mitigés de la seconde zone:
- L'angle de prise de vue de l'image Quickbird était médiocre, ce qui entraîne d'une part des ombres, en particulier en zone très urbanisée, d'autre part l'apparition des façades, qui englobe une plage d'altitude entre toits et sol et qui sont donc parfois classifiées de manière erronée.
- Un problème de concordance des données a aussi fait apparaître des erreurs. En effet les données satellitaires dataient de mars 2002 et les données laser de mai 2003 certains bâtiments apparaissaient donc sur un type de données et pas l'autre.
- L'imperfection de la segmentation implique parfois des erreurs de classification au niveau de la classification la plus large, qui sont transmises au niveau le plus fin qui a été évalué.
- Les résultats doivent enfin être relativisés car la monorestitution est considérée comme une référence 100 % exacte, alors que la restitution de limites nettes comme celle du bâti est beaucoup plus fiable que celle de forme floue telle que du sol nu.

## Conclusion et perspectives

L'objectif de cette étude était de valider l'utilisation de nouveaux outils pour la détermination de la perméabilité des sols en zone urbaine. En développant une classification pertinente on parvient à extraire des catégories d'occupation des sols avec une bonne fiabilité pour la majorité des paramètres évalués. En particulier les zones perméables qui ont une importance essentielle en hydrologie.

Les résultats concernant la méthode sont quant à eux très prometteurs. La segmentation facilite de beaucoup l'interprétation thématique de l'image en se rapprochant du mode de fonctionnement de la vision humaine, qui ne perçoit pas une image en pixel mais en zones homogènes. Elle met aussi à la disposition de l'opérateur des notions géométriques, topologiques et sémantiques qui enrichissent significativement la classification.

La logique floue permet ensuite de construire une classification, qui est le reflet de nos connaissances et de notre perception du monde réel; puisqu'elle permet d'intégrer directement nos connaissances scientifiques et intuitives. La lecture des informations géographiques, contenues dans la classification est donc très naturelle.

L'introduction des données laser améliore la segmentation mais facilite surtout la classification. L'élévation, qui permet intuitivement de distinguer le sol des constructions, n'apparaît pas sur une image satellitaire. En l'intégrant, au travers des données laser, on dispose d'un outil puissant pour mettre

en évidence certaines classes de sol, qui habituellement se confondent, tel que sol et toits.

Aux vues des résultats, cette étude donne des perspectives très encourageantes, concernant l'utilisation des dernières avancées de la télédétection en hydrologie. De plus, les techniques et méthodes utilisées pour ce projet sont en constante évolution. Cette approche, combinant image THR, données laser et classification orientée objet pourrait donc être une solution d'avenir pour la classification de la perméabilité des sols et sa fiabilité sera amenée à s'améliorer.

De plus, bien que notre étude soit liée à la problématique de l'hydrologie, les conclusions de ce projet présentent un intérêt dans de nombreux autres domaines utilisant la télédétection comme outil de travail. Particulièrement dans les secteurs où l'extraction des bâtiments est utile, comme l'urbanisme ou l'aménagement du territoire.

La classification orientée objet a aussi le potentiel de fournir des bases de données extrêmement riches pour les systèmes d'informations géographiques. Les objets classifiés possèdent en effet des caractéristiques géométriques, topologiques et sémantiques, qui peuvent être assimilées à une table d'attributs. Cette possibilité est d'autant plus attractive qu'avec l'imagerie satellitaire, la mise à jour des données est simple et rapide. ●

## Bibliographie

### ■ Ouvrages et revues

**Azevedo, F. et al.** [2000], *Redes neurais com aplicações em controle e em sistemas especialistas*, Capítulo 3: *Sistemas "Fuzzy"*. Edition Bookstore, Bresil, p 49-68.

**Baatz, M. & Schäpe, A.** [2000], *Multiresolution segmentation - an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation*; *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII*, Edition Herbert Wichmann, Karlsruhe, p 12-23.

<http://www.definiens-imaging.com/documents/reference2000.htm>

**Blaschke, T. & Strobl, J.** [2001], *What's wrong with pixels? Some recent developments interfacing remote sensing and GIS*; *GIS 6/2001*, Hüthig GmbH & Co. KG, Heidelberg.

<http://www.definiens-imaging.com/documents/gis.htm>.

**Blaschke, T. et al.** [2000], *Object-oriented image processing in an integrated GIS/remote sensing environment and perspectives for environmental applications*; *Environmental information for Planning, Politics and the Public*, Edition Metropolis, Marburg, Vol.2, p. 555-570.

**Congalton R. G. et al.** [1994], *Remote sensing thematic accuracy assessment: a compendium*. American society for Photogrammetry and Remote Sensing, Lynn K. Fenstermaker Edition, Las Vegas, EUA. ISBN 1-57 083-002-9, p. 257-272.

**De Kok, R. et al.** [1999], *Object-based classification and applications in the alpine forest environment*; *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Valladolid, Espagne, Vol. 32, Part. 7-4-3 W6, Juin.

**Eastman, J.** [2001], *Decision Rule Uncertainty*, *IDRISI Guide to GIS and Image Processing*, Vol. 2, Chap. 2, p. 29-39.



- ■ ■ **Mansor, S. et al.** [2002], Object-oriented classification for land cover mapping; Conference proceedings of Map Asia, www.gisdevelopment.net, Thailand, 7-9 Aout.
- Metternicht, G.** [1999], Change detection assessment using fuzzy sets and remotely sensed data: an application of topographic map revision, Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, ISPRS, EUA, No. 54, Elsevier Sciences, p. 221-233.
- Mohd, M. & Mansor, M.** [1999], Flood prediction from Landsat Thematic Mapper data and hydrological modeling; Proceedings of the Asian Conference on Remote Sensing, www.gisdevelopment.net, China, 22-25 Novembre.
- Puissant, A.** [2003], Information géographique et images à Très Haute Résolution: utilité et applications en milieu urbain. Thèse de Doctorat, ULP, Strasbourg, p. 255-300/325. <http://imaville.u-strasbg.fr/perso/aprec.html>
- Ragan, R. & Jackson, T.** [1975], Use of satellite data in urban hydrologic model; Journal of the Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers, EUA, Vol. 101, No. HY12, Decembre, p. 1469-1475.
- Ragan, R. & Jackson, T.** [1980], Runoff synthesis using Landsat and SCS Model; Journal of the Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers, EUA, Vol. 106, No. HY5, Mai, p. 667-678.
- Schiewe, J. et al.** [2001], Potential and problems of multi-scale segmentation methods in remote sensing; GIS 6/2001, Hüthig GmbH & Co. KG, Heidelberg. <http://www.definiens-imaging.com/documents/gis.htm>.
- Wang, F.** [1990], Fuzzy supervised classification of remote sensing images, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, IEEE, Vol. 28, No. 2, Mars, p. 194-201.
- Willhauck, G.** [2000], Comparison of object-oriented classification techniques and standard image analysis for the use of change detection between SPOT Multispectral satellite images and aerial photos, International Archive of Photogrammetry and Remote Sensing, Pays Bas, Vol. XXXIII, Part. B3, p. 214-221.

## ■ Documents de formation

- Baatz, M. et al.** [2002], eCognition 3 Trial Version User Guide, Allemagne. Disponible sur: <http://www.definiens-imaging.com/down/index.htm>
- Gabriel, P.** [2001], Introduction à la logique floue et à la commande floue, Cours à l'université de Liège, Département d'Electricité, d'Electronique et d'Informatique. Disponible sur: <http://elap.montefiore.ulg.ac.be/fuzzy/>
- Gonzalez, R. C.** [2000], Processamento de Imagens, Capítulo 7: Segmentação de Imagens, Curso na Universidade de Brasília. Disponible sur: <http://www.ene.unb.br/~juliana/cursos/pimagens/aulas.html>
- Lachowski, H.** [1994], Guidelines for use of digital imagery for vegetation mapping, Chapter 7: Accuracy assessment, USDA Forest Service, Salt Lake City, EUA.
- Musy, A.** [2003], Hydrologie générale, Cours à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Laboratoire d'Hydrologie et d'Aménagements. Disponible sur: <http://hydram.epfl.ch/e-drologie/>
- Thiran, J. P.** [2004], Reconnaissance des formes, Cours 2: Segmentation, Cours à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Laboratoire de Traitement des Signaux. Disponible sur: <http://ltswww.epfl.ch/~coursrf/rf-cours2.pdf>

## ■ Sites internet

- DEFINIENS Imaging@[2004], eCognition elements. URL <http://www.definiens-imaging.com>
- NRCS@[2004], US Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Hydrolics and Hydrology. URL <http://www.wcc.nrcs.usda.gov/hydro>

## Remerciements

A Jorge Centeno et Alzir Felipe Antunes, professeurs en cartographie à L' Université Fédérale du Paraná. A toute l'équipe enseignante de l'INSA Strasbourg, notamment Tania Landes, professeur de télédétection.

## Contact

### Anne KARSENTY

A l'I.N.S.A. Strasbourg, filière topographie.  
E-mail : [annekarsenty@yahoo.fr](mailto:annekarsenty@yahoo.fr)

## Curriculum Vitae

### Anne KARSENTY

**2005 :** MASTER professionnel "Architecture, ville et projet urbain". Université de Marseille Luminy.

**2004 :** Diplôme d'Ingénieur Géomètre Topographe. I.N.S.A. Strasbourg (formation ENSAIS).

**Projet de Fin d'Etude.** "Classification orientée objet de la perméabilité des sols en zone urbaine à l'aide d'imagerie très haute résolution et de données laser scanner". Universidade Federal do Paraná (Curitiba - Brésil).

**1999 :** BAC Scientifique. Lycée C. N. Ledoux Besançon

## ABSTRACT

**Key words :** Hydrological modelling, VHR Imagery, Laser scanner, Segmentation, Fuzzy logic

*Urban watershed runoff estimation is an essential information for risk prevention and structure design. Hydrologist and remote sensing specialists have been working together for more than 30 years in order to predict and model the runoff behavior and product soil imperviousness' maps. High resolution imagery, laser scanning and object oriented classification seems to be promising tools for this field of study. This project objective is to gather those three new techniques for data extraction needed for hydrological modeling.*

# Résumés des candidats aux prix AFT 2004

## Comment retrouver la projection d'une carte ?

Nicolas KARPOFF -INSA

Derrière cette question d'apparence anodine : *"comment retrouver la projection d'une carte ?"* se cache un problème complexe bien connu des cartographes. TOTAL, quatrième Major pétrolier, est aussi confronté à cette problématique lors des phases d'exploration et de production pétrolières. Afin de localiser la potentialité de certains gisements pétrolifères, le groupe doit recouper et superposer les informations de nombreuses cartes géologiques et topographiques. Cela nécessite alors le référencement de chacune d'elles. D'où la recherche de la projection si elle n'est pas mentionnée.

Dans le cadre de mon projet de fin d'études à l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Industries de Strasbourg, nouvel Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg, je me suis penché pendant sept mois sur cette problématique au sein du groupe TOTAL.

---

## Etude, déploiement et validation du projet Orphéon

Nicolas JEAN -ESTP

Depuis la mise en service opérationnelle du système GPS (Global Positioning System), les techniques de positionnement par satellites ont connu une évolution considérable. Les gains de précision, de temps et d'argent, ainsi que l'utilisation des nouvelles technologies ont ouvert de nouveaux horizons aux métiers de la topographie. L'arrivée du système GALILEO en 2007-2008 va encore accroître l'étendue de ces possibilités.

Forte de ses connaissances GPS acquises depuis de nombreuses années dans le positionnement subaquatique et terrestre, la société Acthyd a décidé de se lancer dans la mise en place d'un nouveau mode d'utilisation de cette technologie, basée sur le principe de la station virtuelle. Ce mode, déjà utilisé dans de nombreux pays en Europe et dans le monde, repose sur le déploiement d'un réseau de stations GPS permanentes.

L'idée mûrissait depuis presque deux ans au sein de la société. Cependant, si l'intérêt d'un tel système ne semblait plus à remettre en cause, les modalités techniques de son déploiement ont nécessité plus de travail. La fourniture d'un service économiquement viable et d'une qualité irréprochable nous ont poussés à explorer les multiples facettes d'un tel projet.

## Etude de l'étalonnage des systèmes de mesure angulaire pour les théodolites

Jean-David MAILLEFAUD -INSA

L'European Synchrotron Radiation Facility, un institut européen de recherche, produit, grâce à un faisceau d'électrons, une source de rayon X de troisième génération. Le groupe ALGE (Alignment and Geodesy) de l'ESRF (European Synchrotron Radiation Facility) est responsable de l'alignement des éléments qui doivent guider le faisceau d'électrons tout au long de son trajet. Pour ce faire, des théodolites de grande précision sont utilisés et il a été remarqué que certains angles mesurés à courte distance présentent un défaut systématique dépendant de l'instrument.

Après avoir décrit les différentes erreurs mécaniques puis optiques liées aux mesures d'angles avec un théodolite, cet article expose de manière détaillée un test qui qualifie et quantifie les défauts mécaniques de deux instruments de grande précision, ainsi qu'une méthode d'étalonnage des théodolites.

Enfin, les problèmes liés à la réfraction sont exposés, ainsi qu'une méthode de quantification de l'ordre de grandeur de ce phénomène en vue de la mise en place d'un procédé de calibration des défauts de focalisation.

---

## Morcellement forestier sur la plaine d'Alsace : Mise en place d'une méthodologie de cartographie et de suivi par télédétection

Séverine EBURDY -INSA

Les préoccupations liées à l'estimation et au suivi de la ressource forestière se sont considérablement accrues ces dernières années. Dans ce cadre, les Orientations Régionales Forestières visent à surveiller et à prévoir l'impact d'une pression anthropique croissante. Grâce aux progrès technologiques réalisés en télédétection spatiale et en Systèmes d'Informations Géographiques, il est désormais possible de recueillir et d'intégrer des données sur de grandes étendues comme la Plaine d'Alsace.

L'objectif est de réaliser une cartographie diachronique et un inventaire homogènes et précis du manteau forestier alsacien avant les tempêtes de décembre 1999. Sur cette base, un outil de suivi du morcellement forestier est développé. Il permettra aux responsables de la filière bois d'évaluer l'efficacité des stratégies antérieures, d'élaborer des politiques de gestion durable forestière, et d'orienter les pratiques sylvicoles à venir.

# Validation expérimentale du logiciel de lancer de rayon ergospace et estimation de la précision du MNE requise pour son utilisation

■ Thomas TIRTAINE - Juliette MARAIS

*Plusieurs facteurs d'imprécision nuisent à la réalisation de mesures utilisant le système satellite GPS. L'essentiel d'entre eux peut être corrigé par modélisation (erreur troposphérique,...) ou par l'utilisation de techniques de calcul spécifiques (calcul de ligne de base, calcul en bifréquence). Les erreurs dues aux multitrajets ne peuvent être éliminées par ces méthodes. Leur influence sur la mesure n'est cependant pas négligeable. Leur apparition revêt un caractère aléatoire dans les environnements très masquant (particulièrement en milieu urbain).*

*Pour mieux les appréhender dans le cadre de recherche sur la localisation, les chercheurs de l'INRETS utilisent un logiciel de simulation, Ergospace, ainsi qu'un modèle numérique de l'environnement de la mesure. L'objet de ce rapport porte sur la validation expérimentale d'Ergospace. Cette validation a fait l'objet de plusieurs étapes : vérification des calculs effectués par le logiciel (indices de DOPs et position des satellites), choix d'un modèle de terrain et comparaison entre des mesures effectuées sur site et les simulations.*

## ■ mots clés

Navigation par satellite, Multitrait, Modèle numérique d'élévation, Validation expérimentale, lancer de rayons

Lors de mesures GPS, plusieurs facteurs affectent la précision du calcul de position. La plupart des erreurs peuvent être corrigées grâce à l'utilisation de modèles (erreur troposphérique, ionosphérique...) ou lors du post-traitement des mesures. Il est cependant plus difficile de s'affranchir des erreurs liées aux multitrajets. En effet, ceux-ci apparaissent de manière aléatoire et sont directement fonction de l'environnement de l'antenne. Le LEOST, laboratoire de l'INRETS (l'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité) à Villeneuve d'Ascq (Nord), étudie les applications des systèmes de navigation à différents types de transport. Les services d'information voyageurs ou de suivi de flotte sont aujourd'hui bien développés ou en cours de déploiement dans les secteurs routiers et ferroviaires. Le futur, avec le développement du système européen Galiléo et l'évolution du GPS, s'annonce riche en nouvelles applications. Cependant, si la plupart des utilisations actuellement développées se contentent du service disponible, l'utilisation du satellite pour des applications telles que le contrôle-commande ferroviaire nécessite davantage de disponibilité, et surtout d'intégrité<sup>1</sup>. La qualité de réception des signaux et leur disponibilité est donc un thème de recherche important dont les résultats devront permettre de franchir ce palier.

Le logiciel de lancer de rayons Ergospace est utilisé dans ce cadre pour simuler le nombre de satellites reçus (il faut s'assurer qu'il reste au moins quatre satellites encore visibles pour obtenir la position du point) et les trajets des signaux issus des

satellites de navigation à partir de la modélisation de la constellation de satellites et du lieu de la mesure à un instant donné.

Utilisé par divers organismes (DGA, CNES,...), Ergospace a fait l'objet de validations statistiques visant à vérifier expérimentalement les résultats obtenus dans des environnements "types" (urbain, suburbain, rural...). L'objet de notre étude est de réaliser une validation expérimentale en environnement connu, c'est à dire, de comparer les mesures réalisées dans un environnement donné avec les simulations correspondantes (même trajectoire et mêmes instants de mesures) à partir d'un modèle de cet environnement le plus réaliste possible. Nous avons étudié l'adéquation des informations fournies par le logiciel Ergospace avec nos mesures à la lumière des besoins des systèmes de transports urbains.

Dans une première partie de cet article, nous décrivons le logiciel Ergospace. Puis, nous présenterons notre campagne de mesures et notre analyse des résultats, avant de conclure et d'introduire quelques pistes à poursuivre.

## Fonctionnement du logiciel Ergospace

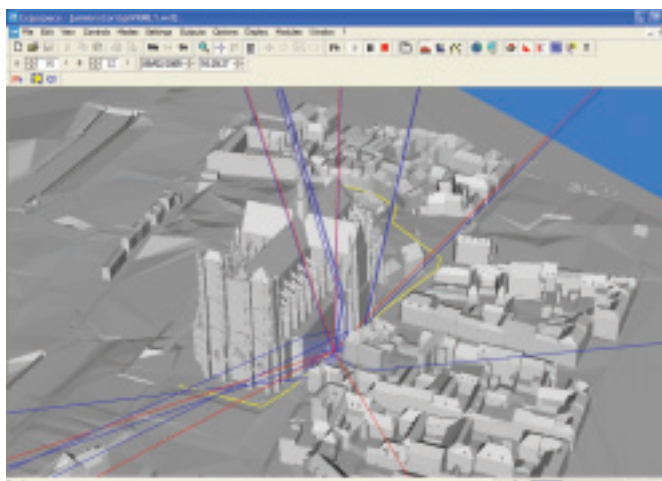
Ergospace est un logiciel de lancer de rayons destiné aux satellites de navigation. Les lois de l'optique géométrique permettent de tracer, sur des scènes modélisées en 3D, chacun des rayons issus des satellites de la constellation et reçus par le récepteur mobile ou fixe (figure 1).

### ■ La simulation nécessite plusieurs éléments :

- Pour calculer les positions des satellites GPS au moment de la simulation, le logiciel utilise les almanachs (au format

(1) L'intégrité est une mesure de confiance en l'information fournie par le système de positionnement entier. Elle inclut notamment la capacité d'un système à prévenir l'utilisateur à temps que le système ne peut pas être utilisé pour l'opération voulue.





**Figure 1** Interface du logiciel Ergospace

YUMA ou SEM) disponibles sur le site Internet des gardes côtes américains<sup>2</sup>. Ces almanachs doivent être régulièrement importés dans le logiciel pour garantir la fiabilité de leurs informations. Il est également possible de créer des constellations manuellement en paramétrant les satellites un par un avec des informations plus précises que celle des fichiers YUMA ou SEM.

- Pour prédire la visibilité des satellites lors des simulations, il est nécessaire de connaître la position des émetteurs mais également de définir l'environnement de la mesure. Des scènes types peuvent être générées par l'utilisateur. Des scènes réelles géoréférencées peuvent également être importées au format numérique VRML. Dans les deux cas, il est possible d'attribuer à chaque facette du modèle une texture dont les caractéristiques correspondent à des surfaces réelles (bois, brique, ciment,...).
- Enfin, la localisation du lieu de la mesure est réalisable dans la scène en un clic de souris ou encore par l'introduction de coordonnées dans le système géographique du modèle.

Les résultats de simulations (statiques ou dynamiques) sont fournis pour chaque point statique ou chaque point de la trajectoire. Les signaux issus de chacun des satellites disponibles sont observés. Ainsi chaque rayon reçu est décrit par le trajet du signal (direct ou réfléchi) antenne-satellite, les diverses informations relatives à la trajectoire du signal (nombre de réflexions, retard du trajet réfléchi par rapport au trajet direct) ou encore par le niveau de signal reçu (Les pertes causées par les réflexions, la traversée de l'atmosphère,...).

Les simulations fournissent également un certain nombre d'informations quant aux coordonnées des satellites et à la géométrie des satellites reçus (indices de DOP).

Un module cartographique d'Ergospace permet de réaliser des cartes thématiques. Elles illustrent pour un instant donné, la répartition dans la scène du nombre de satellites visibles ou encore des indices de DOP. Elles permettent également d'illustrer des données statistiques calculées à partir de plusieurs cartes instantanées, comme par exemple le pourcentage de temps pendant lequel moins de quatre satellites sont visibles. L'intérêt de l'utilisation d'un tel logiciel dans un environnement réel est d'apporter une connaissance précise de la qua-

lité du service offert dans cet environnement, notamment en terme de nombre de satellites reçus. Nous nous sommes donc attachés à comparer de manière fine les enregistrements réalisés sur le terrain avec ceux des simulations effectuées dans les mêmes conditions.

## Validation en environnement connu

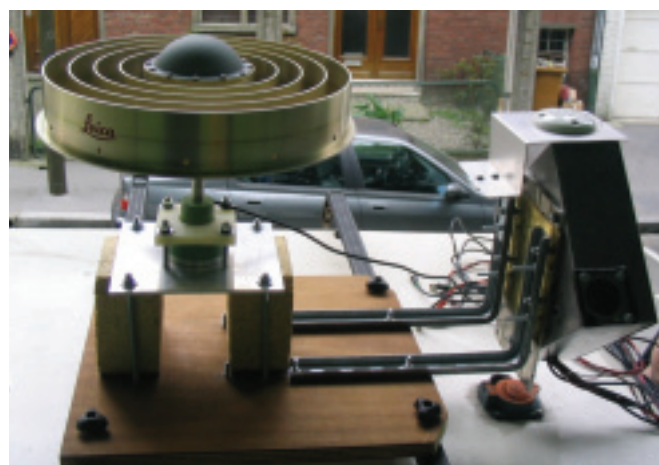
L'étude de l'adéquation des simulations avec les mesures est également l'occasion d'observer dans quelles mesures le modèle influera sur le résultat des simulations et la précision nécessaire pour celui-ci. Le but de cette analyse est de conclure quant à la pertinence des résultats, relativisée en fonction de l'application de l'étude ; en effet, les besoins d'un géomètre ou d'un exploitant d'autobus ne seront pas de mêmes ordres, notamment en terme de précision.

Nous avons utilisé pour cela un modèle 3D urbain issu des travaux de recherche du laboratoire MATIS de l'IGN. Ces travaux couvrent le centre ville d'Amiens. Nous avons donc entrepris notre validation dans ce centre ville, en utilisant un modèle récent et précis (de l'ordre de 25 cm).

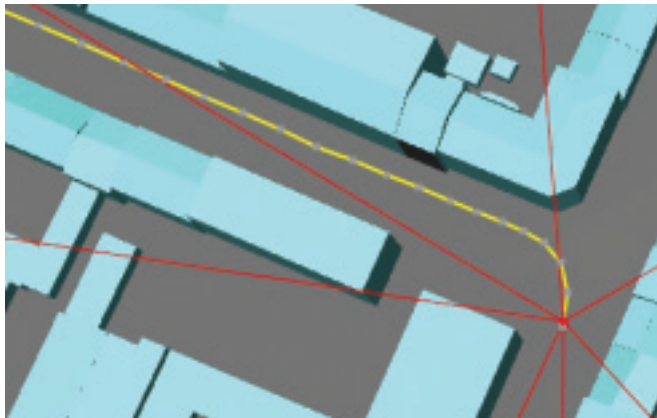
L'ensemble de la validation étant réalisé dans le cadre des études sur les transports menées au laboratoire, nous avons effectué des mesures dynamiques. Le récepteur utilisé est le récepteur PolarX2 de Septentrio, possédant 15 canaux de réception. De plus, nous avons limité notre étude dans un environnement de type urbain propice à la formation de multitrajets.

Dans ce modèle, nous avons sélectionné cinq rues caractéristiques de largeurs variables. Cependant, les mesures réalisées dans les rues étroites ne permettront pas de calculer une position précise car peu de satellites sont reçus et certains signaux auront subi une ou plusieurs réflexions. Les rues plus larges autorisent la réception d'un nombre inférieur de signaux réfléchis (effet moins sensible du canyon urbain) et les positions calculées seront plus précises. C'est pourquoi, les rues choisies sont plutôt larges (10 m environ) et tout en vérifiant que des signaux de puissance faible (considérés comme des multitrajets) ont bien été reçus.

Enfin, la régularité de la hauteur du masque facilitant l'interprétation des enregistrements dans la mesure où elle diminue les variations locales importantes du nombre de satellites



**Figure 2** Dispositif de mesure GPS sur le véhicule



**Figure 3** Implémentation de la trajectoire du mobile en simulation.

■ ■ ■ visibles, nous avons choisi des rues longées par des masques d'élévations constants formés par les bâtiments de part et d'autre de la voie. L'orientation de la rue est un élément secondaire puisque c'est avant tout le masque des bâtiments qui influe sur la visibilité des satellites.

#### ■ Pour réaliser les mesures in situ nous avons utilisé trois ensembles antenne-récepteur GPS (figure 2) :

- Le premier récepteur enregistre les mesures en continu avec une période d'une seconde et délivre en sortie un fichier RINEX indiquant les satellites visibles et le rapport signal/bruit de leur signal. Le seuil de réception du signal est fixé à sa valeur minimale : 19 dB pour la phase et 33 dB pour le code. Le récepteur utilisé (de marque Septentrio) correspond à celui utilisé pour la localisation de véhicule pour la gestion de flotte par exemple (bus, camions).
- Le second enregistre les données en vue du post traitement. Associé à une antenne fixe décrite plus bas, il nous permet de connaître la position du véhicule à quelques centimètres près lorsque les ambiguïtés ont été résolues. Dans le cas contraire, nous conservons les points de précision de localisation inférieure au mètre. Ces positions doivent être relativement précises car elles seront implémentées directement dans le logiciel de simulation et il convient de situer correctement l'antenne dans la scène en 3D. Elles jouent donc un rôle important concourant au réalisme des simulations. Le récepteur est un Leica SR530 bifréquence.
- La station de base (troisième ensemble antenne-récepteur) est placée sur la place face à la cathédrale d'Amiens. C'est un lieu dégagé situé à moins de trois kilomètres des points les plus éloignés de la trajectoire du véhicule lors des mesures. Pour déterminer les coordonnées de ce pivot, nous avons calculé une ligne de base à partir de la station permanente la plus proche située à Creil. Avec une durée d'observation de plus de 4h30, la précision obtenue est largement suffisante (de l'ordre de quelques centimètres).

Nous avons appliqué un masque d'élévation de 0° pour les signaux reçus par l'antenne Septentrio. Le masque d'élévation artificiel du récepteur utilisé pour la localisation du véhicule est fixé à la valeur usuelle de 10°.

Deux séries de mesures ont été réalisées à quelques heures d'intervalle afin de disposer pour chaque rue, de deux confi-

gurations satellitaires différentes. Cette redondance permet d'augmenter les possibilités de résolutions des ambiguïtés et donc de positionnement précis du véhicule.

L'ensemble des données a été analysé a posteriori. Nous présentons ici les principales conclusions.

## Analyse des résultats

Comme décrit précédemment, nous avons retenu les trajectoires dont la précision est meilleure que le mètre. Cette précision est indiquée par le logiciel de post traitement Skipro. Lors de l'implémentation de ces trajectoires sous Ergospace, nous avons remarqué que la position est correcte en planimétrie (la trajectoire calculée correspond à celle parcourue) alors qu'elle accuse un important décalage en altimétrie (figure 3). Celui-ci provient de l'utilisation d'une grille de calcul d'altitude peu précise par Skipro. Pour obtenir une altitude réaliste, nous avons remplacé les altitudes erronées par la somme de la hauteur de l'antenne sur le véhicule et de l'altitude du sol donnée par le modèle pour chaque point.

**Trois parcours ont été étudiés. Le premier a été utilisé pour une étude statistique et les deux autres pour affiner les conclusions par des remarques quantitatives.** Pour chaque trajet retenu, nous avons comparé la visibilité des satellites sur le terrain et en simulation. Nos comparaisons ont porté sur deux types d'informations : le nombre de satellite d'abord (réception ou non), l'état de réception des satellites ensuite (le satellite reçu est-il reçu par trajet direct ou après réflexion ?). Pour comparer les résultats des simulations avec les mesures enregistrées sur le terrain, nous devons distinguer les signaux directs des signaux réfléchis reçus par l'antenne. Une étude préalable a montré qu'un seuil de puissance de 45 dB permet de séparer ces deux états de réception. Ce seuil est cependant à utiliser avec prudence. En effet, les signaux issus de satellites bas sur l'horizon par exemple peuvent atteindre le récepteur par trajet direct avec un rapport signal/bruit relativement faible. De même, il est possible qu'un signal réfléchi ait un rapport signal/bruit supérieur à 45 dB, notamment lorsque l'élévation du satellite est importante ou lorsque le revêtement de la surface de réflexion a une bonne conductivité. Le moyen le plus fiable pour s'assurer d'une éventuelle réflexion du signal et de vérifier que sa polarité est inversée. Malheureusement, cela ne peut être réalisé avec le matériel dont nous disposons.

#### ■ Etude statistique sur une première trajectoire

Pour le premier trajet, composé de 69 points de mesure, seuls les points des portions de départ et d'arrivée du parcours sont calculés précisément. Les positions intermédiaires, dont la précision est moins bonne que le mètre, ont été interpolées en supposant que le véhicule se déplaçait à vitesse constante. Cela était effectivement le cas lors des mesures sur site. Nous avons veillé à conserver le même nombre de points entre la mesure réalisée sur site et la simulation.

Cette étude qualitative a pour but de confronter d'un point de vue statistique les résultats obtenus en simulation avec les mesures effectuées sur le terrain. Si ces résultats sont com-

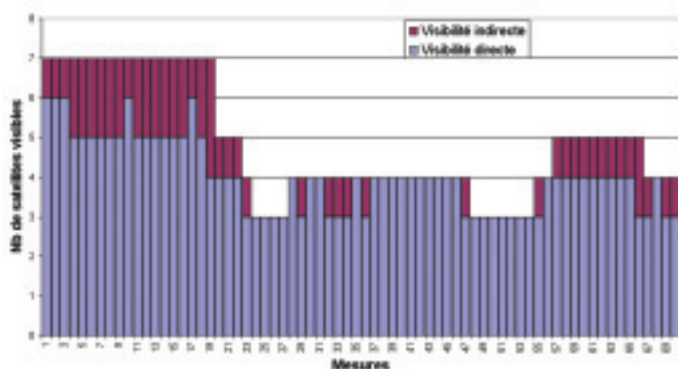


Figure 4 Enregistrée sur site

parables, nous pourrions alors nous livrer à une étude plus fine de la comparaison de ces résultats.

L'étude statistique sur la proportion de signaux reçus après réflexions par rapport à l'ensemble des signaux reçus a montré que le nombre de satellites visibles directement est légèrement plus important en simulation que sur le terrain. En revanche, le taux de satellites visibles indirectement est quasiment identique : 13% en simulation et 17% sur site (figure 4 et 5).

On constate également que le nombre de satellites reçus varie de manière ponctuelle en simulation, alors que sur le terrain, nous observons des plages de mesures consécutives pendant lesquelles la visibilité des satellites ne change pas. Cependant, l'antenne détecte 339 signaux satellitaires sur site, là où seuls 305 sont reçus en simulation. Nous n'avons pas simulé les paramètres de suivi et d'accrochage du récepteur. Sur le terrain, le récepteur mettra un certain temps à traquer les satellites dont la visibilité a été brièvement interrompue. Notre simulation valide la réception d'un signal à l'instant  $t$  si la géométrie est correcte, quelles que soient les conditions de réception à  $t-1$ , et surestime ainsi le nombre total de signaux reçus. La conclusion de cette première partie nous permet d'envisager une étude plus fine des résultats.

#### ■ Etude quantitative

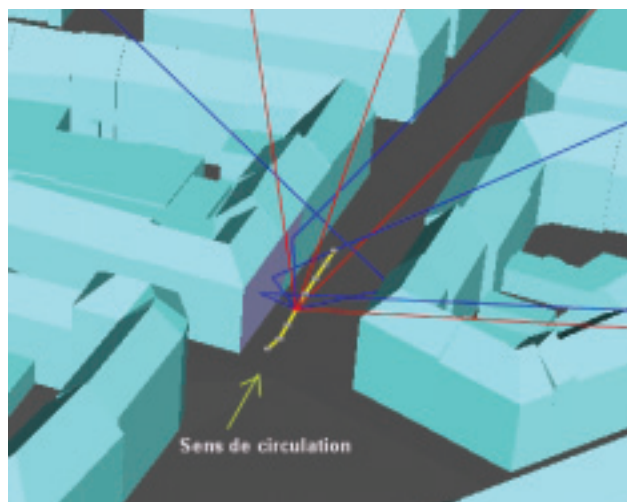


Figure 6 Deuxième trajectoire (9 positions)

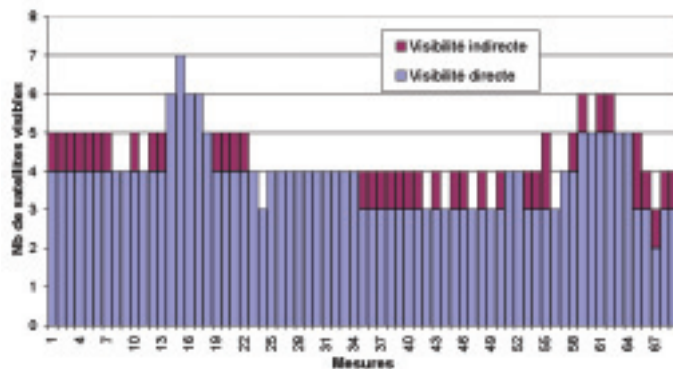


Figure 5 Obtenue en simulation

Les deux autres trajectoires analysées comportent respectivement 8 et 20 points ne nécessitant pas d'interpolation. Elles sont représentées respectivement sur les figures 6 et 7. Les positions des points sont espacées régulièrement, ce qui réduit le décalage de positionnement éventuel entre la mesure réelle et celle simulée. La vitesse de déplacement en simulation est adaptée pour concorder avec les mesures sur site. Leur étude est faite pour chaque position en déterminant l'origine de la visibilité (ou de l'absence de visibilité) des satellites au cas par cas.

On observe que les résultats des simulations du nombre de satellites reçus directement sont proches des mesures. Les différences qui apparaissent ponctuellement (un satellite durant 7 positions de la deuxième trajectoire et un satellite pour la dernière position de la troisième trajectoire) ont pour origine l'imprécision du modèle ou de la trajectoire en simulation.

Par contre, on observe que les satellites dont la visibilité est indirecte en simulation sont peu reçus dans la réalité. Plusieurs hypothèses expliquent ce phénomène : le caractère aléatoire des multitrajets, l'irrégularité des façades où se réfléchissent les signaux (figure 8), l'absence de modélisation de la végétation sur le modèle (figure 9), la diminution de puissance du signal réfléchi, les traitements réalisés par le récepteur,...

#### Conclusion

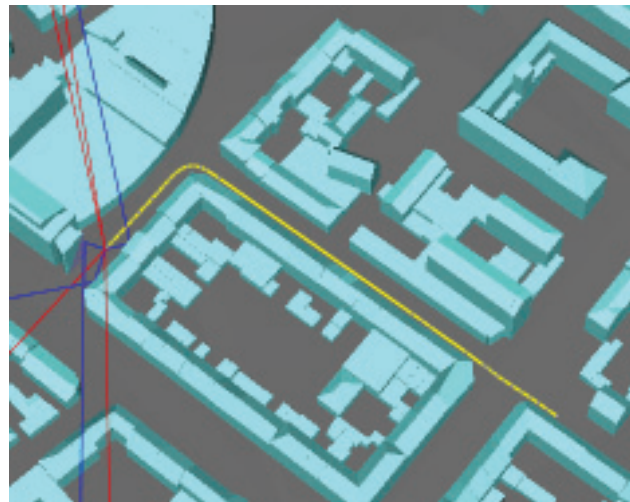


Figure 7 Troisième trajectoire (20 positions)





**Figure 8** Support de la réflexion du signal (coté gauche)

Notre étude a porté sur la validation expérimentale en site connu du logiciel de lancer de rayon Ergospace. Pour cela, nous avons comparé des simulations avec des mesures effectuées sur site à Amiens en implémentant la trajectoire précise du véhicule dans le modèle. Ces comparaisons ont montré que les satellites visibles directement sur le terrain le sont également en simulation. Une surestimation des signaux reçus après réflexion apparaît cependant lors des simulations. Finalement, nous pouvons conclure que les résultats obtenus sont suffisant pour l'utilisation du logiciel qui est faite au laboratoire dans le cadre d'étude sur la localisation et le transport. Ceux ci sont basés sur l'utilisation d'un modèle imparfait (même s'il est très précis) et non texturé, une position de précision métrique dans le cadre de mesures dynamiques. Pour obtenir des résultats satisfaisants dans une gamme d'utilisation plus exigeante en terme de précision (topographie, géodésie,...), il sera alors nécessaire d'utiliser un modèle d'une très grande précision et de paramétrer correctement l'attitude du récepteur lors des simulations.

#### ■ D'autres pistes de recherche permettront d'approfondir cette étude parmi lesquelles :

- une comparaison simulation/réalité sur un site dont la modélisation est très précise et exhaustive,
- une comparaison entre les distances géométriques obtenues en simulation et les pseudo distances correspondantes. Cette étude réalisée notamment sur les trajets reçus après une réflexion permettra de valider les valeurs des retards et donc leur impact sur le calcul de position GPS. Elle sera d'un intérêt majeur pour le laboratoire dans le but d'appréhender de façon très précise les erreurs de localisation en environnement transport. La quantification de ces erreurs permettra d'étudier de nouvelles pistes de recherche d'amélioration des performances de ces systèmes satellitaires.

#### Remerciement

Les auteurs remercient les personnes ayant concourues au bon déroulement de ce projet, notamment M. Martinez, auteur du logiciel Ergospace.

#### Bibliographie



**Figure 9** Support de la réflexion du signal (coté droit)

**Concernant l'INRETS :** [www.inrets.fr](http://www.inrets.fr)

**Concernant le logiciel Ergospace :** [www.ergos-fr.com](http://www.ergos-fr.com)

**Concernant les problèmes de localisation par GPS en milieu masquant :** Localisation de mobiles terrestres par satellites. Mise en œuvre d'outils permettant l'analyse de l'influence des conditions de propagation et des effets de masques sur la disponibilité du service offert Thèse J. Marais juillet 2002

**Concernant la réalisation de modèle numérique de terrain :** Les promesses d'avenir de la télémétrie laser revue Géomètre N. Paparoditis Publi-Topex octobre 2003

**Concernant un projet dont l'INRETS est partenaire :** [www.locoprol.org](http://www.locoprol.org)

#### Contact

**Thomas TIRTAINE**

Elève ingénieur ESGT 2004 - [thomas.tirtaine@laposte.net](mailto:thomas.tirtaine@laposte.net)

**Juliette MARAIS**

Chargée de recherche, INRETS-LEOST  
20, rue E. Reclus - 59650 Villeneuve d'Ascq  
[juliette.marais@inrets.fr](mailto:juliette.marais@inrets.fr)

#### ABSTRACT

*For a better understanding of the multipath errors in GPS measurements within the framework of research in the context of localization applications, the researchers of INRETS use a simulation software (Ergospace) based on a digital elevation model of the environment. This report deals with Ergospace experimental validation. The validation was divided into three steps : checking of the computations performed by the software (DOPs values and satellites position), choice of a digital model elevation and comparisons between measurements on site and simulations.*

# Le nombre d'or et la divine proportion

■ Raymond D'HOLLANDER

*Le nombre d'or des mathématiciens, utilisé dès l'Antiquité, suscite encore de nos jours des recherches par suite de son caractère divinatoire et métaphysique que nous n'aborderons pas ; nous nous limiterons à la géométrie du nombre d'or, car on peut découvrir par des tracés géométriques, les différentes particularités de ce nombre.*

## ■ mots clés

Nombre d'or, divine proportion, moyenne et extrême raison, rectangle d'or, pentagone, décagone, Fibonacci, Mesures anciennes.

## Le nombre d'or

Le nombre d'or résulte du rapport de deux quantités  $a$  et  $b$  telles que :

$$\frac{a}{b} = \frac{a+b}{a} \quad (1)$$

formulation donnée déjà par Vitruve, architecte romain du 1<sup>er</sup> siècle avant J.C. Posons  $a/b = n$ .

On obtient  $n = 1 + 1/n$  et  $n^2 - n - 1 = 0$ , équation du second degré dans laquelle le discriminant vaut  $\Delta = 1 + 4 = 5$ . L'équation a deux racines :  $\frac{1 \pm \sqrt{5}}{2}$

Le nombre d'or est celui qui est égal à la racine positive. Nous le désignerons par  $n$  :  $n = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} = 1,618...$  (2)

Retenons les relations corollaires :  $n - 1 = 1/n$  et  $1 + n = n^2$

## Le rectangle d'or

On appelle rectangle d'or, le rectangle qui est tel que le rapport de sa longueur à sa largeur soit égal au nombre d'or.

### ■ Première construction du rectangle d'or (figure 1)

Considérons le carré ABCD de côté  $a$  que l'on prendra pour unité. Soit  $I$  le milieu de CD. Joignons IB et traçons l'arc de cercle de centre  $I$  et de rayon IB. Ce cercle coupe le prolongement de CD en F. Soit E le sommet du rectangle dont les trois autres sommets sont A, C et F. Nous allons montrer que le rec-

tangle AECF est un rectangle d'or :

Évaluons le rapport  $\frac{CF}{AC} = \frac{CI + IF}{a}$

$$IF = IB = \sqrt{a^2 + \frac{a^2}{4}}, \text{ d'où}$$

$$\frac{CF}{AC} = \frac{\frac{a}{2} + \sqrt{a^2 + \frac{a^2}{4}}}{a} = \frac{1 + \sqrt{5}}{2}$$

$$\frac{CF}{AC} = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \quad (3)$$

Le rapport de la longueur du rectangle à sa largeur est le nombre d'or. Le rectangle AECF est bien un rectangle d'or. Montrons que le rectangle BEDF est aussi un rectangle d'or. En effet, ses côtés BD et DF sont tels que ;

$$\frac{BD}{DF} = \frac{a}{IF - ID} = \frac{a}{IB - ID} = \frac{a}{\sqrt{a^2 + \frac{a^2}{4}} - \frac{a}{2}} = \frac{1}{\frac{\sqrt{5} - 1}{2}}$$

$$\frac{\sqrt{5} + 1}{2} \text{ soit } \frac{BD}{DF} = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \quad (4)$$

Ainsi, la construction de la figure 1, permet d'obtenir les 2 rectangles d'or AECF et BEDF.

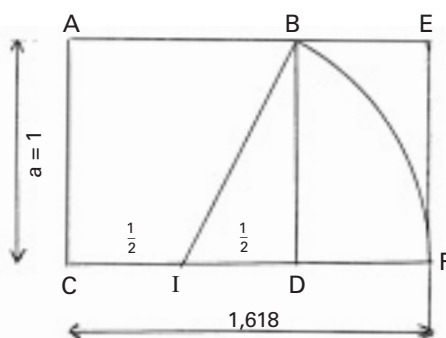


figure 1

Partage d'un segment en moyenne et extrême raison ; divine proportion.

Des relations (3) et (4), on déduit :

$$\frac{CF}{AC} = \frac{BD}{DF} \quad (5)$$

AC DF

Dans cette relation, remplaçons AC par CD qui lui est égal, et BD par CD qui lui est aussi égal. On obtient :

$$\frac{CF}{CD} = \frac{CD}{DF} \text{ ou } \frac{CD}{DF} = \frac{CF}{CD} \text{ du type } \frac{a}{b} = \frac{a+b}{a}$$

qui correspond à la définition initiale. La relation

$$\frac{CD}{CF} = \frac{DF}{CD} \quad (6)$$

s'exprime par :

Le point D divise le segment de droite CF en moyenne et extrême raison.

Propriété du nombre d'or :

Vérifions que :  $n - 1 = 1/n$ , c'est-à-dire :

$$\frac{\sqrt{5} + 1}{2} - 1 = \frac{1}{\frac{1 + \sqrt{5}}{2}} \text{ ou que } \frac{\sqrt{5} - 1}{2} = \frac{2}{1 + \sqrt{5}}$$

On a bien  $(\sqrt{5} - 1)(\sqrt{5} + 1) = 4$

Vérifions aussi que :  $1 + n = n^2$ , c'est-à-dire :

$$1 + \frac{1 + \sqrt{5}}{2} = \left(\frac{1 + \sqrt{5}}{2}\right)^2 \text{ ou que}$$

$$\frac{3 + \sqrt{5}}{2} = \frac{6 + 2\sqrt{5}}{4}$$

On retrouve donc bien les 2 relations de l'introduction :

$n - 1 = 1/n$  et  $1 + n = n^2$

Le nombre d'or a donc les particularités suivantes :

- En soustrayant 1 au nombre d'or, on obtient son inverse,
- En ajoutant 1 au nombre d'or, on obtient son carré.

Dimensions des deux rectangles d'or :

Supposons que la largeur du premier rectangle d'or soit  $AC = BD = 1$ . On a montré (voir relation 3) que sa longueur CF était telle que :

$$\frac{CF}{AC} = n = \frac{\sqrt{5} + 1}{2}, \text{ soit } CF = n = \frac{\sqrt{5} + 1}{2} = 1,618...$$

Pour le deuxième rectangle d'or, la longueur est  $BD = a = 1$ . On a montré que

$$DF = \frac{2}{\sqrt{5}+1} = \frac{\sqrt{5}-1}{2} = 0,618 \dots$$



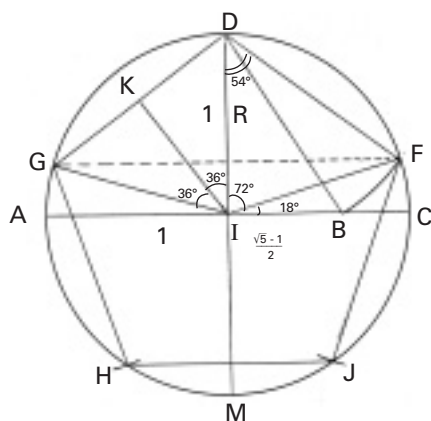


figure 4

écrit que :

$$S_5 = GD = 2R \sin 36^\circ \quad (10)$$

$$S_5 = 1,1756... R \quad (11)$$

On pourra se reporter à notre ouvrage "Sciences géographiques dans l'Antiquité", pages 232 et 233, pour voir comment Euclide, vers 320 avant J.C., a résolu le problème de la division d'un segment en moyenne et extrême raison, comment il a résolu géométriquement une des premières équations du second degré de l'Antiquité. Nous y montrons aussi qu'on peut exprimer la valeur du côté du pentagone régulier  $S_5$  par :

$$S_5 = \frac{R}{2} \sqrt{10-2\sqrt{5}} \quad (12)$$

Le calcul de cette quantité donne aussi :  $S_5 = 1,1756... R$

#### Apothème du pentagone régulier

Restons à la figure 4 et considérons le point K milieu de GD. IK est l'apothème du pentagone régulier. Son expression est :  $IK = R \cos 36^\circ = 0,809... R = 1,618 R / 2 = \frac{\sqrt{5}+1}{2} \times \frac{R}{2}$

Si on fait  $R = 1$ , l'apothème du pentagone régulier est égale à la moitié du nombre d'or :  $IK = \frac{\sqrt{5}+1}{2} \times \frac{R}{2} \quad (13)$

### Décagone régulier

On peut construire un décagone régulier à partir d'un pentagone régulier en intercalant 5 points nouveaux aux milieux des arcs du pentagone régulier, mais la construction ci-après nous permet d'effectuer la construction directe d'un décagone régulier.

#### ■ Construction directe

**du décagone régulier :** (figure 5)

Considérons le diamètre XY d'un cercle de centre O et de rayon R. La médiatrice

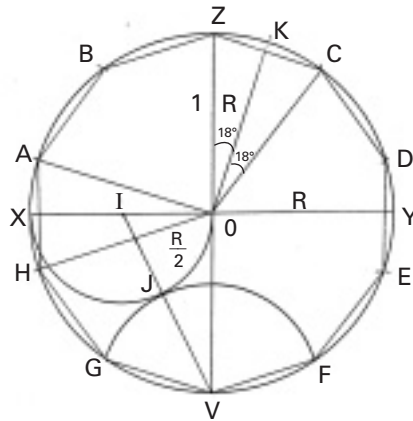


figure 5

de XY rencontre le cercle aux points Z et V. Considérons le milieu I de XO ;  $IO = R/2$ . Joignons IV. On a :

$$IV = \sqrt{\frac{R^2}{4} + R^2} = R \frac{\sqrt{5}}{2}$$

Traçons le cercle de centre I et de rayon  $IO = R/2$  qui rencontre IV en J. On a :

$$VJ = IV - IJ = \frac{R\sqrt{5}}{2} - \frac{R}{2} = R \frac{\sqrt{5}-1}{2}$$

soit  $VJ = R \times 0,618$

Montrons qu'il s'agit de la longueur du côté du décagone régulier. Supposons construit ce décagone ABZCDEFVGH. Dans le triangle ZOC, l'angle au centre vaut  $360^\circ / 10 = 36^\circ$  ; traçons sa bissectrice OK. Il est clair que le côté du décagone régulier :  $ZC = 2 ZK = 2 R \sin 18^\circ = R \times 0,618 = R (\sqrt{5}-1) / 2$

$VJ = R (\sqrt{5}-1) / 2$  est donc bien la longueur du côté du décagone régulier. On aura les 2 premiers points F et G du décagone en traçant le cercle de centre V et de rayon VJ et en prenant ses intersections avec le cercle de diamètre XY. Les points F et G étant construits, il n'y a aucune difficulté pour construire les autres points du décagone. Par exemple E s'obtient à partir de F en traçant un arc de cercle de centre F et de rayon  $FV = VJ = R (\sqrt{5}-1) / 2$  et ainsi de suite, on obtient les autres points DCZBAH.

Retenons que  $S_{10} = R (\sqrt{5}-1) / 2 \quad (14)$  où  $S_{10}$  est le côté du décagone régulier. ou  $S_{10} = R (n-1) = R / n$ , n étant le nombre d'or.

### Décagone étoilé (figure 6)

La figure 6 représente le décagone étoilé où chaque côté joint deux points du décagone régulier séparés par 3 arcs d'amplitude  $36^\circ$ . Considérons le côté GE et son milieu M.

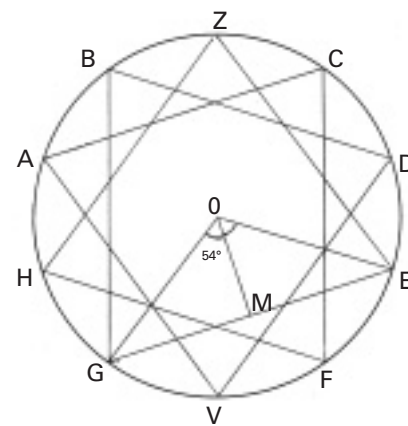


figure 6

$\widehat{GOE} = 3 \times 36^\circ$  et  $\widehat{GOM} = \widehat{GOE} / 2$ , soit  $\widehat{GOM} = 54^\circ$

On a donc  $S'_{10} = GE = 2 R \sin 54^\circ = 1,618 R$

$$S'_{10} = R (\sqrt{5}+1) / 2 \quad (15)$$

La longueur  $S'_{10}$  du côté du décagone étoilé s'exprime donc simplement en fonction du nombre d'or n par  $S'_{10} = R n$  On remarque que le quotient  $S'_{10} / S_{10} = n / n-1$ , où n est le nombre d'or.

Comme  $n-1 = 1/n$ , on a aussi :

$$S'_{10} / S_{10} = n^2 \quad (16)$$

Faisons le produit :

$$S_{10} \times S'_{10} = R n \times R / n = R^2 \quad (17)$$

Faisons la différence :

$$S'_{10} - S_{10} = R n - R (n-1) = R \quad (18)$$

Dans notre ouvrage "Sciences géographiques dans l'Antiquité", nous avons montré directement les relations (17) et (18) qui nous ont permis de calculer  $S_{10}$  et  $S'_{10}$ , ce problème étant celui du calcul de deux quantités  $S_{10}$  et  $S'_{10}$  dont on connaît le produit et la différence.

### Pentagone étoilé (figure 7)

La figure 7 représente un pentagone étoilé obtenu en joignant des points du décagone régulier séparés par quatre arcs d'angle au centre  $360^\circ / 10$  soit  $36^\circ$ .

On a donc  $\widehat{AOD} = 4 \times 36^\circ = 144^\circ$

et si N est le milieu de AD ;  $\widehat{AON} = 72^\circ$   
 $AD = 2 AN = 2 R \sin 72^\circ$

$$S'_5 = 2 R \sin 72^\circ \quad (19)$$

expression où  $S'_5$  désigne la longueur du côté du pentagone étoilé.

On a aussi  $S'_5 = 1,9021 R$

Dans notre ouvrage "Sciences géographiques dans l'Antiquité", nous avons montré que :

$$S'_5 = \frac{R}{2} \sqrt{10+2\sqrt{5}} \quad (20)$$

Si nous comparons  $S_5$  et  $S'_5$  donnés par les relations (12) et (20), on obtient

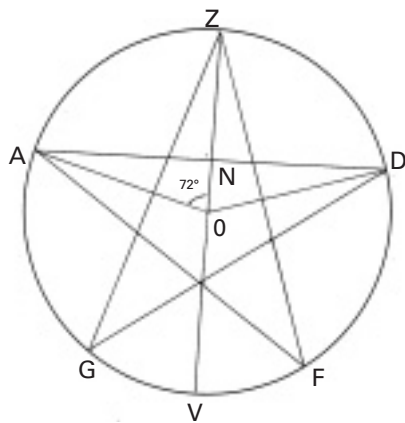


figure 7

$$\frac{S'_5}{S_5} = \frac{\sqrt{10+2\sqrt{5}}}{\sqrt{10-2\sqrt{5}}}$$

En multipliant haut et bas par  $\sqrt{10+2\sqrt{5}}$ , on obtient :

$$\frac{S'_5}{S_5} = \frac{10 + 2\sqrt{5}}{\sqrt{10-2\sqrt{5}} \times \sqrt{10+2\sqrt{5}}} = \frac{10 + 2\sqrt{5}}{\sqrt{100-20}}$$

$$= \frac{10 + 2\sqrt{5}}{\sqrt{80}} = \frac{10 + 2\sqrt{5}}{4\sqrt{5}} = \frac{5 + \sqrt{5}}{2\sqrt{5}} = \frac{\sqrt{5} + 1}{2}$$

$$S'_5 / S_5 = (\sqrt{5} + 1) / 2 \quad (21)$$

D'après la relation (21), le rapport du côté du pentagone étoilé à celui du pentagone régulier, est égal au nombre d'or.

## Suite de Fibonacci

En 1202, Fibonacci étudie la suite ordonnée des nombres telle qu'un terme quelconque de la suite soit égal à la somme des deux termes précédents.

En commençant par 1 et 1, on a :

1 1 2 3 5 8 13 21 34 55 89 144 233 ...

Fibonacci a montré que lorsque les termes deviennent très grands, le rapport d'un terme avec son précédent tend vers le nombre d'or, en l'encadrant successivement par défaut et par excès.

Dans la suite ci-dessus, on vérifie que les rapports

$$144/89 = 1,61797... \approx n$$

$$233/144 = 1,61805$$

Considérons la suite formée par une progression géométrique de raison  $r$  :

$$1 \ r \ r^2 \ r^3 \ r^4 \ r^5 \ r^6$$

Cette progression géométrique est de Fibonacci si la raison  $r$  est le nombre d'or  $n$ . On a alors :  $1 \ n \ n^2 \ n^3 \ n^4 \ n^5 \ n^6$

En effet, dans cette suite, on a bien  $n^2 = n + 1$  relation corollaire résultant de la définition du nombre d'or.

On a aussi  $n^3 = n^2 + n$ , car en divisant les 2 membres par  $n$  on a bien encore  $n^2 = n + 1$ , etc..

Considérons la suite :

$$... \ 1/n^5 \ 1/n^4 \ 1/n^3 \ 1/n^2 \ 1/n \ 1$$

On a encore  $1/n^3 = 1/n^5 + 1/n^4$ .

En effet, en multipliant les 2 membres par  $n^5$ ,

$$\text{on a bien : } n^2 = n + 1.$$

Cette suite est donc bien une suite de Fibonacci.

On a aussi :  $1 = 1/n^2 + 1/n$

En multipliant par  $n$ , on a

$$n = 1/n + 1$$

On a donc :

$$n + 1 = n^2$$

$$n - 1 = 1/n$$

qui sont bien les égalités établies comme corollaires de la définition du nombre d'or.

## Anciennes unités de mesure

Certaines anciennes unités de mesure de longueur, dans l'ordre croissant : la paume, la palme, l'empan, le pied et la coudée, se présentent curieusement comme les termes d'une suite de Fibonacci ayant pour raison le nombre d'or  $n$ . Parmi elles, la longueur la plus connue sinon la plus utilisée, le pied, est la sixième partie de la toise dont la longueur exprimée en mètres est 1,9490366, d'après la définition initiale du mètre de 1799. On en déduit :

$$1 \text{ pied} = 324,84 \text{ millimètres}$$

$$1 \text{ coudée royale} = n \text{ pied} = 525,60 \text{ mm}$$

$$1 \text{ empan} = 1 \text{ pied} / n = 200,76 \text{ mm}$$

$$1 \text{ palme} = 1 \text{ empan} / n = 124,08 \text{ mm}$$

$$1 \text{ paume} = 1 \text{ palme} / n = 76,68 \text{ mm}$$

Ces valeurs forment une suite de Fibonacci :

paume palme empan pied coudée

Il s'ensuit que l'on a :

$$1 \text{ coudée} = 1 \text{ pied} + 1 \text{ empan}$$

$$1 \text{ pied} = 1 \text{ empan} + 1 \text{ palme}$$

$$1 \text{ empan} = 1 \text{ palme} + 1 \text{ paume}$$

On peut représenter toutes ces longueurs au moyen d'un rectangle d'or ABCD (figure 8) dont le grand côté vaut une coudée et le petit côté, et dans lequel on a tracé EF pour former le carré ABEF d'un pied de côté et un rectangle d'or ECDF, puis de même GH pour former le carré ECGH d'un empan de côté et un rectangle d'or GDFH, et enfin IJ pour former le carré GDJI d'une palme de côté et le rectangle d'or IFHJ. On a ainsi :

$$BC = 1 \text{ coudée}$$

$$CD = 1 \text{ pied}$$

$$DF = 1 \text{ empan}$$

$$FH = 1 \text{ palme}$$

$$HJ = 1 \text{ paume}$$

Au Moyen Âge, de nombreuses applications du nombre d'or ont été utilisées, principalement en architecture. On a réalisé des spirales d'or construites d'arc de cercle s'inscrivant dans des rectangles d'or; en fait, ce sont de fausses spirales dans lesquelles la valeur du rayon vecteur ne progresse pas de façon continue. La mandorle romane s'inscrit dans un rectangle d'or, ce qui n'est pas le cas de la mandorle gothique. Le nombre d'or a été utilisé aussi dans l'architecture islamique. Enfin, pour la pyramide de Chéops, on aurait utilisé des propriétés du nombre d'or. ●

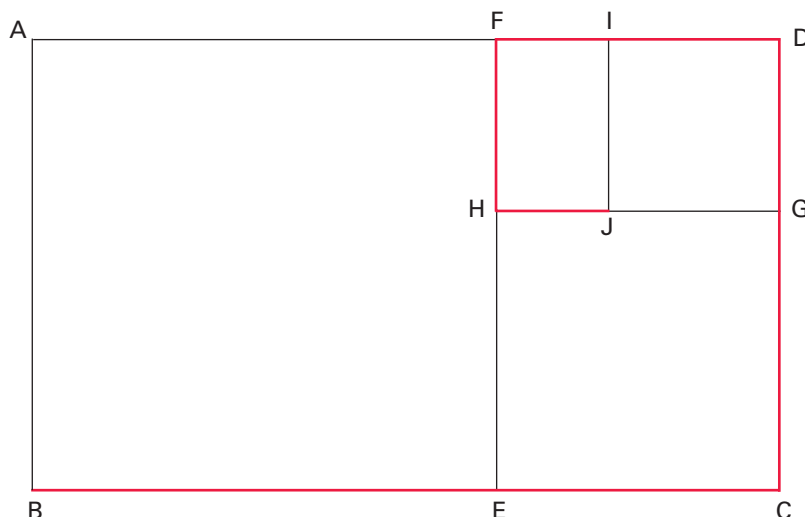
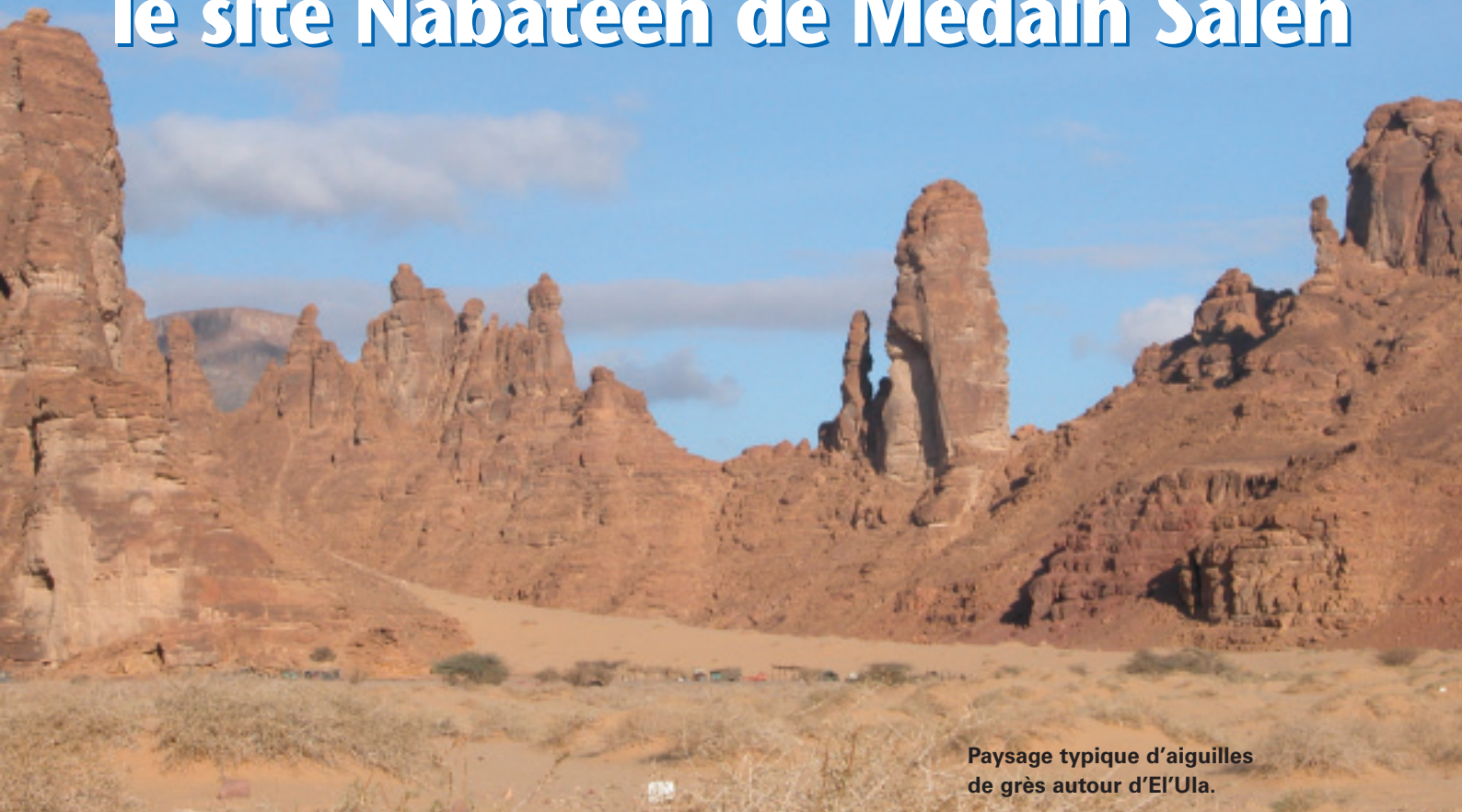


figure 8

# Archéologie en Arabie Saoudite

## le site Nabatéen de Medain Saleh



Paysage typique d'aiguilles de grès autour d'El'Ula.

■ Paul COURBON

*L'Arabie a une image négative auprès de nombreux occidentaux, pourtant, c'est un magnifique désert où l'hospitalité arabe est toujours vivace. L'auteur décrit toutes les disciplines abordées par une mission archéologique moderne et les tâches variées qui peuvent être confiées à un topographe-cartographe.*

**D**e nombreux occidentaux ont une image négative de l'Arabie. Il est vrai que vivre à Riyadh n'est pas très épanouissant pour une épouse qui ne peut conduire, qui ne peut sortir sans un foulard et une tunique noire et où il n'y a aucune possibilité de spectacle. Il n'est pas toujours facile de sup-

porter la chape de plomb d'un islam pur et dur.

Mais, l'Arabie n'est pas que la mégapole tentaculaire et aux dimensions inhumaines de Riyadh. C'est aussi et surtout le désert avec, souvent, des paysages hors du commun. Les rapports humains y redeviennent exceptionnels avec, comme dans tous les pays arabes, une hospitalité que nous avons perdue.

J'ai été cinq fois en Arabie. La première, en 1983, d'une manière inhabituelle, alors que je participais à la géodésie de deuxième ordre de la Jordanie et que nous observions des points proches de la frontière. A minuit, après les tours d'horizon au théodolite, l'équipe de géomètres jordaniens avec laquelle je travaillais avait tenu à rentrer de nuit. Fatale erreur nous nous étions retrouvés en Arabie où nous avons été interceptés par une patrouille militaire. Après le

thé rituel, nous avons été gentiment reconduits à un poste frontière! Ce n'était pas prévu, je n'avais pas mon passeport... et j'eus toutes les peines à rentrer en Jordanie, après quatre heures de palabres.

Je revenais peu de temps après, dans la province de Bureida, pour rattacher en altimétrie tous les forages et points d'eau sur lesquels le BRGM faisait une étude hydrologique, puis en 1984 pour implanter une route stratégique le long de la Mer Rouge. Le pays m'avait plu.

### le site Nabatéen de Medain Saleh

En 2003, j'étais contacté pour participer à une mission archéologique sur le site Nabatéen d'Hégra, aujourd'hui Medain Saleh. Ce site extraordinaire, situé au N.O. de l'Arabie, est le deuxième site nabatéen après Petra à 700 km de là.



■ ■ ■ Dans un paysage de montagnes de grès et de sable, les nabatéens ont sculpté les falaises de belles tombes monumentales. Le site avait été révélé au début du XX<sup>e</sup> siècle par les dominicains français Jaussen et Savignac de l'école biblique de Jérusalem qui avaient visité le Hijaz à dos de chameau et fait, de 1907 à 1910, une étude remarquable.

Depuis 2001, les archéologues français ont eu, à nouveau, accès à ce site. Financées par le Ministère des Affaires Étrangères et sous l'égide du Vice-Ministère saoudien des Antiquités et Musées, les missions sont dirigées par Laïla Nehme chercheur au CNRS qui a su se faire admettre auprès des Saoudiens par sa personnalité et sa connaissance parfaite de l'arabe. Les temps changent, comme l'a chanté Dylan, même en pays wahabite !

A ce sujet, il faut mentionner l'évolution des mentalités en Arabie où l'étude de la période pré-islamique est maintenant admise. Il suffit de visiter le très beau musée de Riyadh pour s'en convaincre. J'avais aussi été très surpris, en visitant le petit musée du département d'archéologie de l'Université de Riyadh où, dans les vitrines, figuraient des sta-

tuettes de l'époque hellénistique qui auraient été jugées impudiques et non montrables autrefois.

## Missions archéologiques

Après un passage à Riyadh, un trajet en avion pour Tabuq où nous louons trois véhicules tout-terrain, nous parcourons les 500 km nous séparant de la petite ville d'El'Ula, à 20 km du site. Là, nous sommes logés royalement dans le très confortable logement de passage du musée local.

L'archéologie a énormément évolué et les missions sont maintenant pluridisciplinaires. Dans la mission de 2003, outre les archéologues, figurent architecte, céramologues, épigraphes, géographe, spécialiste de la taille de la pierre, photographe et pour finir, topographes et géomaticien (autrement dit spécialiste du SIG). J'ai pour partenaire Jean-Claude Poyard des travaux spéciaux de l'IGN. Le géomaticien est Thomas Arnoux, un de mes anciens élèves du BTS topo. Je lui avais enseigné la géodésie, aujourd'hui il améliore mes connaissances en informatique et dans l'emploi des logiciels topographiques. A

68 ans, il est intéressant de côtoyer des jeunes comme Thomas Arnoux ou Jean-Claude Poyard. L'amour propre vous oblige à suivre et à vous adapter aux méthodes modernes, on a toujours une image à sauvegarder ! Ma carrière de terrain IGN avait commencé à la planchette !

Quand j'étais géomètre-expert et que j'avais équipé mon cabinet en DAO, j'avais envoyé mes employés faire un stage autocad. Trop pris par la gestion du cabinet, je n'avais pu y participer. Aujourd'hui, je comble mes lacunes !



**Le Qsar el Farid, livre de pierre ouvert sur le désert.**



**Diverses tombes nabatéennes.**



## Programme topographique de la mission

Une carte 1/1 000 du site avait été rédigée par l'IGN en 1978 à partir de photos aériennes 1/5 000. Mais, à l'époque, le GPS n'existait pas, il n'y avait pas de réseau géodésique dans la zone et cette carte était dans un système de coordonnées indépendant. L'altimétrie avait été rattachée à un repère de nivellement de la gare de chemin de fer du Hijaz située tout près du site.

J'ouvre une parenthèse sur ce chemin de fer extraordinaire aujourd'hui abandonné. Il avait été construit par les turcs et sous la direction d'un ingénieur allemand, entre 1907 et 1909. Il allait de Damas à La Mecque avec une bretelle allant vers Haïfa (aujourd'hui en Israël) pour les pèlerins arrivant par bateau. Dans la zone où nous sommes, le chemin de fer traverse des paysages extraordinaires, on a des réminiscences de la conquête de l'Ouest aux Etats-Unis et du film "Il était une fois dans l'Ouest" ! Les Saoudiens ont eu conscience du patrimoine qu'il représente et la gare de Medaïn Saleh a été complètement restaurée avec son fort, ses réservoirs d'eau, son atelier et tous ses bâtiments annexes.

Le premier travail est de rattacher la carte IGN à la projection UTM, car elle doit être intégrée dans un Système d'Information Géographique (SIG) géoréférencé. Il n'y a toujours aucun point géodésique dans la région. Il nous paraît donc suffisant de faire notre rattachement au GPS de poche. Cela d'autant plus, que de nombreux détails seront rajoutés sur le plan par des déterminations faites au GPS de poche. Avec une station totale placée sur un sommet proche du centre du site, nous déterminons une douzaine de points de la carte, dont le plus lointain est à 2,5 km. Cela nous permet de contrôler leur cohérence, de l'ordre de 20 cm. Ces douze points sont ensuite déterminés simultanément avec deux GPS de poche Magellan et LMR. Nous avons fait sur chaque point 4 à 6 doubles mesures, soit 8 à 12 mesures simples qui nous ont permis de déterminer un écart type de l'ordre de 3,3 mètres. La figure des points déterminés au théo-



© ph. Isabelle Sachet

**Un topographe spéléologue ne pouvait s'empêcher d'explorer l'un des nombreux puits creusés par les Nabatéens. En arrière plan, les prises creusées dans la paroi pour aller au fond de ce puits de 15 m.**



**Avec le géophysicien Jesus Jimenez, sur un site haut placé dont l'escalade et la descente nécessitent une corde d'assurance**

dolite étant considérée comme précise, donc indéformable, nous l'avons seulement faite ripper et légèrement tourner pour l'adapter au mieux aux points déterminés au GPS. Le résidu maximal est de 1,66 m.

Les 138 tombes monumentales ayant déjà été levées, nous devons relever toutes les tombes au sol, souvent parallélépipédiques creusées dans le sol rocheux ou sur les croupes rocheuses. Il y en aura 1400. Th. Arnoux et J.C. Poyard ayant pu codifier le levé, nous

avons mesuré 6000 points en cinq jours et demi ! Des p'tits points, des p'tits points, toujours des p'tits points, la chanson de Boris Vian est devenu celle des "poinçonneurs d'El'Ula" ! Nous implanterons encore un carroyage en vue des futures mesures électro-magnétiques pour déterminer la structure souterraine de l'ancienne ville d'Hégra.

En 2004, Laïla NEHME désire une cartographie du Jebel Ithlib, montagne de minarets de grès, qui a été frôlée par les





Aspect du Jebel Ithlib cartographié en 2004.

■■■ levers IGN. Elle regorge d'écritures et vestiges divers qu'il faut pouvoir situer sur un plan. A partir d'une image satellite Quickbird de résolution 0,6 m et des nombreux points déterminés sur le terrain, je vais faire une cartographie 1/1 000 de ce site spectaculaire. Ce sera mon travail principal, complété par quelques petits levers annexes.

Deux géophysiciens se sont joints à nous pour faire des mesures sur le carroyage implanté l'année précédente avec J.C. Poyard. L'image magnétique des murs enterrés est saisissante, faisant apparaître la structure de toute une ville invisible à l'œil nu. ●

## ABSTRACT

*Many occidental people have a negative idea from Arabia. However, it is a magnificent desert where the arabian hospitality is always strong. The author describes all the disciplines tackled by a modern archeological mission and the various working that a field-surveyor-cartographer has to do.*



Malgré les tout-terrain, il y a encore des chameaux en Arabie!

© ph. Isabelle Sachet



Jean-Claude Poyard dans ses œuvres.



## Épisode d'une compétition séculaire, engagée par la Papauté, rapidement conclu en 1494

### LE TRAITÉ DE TORDESILLAS

## un partage du monde entre Castille et Portugal riche d'enseignements

■ Vice-amiral Jean-Marie DAMBIER

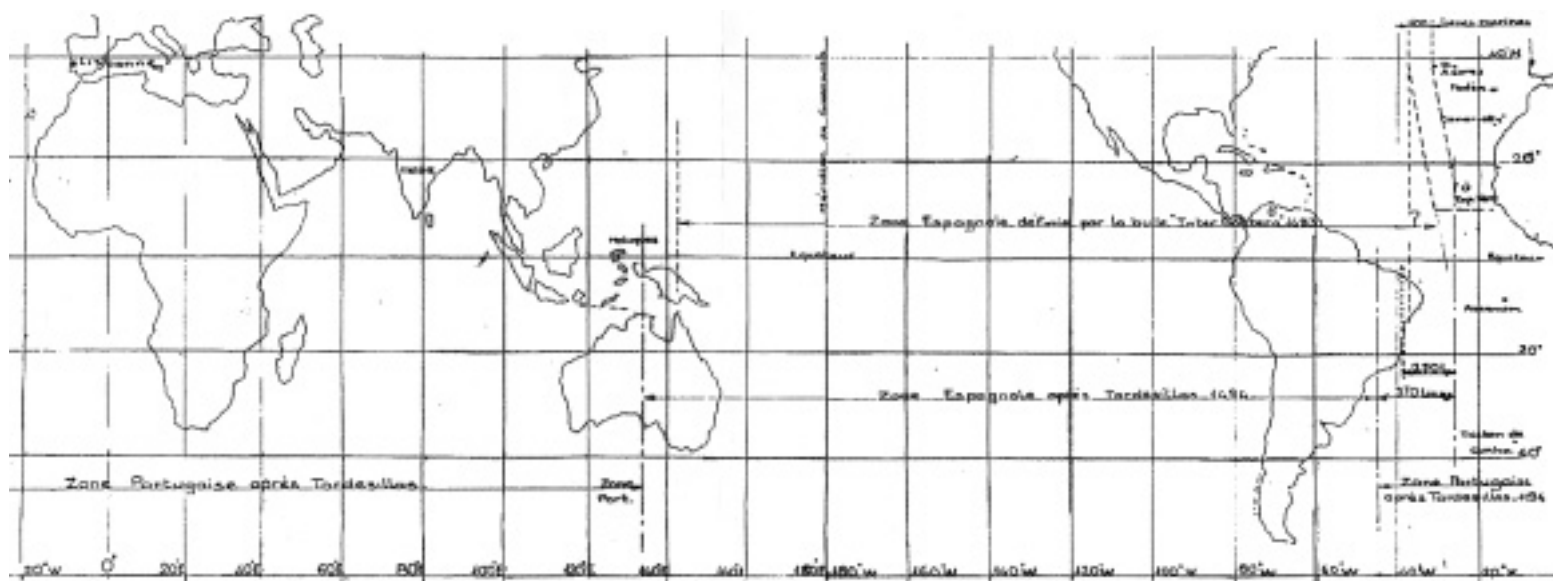
*Le 13 mars 1493, Colomb revient à Palos de son premier voyage et apporte au monde la nouvelle de sa découverte d'octobre 1492. Le 4 mai 1493, le pape Alexandre VI publie la deuxième bulle Inter Coetera II, qui partage les terres à découvrir entre les deux royaumes de Castille et du Portugal selon une ligne faussement appelée méridienne, à 100 lieues marines à l'Ouest de celle qui joint les Açores aux îles du Cap-Vert. À l'Est de cette ligne, les découvertes appartiendront aux Portugais, à l'Ouest aux Espagnols. Les Portugais demandent et obtiennent que cette ligne de partage soit repoussée à l'Ouest selon un méridien situé à 370 lieues marines des îles du Cap-Vert<sup>1</sup>. Sur ces bases, treize mois plus tard, le 7 juin 1494, le traité de partage est signé à Tordesillas, ville de Castille proche de Valladolid capitale de l'Espagne, et de Medina del Campo, résidence de la cour.*

**P**our notre époque contemporaine, submergée d'informations détaillées sur tout événement et nourrie de connaissances et de données géographiques, historiques et juridiques quasi-exhaustives, la rapidité d'élaboration de signature du traité de Tordesillas a de quoi surprendre. Pour ne prendre qu'un seul exemple, on peut

évoquer le traité du Droit de la Mer, signé sous l'égide des Nations-Unies à Montego Bay en 1982 après dix ans de négociations, encore en cours de ratification pour quelques pays, la France l'ayant ratifié en 1995. En fait, la rapidité de conclusion du traité de Tordesillas ne reflète que la partie émergée d'un antagonisme

séculaire qui oppose les politiques maritimes et commerciales de la Castille et du Portugal. En 1493-94, cet antagonisme trouve une issue passagère, où chacun des protagonistes pense en retirer avantage. Depuis 1415 et poursuivant les initiatives portugaises du XIV<sup>e</sup> siècle, l'infant dom Henrique<sup>2</sup> avait conduit jusqu'à sa mort

■■■



■ ■ ■ en 1460, une politique très confidentielle d'exploration maritime à objectifs commerciaux et religieux, d'abord dans la zone proche Atlantique puis plus lointaine vers l'Atlantique sud. Continué par dom Joao II dès son accession au trône du Portugal en 1481, ces explorations se heurtaient à la concurrence et à l'hostilité des Castillans dans les zones proches des côtes africaines. Ces derniers utilisèrent la réussite de Colomb pour faire reconnaître leur puissance maritime en demandant à la papauté la publication des bulles de mai 1493.

Pour démêler l'écheveau des négociations et expliquer leur rapidité, les conditions politiques dans la péninsule ibérique seront rappelées en cette fin du XV<sup>e</sup> siècle qui voit la montée et l'affirmation de la puissance des royaumes castillans et aragonais unis depuis 1479, face à un royaume portugais sur la défensive terrestre. Ce qui n'empêche pas ce dernier, bien au contraire, de préparer dans le plus grand secret et avec obstination depuis dom Henrique, un projet maritime et commercial destiné à s'assurer par le contournement de l'Afrique, le commerce des épices des Indes orientales au détriment des Vénitiens et de leurs fournisseurs égyptiens et arabes. Pour l'Espagne, ignorant ce projet ou ne pouvant en mesurer l'ampleur, la découverte et l'appropriation de nouvelles terres suffisaient car estimées proches de l'Asie et riches de métaux précieux. L'histoire des négociations ouvertes en 1493 seront ensuite décrites. Enfin, à partir des différents éléments récapitulés dans cette étonnante et instructive page d'histoire, les conceptions des "Grandes Découvertes" des deux royaumes, leurs connaissances géographiques réciproques dont celle du Portugal dans l'Atlantique sud couverte par le "sigillo" (le secret d'État des Portugais), feront l'objet de quelques déductions que rien n'atteste, mais que les péripéties des négociations de Tordesillas suggèrent.

(1) Voir planisphère de la carte 1

(2) À l'exemple d'Albert-Alain Bourdon dans l' "Histoire du Portugal" - Chandeigne 1994 -, les noms castillans sont francisés, ceux des Portugais sont conservés dans la langue maternelle afin d'éviter les confusions.

## La Société des Sciences Lettres et Arts (SSLA) de Bayonne a publié récemment (nouvelle série n°159 année 2004) une remarquable étude du vice-amiral Jean-Marie DAMBIER sur le Traité de Tordesillas.

La présidente de la Société et le vice-amiral Dambier ont aimablement autorisé l'Association Française de Topographie (AFT) à reproduire dans sa revue trimestrielle XYZ, les pages 34 à 37 de l'étude en question qui concernent :

- l'énoncé du célèbre traité de Tordesillas, voir ci-dessus.

L'article comporte en outre :

- un planisphère qui partage en 1493-94 les terres à découvrir entre le royaume de Castille et celui du Portugal,
- les chapitres qui suivent :
  - l'Histoire entremêlée des royaumes de Castille et du Portugal
  - les négociations connues du traité,
  - les conceptions des grandes découvertes des Castillans et des Portugais, leurs connaissances géographiques réciproques.

L'article se termine par une annexe donnant la chronologie des négociations du traité de Tordesillas.

Outre la planche I que nous avons reproduite, l'article contient quatre autres cartes.

- la carte II donne un schéma des alizés et des courants de l'Atlantique central et méridional et une carte d'Afrique où sont signalés les différents points atteints par les Portugais :

- le Cap Bojador, à la latitude 27°Nord,

atteint par Gil Eanes en 1434,

- le Fort Sao Jorge da Mina construit en 1482 à la latitude 7°Nord, à l'embouchure de la Volta,
- l'estuaire du Congo atteint en 1483, à la latitude 7°Sud, par Diego Cao,
- le Cap de Bonne Espérance atteint en 1487, à la latitude 35°Sud, par Bartolome Dias.
- la carte III représente le trajet suivi par Vasco de Gama de 1497 à 1499.
- la carte IV représente les "volte" dans l'Atlantique central et méridional.
- enfin la carte V est la reproduction de la carte de 1502 de Cantino, représentant une portion du Brésil, l'Atlantique central et méridional, la quasi totalité de l'Afrique ; c'est une carte à rumb avec plusieurs roses des vents.

Le méridien distant de 370 lieues marines des Iles du Cap Vert est plus exactement celui situé à 370 lieues marines de l'île St Antoine et correspond au méridien situé à 45° à l'Ouest du méridien de Greenwich (méridien du planisphère I).

L'infant Dom Henrique cité par l'auteur comme ayant depuis 1415 et jusqu'à sa mort en 1460 mené une politique d'exploration maritime à objectifs commerciaux et religieux est plus connu sous le nom d'Henri le Navigateur.

Raymond D'HOLLANDER

### Présentation de la Société Sciences Lettres et Arts de Bayonne

La S.S.L.A. de Bayonne, fondée en 1873, est la doyenne des associations bayonnaises. Lors de son cinquantenaire, elle créa le Musée Basque et de l'Histoire de Bayonne. Aujourd'hui, la collection plus que centenaire du bulletin de la S.S.L.A., à laquelle s'ajoutent les actes des colloques et congrès organisés par la S.S.L.A., constituent un fonds de 1680 articles ou volumes répartis en dix thèmes : préhistoire et protohistoire, histoire politique et régionale, histoire militaire et maritime, histoire religieuse, histoire économique, géographie, démographie, biographies, littérature linguistique, études basques, sciences, géologie, beaux-arts, archéologie, architecture, urbanisme, divers.

Ainsi, par des publications, conférences et congrès, la S.S.L.A. oeuvre-t-elle à l'avancement des sciences historiques et érudites locales et régionales, et à la vie culturelle de Bayonne et sa région.

**Internet :** adresse messagerie [scien.lettres.arts@wanadoo.fr](mailto:scien.lettres.arts@wanadoo.fr)

**site SSLA Bayonne :** <http://ssla.bayonne.monsite.wanadoo.fr>

Frédéric Bretar, dans le cadre de son de DEA en Epistémologie, Histoire des Sciences et des Techniques, a écrit et soutenu en 2004 un mémoire traitant "l'histoire de la détermination des longitudes de Ptolémée à Borda : Développements théoriques et mise en pratique. Application à la navigation". Ce document a paru particulièrement intéressant pour nos lecteurs férus d'histoire des sciences géographiques, et son auteur a bien voulu nous le présenter en trois publications successives, la première (ci-après) sera complétée par les deux numéros suivants de notre revue.

## Des Longitudes et des Mers : La genèse de la navigation (1/3)

■ Frédéric BRETAR

*Si l'histoire des latitudes brille de simplicité, celle des longitudes est longue, complexe et tortueuse. Elle est liée à l'histoire économique et politique de nos civilisations; elle marquera l'histoire des sciences. La première phase de cette histoire commence avec les travaux de Ptolémée et s'étend jusqu'au début du XVII<sup>e</sup> siècle. Si l'observation des éclipses de Lune permet dans certains cas de calculer une longitude, les navigateurs ne peuvent qu'estimer leur position principalement à cause des mouvements de leur navire ainsi que de la rareté de ces phénomènes célestes. On découvre au cours des siècles des méthodes et des instruments permettant d'observer les astres, qui mèneront à la détermination des latitudes. Le secret des longitudes reste cependant bien gardé, mais seulement pour un temps.*

**D**ans cet univers qui l'entoure, l'Homme, soucieux de maîtriser et de posséder la nature, fait de l'art de s'y repérer une évidence. Son univers, c'est d'abord notre terre, et nos mers. Comment trouver sa route à travers cet océan d'inconnus, une route, autre que celle du hasard ? Si l'Homme bâtit des villes, il construit et développe les réseaux qui les font vivre. Ce sont d'abord les routes, terrestres et maritimes, qu'il faudra découvrir puis perpétuer. La constitution de ce patrimoine géographique commence par la connaissance la plus précise (la position) et par la mémoire (la carte) de ces routes commerciales et souvent aventureuses.

Les voyages sur terre et sur mer sont nettement différents lorsqu'il s'agit de déterminer où l'on se trouve à un instant donné. Cette différence, de manière tout à fait triviale, vient du fait que les routes continentales sont jalonnées de repères facilement identifiables (moyennant l'expérience du voyageur) et surtout immobiles et pérennes. Ce n'est plus le cas lors des navigations hauturières où l'horizon se vide désespérément à mesure que l'on s'éloigne des côtes, ne laissant au navigateur au mieux qu'une ligne d'horizon, quand la brume ne couvre pas cette mince démarcation entre ciel et mer. Sur un océan hostile, comment déterminer sa position ? Comment éviter une côte dangereuse, comment, tout simplement, être certain de l'endroit où l'on va arriver après plusieurs semaines de navigation ?

Ce problème, dont la clé tourne aujourd'hui autour des trois lettres GPS, consistant à se repérer sur une grille de lignes imaginaires (les méridiens et les parallèles), provoqua, dans ses conséquences les plus dramatiques, un nombre de naufrages exceptionnel, prix qu'il fallut sans doute payer pour assister à l'écriture d'une des plus belles pages de l'histoire de la mécanique.

Si les premières longitudes furent données au premier siècle de notre ère, il faudra attendre une quinzaine de siècles pour que l'homme se penche à nouveau sur cette question, sans doute pressé par la menace politique et économique des siècles Renaissants. Le navigateur, lui, commence à s'éloigner des côtes, il finit par s'y perdre et succombe souvent aux assauts de son ignorance. C'est en levant les yeux au ciel que l'homme trouvera son salut. Le monde supra lunaire, incorruptible, parfait, sera bientôt le fil d'Ariane du pilote.

### L'enfance de l'art

Si l'histoire de la navigation n'est pas la plus vieille histoire du monde, elle s'en approche. Cette épopée, qui d'ailleurs ne cesse d'en finir, est l'histoire de notre relation à l'espace et au temps. C'est Ptolémée qui posa les jalons d'une cartographie

■■■



■ ■ ■ scientifique, d'une méthode permettant de repérer des lieux sur Terre à l'aide de coordonnées géographiques. Son œuvre est considérable. Il rassembla une quantité impressionnante d'informations lui permettant de fixer la position en longitude et en latitude de plus de 8000 points sur la surface de l'oikumène. Son apport principal fut sans doute la fixation du méridien passant par les îles Fortunées<sup>1</sup> comme méridien origine à partir duquel seraient mesurées d'ouest en est toutes les longitudes terrestres.

Dans sa Géographie, Ptolémée déclare que pour dresser une carte du monde habité aussi fidèle que possible, il faut s'appuyer en premier lieu sur les récits des voyageurs dans leur tour du monde, mais en recourant aussi aux services de la géométrie et surtout de l'astronomie. La méthode consistant à utiliser les éclipses de Lune<sup>2</sup> fut découverte par Hipparque (190-120 av. JC), après avoir jeté les bases du calcul trigonométrique utile pour l'établissement des cartes géographiques. Cette méthode consiste en l'observation d'une même éclipse de Lune en deux lieux distincts, la différence des heures locales en ces lieux donnant la différence de longitude<sup>3</sup> terrestre. Ainsi, calculer une longitude consiste à

- observer un phénomène céleste sous un méridien de référence
- observer ce même phénomène sous un autre méridien et noter l'heure locale correspondante

À l'emploi de cette technique sont associés deux inconvénients majeurs : le premier est celui de la rareté de ces phénomènes célestes (on compte deux voire trois éclipses par an, parfois aucune). Il faut donc n'en manquer aucun et les prévoir longtemps à l'avance pour organiser l'observation. Le second inconvénient, peut-être le plus problématique, vient du fait qu'il est difficile de désigner un instant particulier lors d'une éclipse. Qu'est ce que le début, le milieu, la fin d'une éclipse ? Il peut varier de plusieurs minutes en fonction des observateurs, et influence directement la lecture de l'heure locale, donc la différence de longitude. Ce sera cependant la seule méthode pour trouver l'heure du méridien local au cours des 1600 prochaines années.

## Quand le navigateur célèbre l'estime

Si à terre les distances peuvent être décomptées en journées de marche, il n'en est pas de même pour les voyages en mer où les aléas météorologiques sont trop présents et trop nombreux pour définir de manière assurée les distances et les directions qu'un navire doit prendre pour se rendre d'un point à un autre. La navigation n'est pas chose aisée car les cartes marines sont partiellement fausses, quand elles existent<sup>4</sup>. Les navigateurs ont alors recours au plus traditionnel des moyens de navigation en mer, qui d'ailleurs restera utilisé officiellement jusqu'au XIX<sup>e</sup> siècle, et constitue à vrai dire encore de nos jours la base de l'intuition et du bon sens du marin-pilote. Il s'agit de l'estime.

Le suivi de la position et la détermination de la route du navire ne va pas sans poser de sérieux problèmes tant les deux paramètres (le cap et la vitesse) sont sujets à caution. Le premier

est donné par la boussole, le second par le loch. Les propriétés (plus exactement l'existence) du champ magnétique terrestre sont connues depuis le milieu du premier millénaire. Mais c'est à la fin du XI<sup>e</sup> siècle que l'instrument indiquant la route fit son apparition dans le bassin méditerranéen. Les débuts de la boussole sont modestes : une aiguille aimantée enfilée dans un fétu de paille flottant sur un peu d'eau. L'aiguille fut ensuite montée sur un pivot, puis fixée à une rose divisée en huit, bientôt seize et trente-deux rhumbs. L'ensemble, enfermé dans un habitacle et suspendu pour éviter les mouvements de la plate-forme, constitue à la fin du Moyen Âge le compas qui permet désormais aux marins de suivre une route déterminée.

Le principe du loch est très simple. Il consiste à laisser filer une pièce de bois (qui devient un point fixe si la mer n'a pas de mouvement propre) attachée à une corde (sur laquelle des nœuds ont été fait à distance constante) à la poupe du navire pendant un temps donné, puis de convertir cette longueur filée en vitesse "instantanée" (la vitesse est donnée en nombre de nœuds). Notons qu'il s'agit effectivement d'estime, c'est à dire que les mesures effectuées sont entachées d'erreur qu'il n'est pas possible de mesurer directement. Les incertitudes sur la vitesse peuvent être significatives pour trois raisons : d'une part, la longueur des intervalles entre les nœuds peut varier en fonction de l'habileté du pilote et des corrections apportées. En effet, pour corriger son estime, le pilote pouvait modifier son instrument de mesure en changeant la longueur inter nœuds de la ligne de loch. D'autre part, la ligne de loch mesure la vitesse du navire à la surface de l'océan et ne permet pas de dissocier la vitesse par rapport au fond de la vitesse des courants marins. La pièce de bois attachée à l'extrémité de la ligne de loch, sensée être immobile par rapport à la Terre, ne l'est justement pas à cause des courants. Diverses améliorations seront proposées au cours des siècles, notamment par Bouguer. Enfin, la mesure de la demie minute au cours de laquelle on laisse filer la ligne de loch, peut être problématique compte tenu de l'utilisation du sablier (ampoulette) plus ou moins bien étalonné. Il arrive en effet très fréquemment que l'écoulement du sable soit gêné par une humidité trop importante, par le rétrécissement ou l'agrandissement du trou par lequel il passe. Cela conduit à des erreurs de plusieurs secondes dans le temps d'écoulement.

Nous venons de le voir, piloter un navire, avant toute théorie, nécessite un sens pratique fortement développé et surtout une longue expérience. En somme, une connaissance de l'en-

1 Rappelons que certains anciens tenaient les îles Fortunées, qui correspondent aux îles Canaries, pour le lieu du Paradis terrestre.

2 conjonction du Soleil, de la Terre et de la Lune, l'ombre de la Terre se déplaçant à la surface de la Lune.

3 Puisque la Terre effectue une rotation de 360° en 24 heures, elle parcourt 1° en 4 minutes, soit 15° en une heure. Les degrés d'angle, que sont les longitudes, peuvent donc être exprimées sous forme d'une période de temps.

4 Guillaume de Nangis fait référence à une carte marine présente sur le navire génois qui mène Saint Louis à la deuxième croisade en 1270.

vironnement sur lequel on se déplace est indispensable, il faut connaître les courants et les vents dominants, ainsi que les côtes sur lesquelles on va atterrir. Mais avant que l'expérience ne s'acquiert et ne se diffuse, commence une période d'exploration, plus ou moins aventureuse. Nous sommes au début de l'ère des Grandes Découvertes.

## Ballades sur les mers salées au XV<sup>e</sup> siècle

Le commerce maritime est au cœur du développement des pays européens. La puissante ligue Hanséatique a la maîtrise de la mer Baltique et du Nord ; elle connaît un essor tout à fait exceptionnel au XIV<sup>e</sup> siècle et installe de nombreux comptoirs dont Bergen, Brugge, Lübeck, Hambourg, Riga, Danzig, Londres...

Au début du XV<sup>e</sup> siècle, le commerce entre l'Europe et l'Asie emprunte les routes de la mer noire et de la Méditerranée et est principalement le monopole des républiques italiennes mercantiles de Gênes et de Venise. A l'écart de ces marchés, les portugais se tournent progressivement vers les mers du Sud<sup>5</sup>. Après un premier échec en 1433, Gil Eanes, un écuyer portugais de petite noblesse, franchit en 1434, le cap Bojador (cap de la Peur") au large du Sahara. Au cours des années précédentes, les portugais ont repéré et exploré les archipels atlantiques des Canaries, de Madère et des Açores. À cette époque, le Portugal traverse une période de marasme économique et l'appât de l'or du Soudan pousse à d'importantes prises de risque sous l'égide du prince Henri le Navigateur (1394-1460), qui met au service de l'entreprise de conquête et de colonisation une partie du poids immense de l'État portugais. La progression maritime vers le sud, destinée à contourner l'Islam maghrébin qui joue le rôle d'intermédiaire dans les échanges entre les richesses d'Afrique noire et l'Europe, se heurte cependant à des courants marins contraires, trop violents pour être franchis à la rame (en complément de la voile unique). Le passage du cap Bojador nécessite en effet de s'éloigner à la limite de la visibilité (plus de 40 km) des côtes sahariennes. Cette esquisse de navigation hauturière à la voile rompt avec la tradition du cabotage. Cette avancée ouvre une porte sur le monde de l'Afrique noire avec, dès 1445, le passage du cap Vert et l'arrivée à l'embouchure du Sénégal. En 1471, ils franchissent l'équateur, et en 1485, Barthélemy Diaz double le Cap de Bonne-Espérance. Avec Christophe Colomb en 1492 et Vasco de Gama en 1498, les navigateurs espagnols et portugais naviguent en haute mer pendant des semaines avec comme seul horizon la frontière du ciel et de l'océan. Privé de tout repère terrestre, ces voyages ont forcé les marins à observer le ciel, la position des étoiles et la course du soleil, en complément de la navigation à l'estime.

Considérer la navigation sous ce nouveau point de vue ne nécessite plus seulement une expérience pratique (au moins en amont de la mesure de la longitude et de la latitude). Si l'on veut se repérer, il faut savoir repérer les astres le plus précisément possible. D'abord ceux appartenant à la sphère des fixes, qui depuis Aristote sont immuablement sans mouvement, puis, plus tard, les astres errants, les planètes. Le côté proprement savant et théorique des méthodes de navigation

astronomiques qui feront leur apparition au cours des siècles suivants vient de cette rencontre entre les pérégrinations hauturières des hommes et leur regard vers cet océan céleste, salvateur celui-là.

## Le temps des premières latitudes

La pseudo-fixité de l'étoile Polaire est déjà utilisée par les Vikings pour se repérer dans les mers du nord connues pour leurs vents instables et leurs brumes dangereuses. Mais c'est le fruit des réflexions des mathématiciens réunis autour du roi Jean II (1455-1495) qui menèrent au moyen de calculer la latitude d'un lieu quelconque grâce à l'astrolabe.

Pour déterminer sa latitude dans l'hémisphère Nord et la nuit, il suffit au marin de mesurer la hauteur de l'étoile Polaire. Il n'en est pas de même le jour et surtout lorsque les navigateurs abordent l'hémisphère austral. Pour connaître sa latitude par observation du Soleil, il ne suffit pas de mesurer sa hauteur au-dessus de l'horizon. Il faut connaître sa déclinaison<sup>6</sup>. Si elle est constante pour les étoiles fixes quelque soit le lieu depuis lequel on les observe, celle du Soleil varie avec chaque jour de l'année. De la comparaison de sa déclinaison avec sa hauteur méridienne<sup>7</sup>, résulte la hauteur de l'équateur dont le complément est la latitude. Des tables de la déclinaison du Soleil sont progressivement calculées, les premières par l'astronome juif Abraham Zacuto (1452-1515) entre 1473 et 1478. Rassemblés dans son œuvre principale *Ha-Hibbur ha-Gadol*, elles seront à la base des *Regimentos do Astrolabio do Quadrante* (Régiments pour l'astrolabe et le quadrant) préparés par les mathématiciens portugais pour les navigateurs et utilisés pour calculer les latitudes. Dès lors, on n'hésite plus à s'éloigner des côtes.

## L'astrolabe traditionnel se perfectionne rapidement

Il est souvent remplacé par le quadrant, quart d'astrolabe muni d'un fil à plomb. Plus simple, plus léger, le quadrant est un quart de cercle taillé dans du bois ou dans une plaque métallique, gradué sur la couronne de 0° à 90°. Il porte deux viseurs fixés sur un des côtés et un fil à plomb. On observe l'astre grâce à deux pinnules placées aux extrémités d'un des deux rayons perpendiculaires. La position du fil à plomb sur l'arc gradué indique la hauteur de l'astre au-dessus de l'horizon. À côté de ces instruments fondés sur la graduation du cercle, les marins portugais en utilisent d'autres reposant sur les rapports entre les angles et les longueurs.

L'arbalestelle, ou arbalète ou encore "bâton de Jacob", est for-

■■■

5 Ne disposant pas d'une flotte particulièrement développée, la couronne portugaise a embauché des pilotes génois. Christophe Colomb était lui-même génois. Il se mit au service des Rois catholiques Isabelle de Castille et Ferdinand d'Aragon pour les aider à construire une marine afin d'assurer son expédition dont le financement avait été refusé par Jean II, Roi du Portugal de 1481 à 1495.

6 Distance à l'équateur céleste.

7 Observation de la hauteur du Soleil à son passage au méridien, au midi local.

■ ■ ■ mée d'une règle d'environ un mètre de long. Sur celle-ci sont gravées des graduations et autour d'elles coulisent un ou plusieurs "manteaux". On fait glisser le manteau pour que sa partie inférieure finement biseautée soit en contact avec l'astre observé. Le rapport entre la hauteur du manteau et la longueur de la tige donne la hauteur de l'astre. Il faut donc à la fois que l'observateur regarde en même temps et l'horizon et l'astre, ce qui est guère facile, et maintienne le manteau dans le plan vertical. En fait, l'arbalète ne permettait pas une mesure très précise car il y avait du fait même de la position de l'œil de l'observateur une erreur de parallaxe. Malgré tout, elle fut utilisée sur certains navires jusqu'au XVIII<sup>e</sup> siècle.

On voit apparaître dès la fin du XVI<sup>e</sup> siècle un instrument qui sera largement diffusé auprès des navigateurs. Il s'agit du quartier de Davis. Cet appareil était constitué d'une règle sur laquelle étaient montés deux arcs de cercle. L'arc de cercle supérieur portait une graduation jusqu'à 60°, l'arc de cercle inférieur une graduation de 30°. Sur ces deux arcs, deux pinnules coulissaient. L'observateur mesurait la hauteur du soleil en tournant le dos à ce dernier. Les rayons du soleil passaient à travers la pinnule de l'arc du cercle supérieur et venait éclairer une fente horizontale située à l'extrémité de la règle. Dans le même temps, l'observateur visait par la pinnule de l'arc de cercle inférieur l'horizon à travers cette fente. La hauteur du soleil était obtenue en additionnant les deux lectures faites sur les arcs de cercle.

La diffusion de ces instruments auprès des pilotes achève l'histoire des latitudes. Les siècles suivants amélioreront la précision des mesures d'angle, notamment en utilisant les propriétés de la double réflexion de l'octant.

L'espace semble réduit à une unique dimension, puisqu'il n'est toujours pas question de calculer une longitude à bord d'un navire, faute de méthode et de moyen. Les navigations vers le Nouveau Monde sont pourtant en plein essor.

## Une navigation à une seule dimension

Au cours du XVI<sup>e</sup> siècle, le commerce entre l'Europe, le Nouveau Monde et les Indes s'organise.

La Compagnie Hollandaise des Indes Orientales est créée en 1602, celle des Indes Occidentales en 1621. Les voyages transatlantiques se multiplient avec des chargements de plus en plus précieux. Après la mise en exploitation des mines de Potosí, vers 1545, les galions espagnols reviennent chargés d'or et d'argent (la production annuelle des mines d'Amérique atteint alors environ 267 000 kg d'argent et 5 400 kg d'or, alors que l'Europe ne produit, par an, que 60 000 kg d'argent et moins de 1 000 kg d'or). C'est aussi à partir de 1538 que le commerce espagnol prend un aspect triangulaire. En effet, les navires se rendent d'abord sur la côte d'Afrique, où ils échangent une partie de leurs marchandises contre des Noirs qu'ils vont vendre comme esclaves en Amérique.

Ces navigations pouvaient durer plusieurs mois. Tant qu'elles avaient lieu suivant un cap Nord-Sud (longitude constante), on pouvait faire le point grâce à la Polaire, ou

grâce au Soleil. Mais quand il s'agit de naviguer dans la direction Est-Ouest (partie orientale du cap de Bonne Espérance, et navigations vers les Amériques), on ne peut pas directement appliquer les mêmes méthodes. Les navigations se font donc suivant un parallèle constant. Pratiquement, les navires se mettent à la latitude du point d'arrivée et font route à latitude constante (vérifiée le plus souvent possible par la prise de hauteurs du Soleil, ou d'étoiles).

En ce qui concerne les traversées de l'Atlantique, la navigation à latitude constante est facilitée par l'existence de vents dominants et réguliers. Les Alizés, couloir météorologique centré sur l'équateur, portent les navires des îles Canaries vers les Antilles. Cette navigation "au portant" reste beaucoup plus confortable que les traversées en provenance du Nouveau Monde où le couloir des vents d'Ouest dominants (dans l'Atlantique Nord) est beaucoup plus large que celui de la route des Alizés. Il arrive souvent qu'il trompe les marins croyant arriver à l'embouchure de la Loire alors qu'ils sont en Espagne ou au Portugal. Les conséquences peuvent en être fâcheuses, surtout en temps de guerre.

Près de seize siècles se sont écoulés depuis Hipparque et Ptolémée, seize siècles de développement, mais aussi de rudiments méthodologiques pour trouver sa position sur notre globe. Les éclipses de Lune sont au XVI<sup>e</sup> siècle le seul moyen permettant de calculer une longitude. Or la rareté de ces phénomènes en fait un moyen peu praticable pour les centaines de navires présents chaque année sur les océans. Si les marins ont su adapter leur méthodes de navigation aux connaissances de l'époque, il n'en reste pas moins que la connaissance de la seconde dimension est de plus en plus pressante. Les instabilités du pont d'un navire ajoutent à la complexité du problème de la détermination des longitudes, dont les bases apparaîtront au début du XVI<sup>e</sup> siècle.

## Les premières théories astronomiques

En ce XVI<sup>e</sup> siècle renaissant, on ne peut toujours pas parler de navigation astronomique, comme nous l'avons vu, bien que l'on sache déterminer la latitude par observation de la hauteur de l'étoile Polaire et du Soleil. Les premiers explorateurs ont essayé de déterminer leur longitude de manière astronomique. Christophe Colomb emporta les tables de Regiomontanus<sup>8</sup> qui lui permirent, lors d'une relâche à Hispaniola (Haïti) le 14 septembre 1494 d'observer une éclipse de Lune. La fausseté des tables et l'imperfection des observations ne donne aucune validité à la valeur trouvée, 23° degrés plus à l'ouest de la véritable position. Magellan quant à lui observa, lors de son quatrième voyage, une éclipse de Soleil à Saint-Julien d'où il avança une longitude

8 Ces tables, dans la lignée des tables Alphonsines achevées en 1252, prédisent la position des planètes, de la Lune, du soleil et des étoiles de 1475 à 1506. Elles sont établies suivant le système géocentrique de Ptolémée. Les éclipses de Lune y sont particulièrement décrites.



de 61° à l'Ouest de Séville, plus de 40° à l'ouest de sa position effective.

C'est en 1514 que Johann Werner de Nuremberg (1468-1522), dans une nouvelle traduction du premier livre de la Géographie de Ptolémée propose une nouvelle méthode pour la détermination des longitudes: la méthode des distances lunaires. En quoi consiste elle ? En une lunaison (29 jours 1/2), la lune se déplace d'est en ouest, à raison d'un peu plus de 12 degrés par jour, sur fond d'étoiles (zodiacales). Le satellite de notre planète peut donc servir d'horloge grâce à sa distance angulaire aux étoiles proches de sa trajectoire. Ainsi, une fois la distance vraie d'une étoile à la lune mesurée, il n'y a plus qu'à chercher cette même valeur angulaire dans des tables afin de savoir à quelle heure elle est observée au méridien origine. La différence entre ce temps et l'heure locale au moment de l'observation sera la longitude cherchée. Tout ce qui reste à faire (!) est d'établir des éphémérides de qualité.

Malgré la pertinence de sa méthode, ce n'est pourtant pas Werner qui la diffusa. Dans sa traduction de 1553 de la Cosmographie de Peter Apian (1495-1552), Gemma Frisius (1508-1555), médecin et mathématicien d'Anvers, nous explique en détails le fond de la méthode, et illustre ses propos de dessins nous montrant de manière claire comment on doit faire pratiquement pour observer des distances lunaires.

Nous verrons (dans un prochain article) qu'effectivement la méthode des distances lunaires sera le moyen astronomique pour déterminer la position d'un navire au milieu de l'océan. Elle devra cependant attendre encore deux siècles pour pouvoir être pratiquée (par un nombre restreint de pilotes) simplement parce que le mouvement de la Lune, ainsi que les positions des étoiles fixes ne sont pas connus avec assez de précision. Le problème des tables rassemblant le mouvement précis de la Lune sera au cœur des préoccupations astronomiques du XVIII<sup>e</sup> siècle.

Si Gemma Frisius ne fut pas l'inventeur de la méthode des distances lunaires, il semble cependant que ce soit le premier à proposer la méthode des garde-temps dans son ouvrage *De Principiis Astronomiae Cosmographicae* publié à Louvain en 1530. Cette méthode consiste à comparer l'heure fournie par une montre portable à celle de l'heure locale observée grâce à un astrolabe, après avoir "cheminé 15 ou 20 lieues". En apparence fort simples, les recommandations de Gemma Frisius présupposent la possession d'un garde-temps fiable quelque soient les conditions de stabilité, ce qu'il suppose être le cas des horloges portatives qui apparaissent en effet à cette époque. La fiabilité ici implique tout à la fois un fonctionnement rigoureux des mouvements mécaniques horlogers et une continuité sans faille de l'opération de mesure. Cette dernière condition ne sera remplie qu'avec l'invention de remontoirs à pression, de remontoirs d'égalité au XVII<sup>e</sup> siècle. Comme sa concurrente, la méthode des chronomètres ne peut être utilisée à cause de problèmes techniques insolubles à l'époque.

## Une méthodologie encore timide

L'état théologique de la science des longitudes prend progressivement fin, même si on ne sait pas encore les calculer précisément. Les instruments de mesure, sans être encore assez précis, sont néanmoins largement opérationnels et répandus. La navigation reste une pratique rudimentaire qui se base avant tout sur l'expérience du pilote, sur sa connaissance de la mer et ses anticipations. On voit émerger les deux grandes branches qui mènent à la résolution du problème des longitudes.

Elles ne restent que potentielles. D'une part, l'astronomie ne connaît pas assez bien son objet. Les étoiles restent collées à la sphère des fixes, le Soleil et les planètes tournent encore autour de la Terre. Comment, dans ces conditions, prédire avec suffisamment de précision le passage de la Lune sur le fond d'étoiles ? D'autre part, les gardes temps battent tout juste la seconde à l'aide de lourds contrepoids, qui d'abord, ne sont pas transportables, mais surtout ne garantissent pas la régularité nécessaire à l'observation céleste précise.

L'union semble néanmoins consommée entre pratique maritime et théorie astronomique. L'homme va construire son temps et y subordonnera tout le reste. ●

## Contact

**Frédéric BRETAR**

Institut Géographique National

Laboratoire MATIS

Mail: Frederic.Bretar@ign.fr

## Bibliographie

**Bretar, F.** *Histoire de la détermination des longitudes de Ptolémée à Borda: Développements théoriques et mise en pratique.*

*Application à la navigation.* Mémoire de DEA Epistémologie, Histoire des Sciences et des Techniques, 2004.

## ABSTRACT

*The history of longitudes is not as simple as the latitude's one. It is nearly related to the economical and political history of our civilisations. It will mark the history of sciences. The first stage of this history starts with the work of Ptolemy and lasts until the beginning of the 17th century. Even if the observation of eclipses of the Moon may allow to calculate a longitude, the sea pilots used to practice the famous dead reckoning navigation technique. As the centuries go along, we discover new methodologies and new instruments to observe the stars, which leads to the determination of latitudes. The secret of longitudes will still remain hidden, but just for a while.*



# Madagascar quand tu nous tiens...

■ Damien BREGLER - Henri DE SAINT SERNIN

*Pour la seconde année consécutive, les étudiants d'ESGT-International, devenue Géo-Topo International, ont foulé le sol du continent rouge. Les travaux topographiques de 2003 assurant l'implantation de réseaux en eau potable ont été finalisés et de nouveaux villages ont vu les géomètres à l'œuvre. Cependant cette année fut nouvelle en son genre : parallèlement à la continuation des travaux de 2003, un nouveau projet est né à Tananarive. Les dix étudiants de l'ESGT ont concrétisé leurs missions en ayant à leur côté l'aide et la bonne humeur de leurs homologues malgaches.*

**A**vant notre départ tout a été préparé pour impliquer les étudiants ingénieurs géomètres malgaches et l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (ESPA) s'est ouverte à nos propositions. L'enthousiasme des deux côtés de l'équateur a fait en sorte que la motivation de tous été à son comble.

Deux équipes se sont formées sur place : la première logée à la même enseigne que l'équipe de 2003, dans les locaux de la congrégation des sœurs du christ à Fianarantsoa et la seconde basée sur le campus, accueillie gracieusement par l'administration de l'école.

Sur la route conduisant aux hauts plateaux de la région centre de l'île, deux étudiants du campus, Klark et Hervé, ont prêté main forte à la première équipe. C'était l'occasion inespérée d'accomplir ensemble une mission d'ordre humanitaire. La participation aux travaux d'adduction en eau potable fut enrichissante à tous les niveaux. Ils ont eu l'occasion d'appliquer sur le terrain leurs connaissances, mais aussi de prendre conscience



de la situation du pays. Ce fut pour eux une réelle découverte de voir que le métier de Géomètre peut s'insérer dans une mission de développement et contribuer à l'amélioration des conditions de vie des habitants. Nous sommes tous très heureux que cette implication ait eu du succès. C'est par ce comportement que nous espérons une sensibilisation de tous les étudiants dans les années à venir sur l'importance de leur métier face aux problèmes sanitaires et à l'importance de l'investissement que constitue la desserte en eau et ses préalables comme la topographie illustrant ce proverbe malgache "Tsy mahafoy vola hamidy takotra, ka manta vary. Qui ne veut pas dépenser de l'argent pour acheter un couvercle de marmite mange du riz mal cuit". De plus, nous nous sommes rendu compte que la participation des deux écoles a largement favorisé les échanges avec les autochtones. Les barrières de la langue sont vite tombées et ce, par la contribution généreuse des étudiants de l'ESPA : ils ont participé à de nombreux échanges interposés. Ceci nous a fait découvrir, autour de repas composés de patates douces et de manioc, la situation dans laquelle les paysans de la commune d'Alakamisy-Ambohimaha et des autres communes en général vivent. ●



# Auguste Herbin :

■ Jean-Pierre MAILLARD

## Le musée "Art et géométrie" existe et on peut le visiter au Cateau-Cambrésis

Certes il est plus connu sous le nom "Musée Matisse" tant est grande la renommée du plus illustre des enfants de la cité du Nord et importante la collection qu'il lui a léguée en 1952. Ce premier fond a d'abord été présenté dans l'Hôtel de ville dont le premier étage constituait le musée d'origine. En 1954 il s'est enrichi d'une deuxième donation effectuée par Auguste Herbin, maître reconnu de l'abstraction géométrique, également natif du Cambrésis. Les œuvres d'Auguste Herbin étaient alors accrochées dans la salle des mariages. En 1982, lors du transfert du musée dans le Palais Fénélon, l'ancienne résidence des Archevêques de Cambrai, la famille Matisse doubla la collection. En centre ville, cette belle bâtisse du XVIII<sup>e</sup> siècle construite sur les plans de Théodore Brongniart est aussi appréciée pour son parc dessiné par Le Nôtre. Grâce à sa récente départementalisation, le Musée Matisse a franchi une nouvelle étape de son évolution. Rénové, agrandi par les architectes nancéens Emmanuelle et Laurent Baudoin l'édifice expose désormais ses collections mises en valeur dans des espaces aménagés du dernier cri et ce depuis la réouverture du Musée Matisse intervenue à la fin des travaux, en novembre 2002. A son tour, le parc doit être prochainement reclassé dans le domaine départemental. Sa remise en état inclut d'ailleurs la création d'un jardin des sculptures. Nul doute que le Palais Fénélon retrouvera assez vite l'ensemble de son prestige passé. Les salles réservées aux œuvres d'Auguste Herbin et celles affectées aux expositions temporaires dédiées à la non-figuration constituent un centre d'art contemporain significatif et résolument "Art et géométrie".

Ainsi, récemment, le musée du Conseil général du Nord accueillait une exposition dénommée "Sur la ligne" qui présentait des artistes actuellement défen-



© ADAGP - Florian Kleinfenn

du par la galerie Denise René dont Geneviève Claisse, la propre et unique petite-nièce d'Auguste Herbin, déjà présente dans les collections du musée. Cette exposition a mis en évidence que Geneviève Claisse et les autres créateurs reconsidèrent le vocabulaire conventionnel de l'abstraction géométrique à travers une utilisation novatrice de la couleur, de la lumière, du son, de la calligraphie ou du collage.

## "Joie"

Par sa dimension, 3, 50 m x 5, 60 m, "Joie", le vitrail d'Auguste Herbin est l'œuvre la plus conséquente du musée et par définition la plus inamovible. Assemblé par le maître verrier Luc-Benoît Brouart, il comprend 104 éléments de 13 couleurs différentes et a la particularité d'être constitué de très grandes surfaces d'un même ton, ce qui est d'ailleurs une première. Les



# la "Joie" et la peine

verres choisis sont ce que l'on appelle du "verre antique" soufflés au manchon au bout d'une canne et rabattus à plat. A dominante rouge, jaune et vert la réalisation combine les formes géométriques de base, chacune d'une couleur unique, ordonnées par une quasi-symétrie. L'inclinaison du seul triangle ni isocèle ni rectangle, donne une profondeur à la composition. Selon l'artiste, il faut que le spectateur s'aventure dans la couleur. Il lui faut en choisir une puis l'apprécier par rapport à son environnement. C'est ainsi de multiples approches qui sont possibles avec autant de visions différentes du vitrail. L'artiste explique son travail par la mise en œuvre d'un système de correspondance de chaque lettre de l'alphabet avec une figure géométrique, une couleur et même une ou plusieurs notes de musique. Le titre du sujet, "Joie" en l'occurrence, génère toutes les combinaisons de la concordance des lettres du mot avec les formes et les couleurs associées. Cette clé n'est pas d'une lecture aisée et ne pas la posséder n'empêche en rien d'apprécier le résultat dans sa globalité.

Le musée possède le deuxième état du vitrail. Le premier a été offert en 1957 par Auguste Herbin lui-même à l'école primaire du Cateau-Cambrésis qui porte son nom. En effet, à l'occasion d'un grandissement du groupe scolaire, il a répondu favorablement à la sollicitation de l'architecte Ernest Gaillard. Le cadeau est considérable car l'auteur a payé sur ses propres deniers la totalité des travaux, notamment la prestation du maître verrier Henry Lhotellier. Quelle n'a pas été sa déception quand il a appris, a posteriori, la pose d'un escalier au droit du vitrail qui altère considérablement la perception et interdit désormais toute vue d'ensemble de la réalisation. Auguste Herbin est mort en 1960 à Paris très affecté par l'affront reçu et le peu de cas fait à sa contribution désintéressée.

Comme Henri Matisse, Auguste Herbin a toujours été fasciné par la couleur.

## Auguste Herbin

Né à Quiévy en 1882, il a suivi sa scolarité au Cateau-Cambrésis tout proche où il a reçu une formation de dessinateur textile. Cette qualification conforme aux besoins de l'industrie locale n'est pas étrangère à sa prise de conscience sociale et politique qui l'a conduit à adhérer au Parti communiste dès sa création. De même la pratique du dessin industriel se ressent dans l'intérêt qu'il a porté à la structure de ses œuvres, à leur composition et à leur forme construite.

Elève méritant, il a bénéficié d'une bourse déterminante pour sa carrière, puisqu'elle lui a permis d'étudier aux Beaux-arts de Lille. Il y a suivi les cours du peintre académique Pharaon de Winter mais, très vite, il a décidé de rompre avec un maître qui ne reconnaissait pas les Impressionnistes.

Dès 1901 il est allé à Paris, puis en Corse pour ensuite rejoindre les pensionnaires du Bateau-Lavoir : Juan Gris, Picasso, Reverdy, Max Jacob, ... où il a pratiqué le fauvisme, le cubisme pour s'exprimer avec son temps. Mais dès 1917, sa petite taille lui ayant épargné les champs de bataille de la Grande guerre, il a recherché une autre forme que la peinture figurative pour créer un art en harmonie avec son engagement humaniste et son souci du collectif. Dans cette période sa production, reconnue aujourd'hui, n'a trouvé aucun débouché. De cette époque il reste la profession de foi qui n'a pas été oubliée : *"Toute l'action de la peinture réside dans le rapport des couleurs entre elles, dans le rapport des formes entre elles et dans le rapport des formes et des couleurs (...). Ayant renoncé à la représentation de l'objet, nous avons renoncé dans le même temps à tous les caractères quantitatifs, poids, matières, proportions en trois dimensions, perspectives linéaires... Notre imagination ne pourra en aucun cas puiser dans ces caractères pour définir et*

*enrichir la composition de l'œuvre".*

De 1922 à 1925 le peintre est revenu aux paysages et aux natures mortes certainement pour des raisons matérielles. Il a adopté les théories puristes d'Ozenfant et de Léger dans lesquelles il a trouvé une façon de traiter des sujets figuratifs en s'interdisant, dit-il, les hasards et les gestes de l'inconscient, la géométrie intervenant pour régler la mise en place des objets dans la composition.

Mais à partir de 1926 Auguste Herbin s'est réengagé dans une œuvre définitivement abstraite. Afin de traiter un espace résolument coupé de toute figuration, Herbin a élaboré des principes basés sur l'utilisation de ses répertoires alphabétiques et géométriques et celle de la couleur pure, expression du spirituel pour le jaune et le bleu, ou de l'humain quand elle passe du blanc au noir et réciproquement. Il n'est donc pas surprenant qu'il ait été le premier président du groupe "Abstraction-Création" fondé en 1931. Son militantisme s'est également retrouvé dans son adhésion à l'association des écrivains et artistes révolutionnaires en 1932.

En 1946, toujours soucieux des causes collectives, il a participé à la fondation du Salon des réalités nouvelles réservé à la non-figuration. En qualité de Vice-président il a eu une grande influence sur les artistes cinétiques de l'après-guerre et sur tous ceux qui ont mené des recherches sur la couleur et l'abstraction géométrique. Il a désapprouvé l'hostilité du Parti communiste contre l'Art abstrait, revendiqué sa liberté d'expression et rendu sa carte en 1948.

Ces années là il a rejoint la Galerie Denise René qui l'a ensuite exposé régulièrement de son vivant. Ce faisant, son travail, largement diffusé, lui a enfin permis de vivre sans difficultés.

Quand le premier découpait ses gouaches il disait être dans les mêmes dispositions d'esprit qu'un sculpteur devant un bloc à travailler. Le second a exprimé sa découverte avec d'autres

mots : *"On peut construire avec la couleur comme l'on construit avec des pierres".*

Le Cateau-Cambrésis n'a pas fini d'en voir de toutes les couleurs ! ●