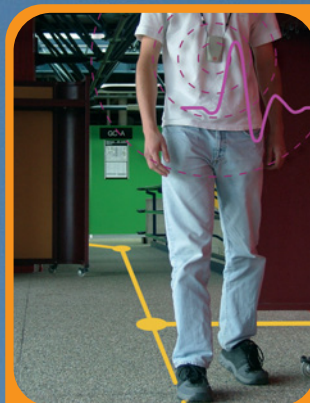


# xvz

Éditée par l'  
Association  
Française de  
Topographie  
**n°111**

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

## Histoire de l'hélicoptère



**3<sup>E</sup> FORUM DE  
LA TOPOGRAPHIE**  
Techniques  
de localisation  
intra-muros

**RÉSULTATS  
DU PRIX AFT 2006**



**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: du lundi au jeudi de 9h30  
à 16h30 et le vendredi de 9h30 à 13h

**Rédacteur en chef**

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

**Comité de Rédaction**

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

**Responsable du site Internet**

Tania Landes

**Publicité**

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

**Conception et maquette**

Dorothée Picard

**Abonnements:** Evelyne Chevalier

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

**ALBEDIA IMPRIMEURS**

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

**Dépôt légal**

2<sup>e</sup> trimestre 2007 ISSN 0290-9057  
N° CPPAP: 01 11 G 80 866

**Tirage de ce numéro:** 1600 ex

**Abonnement annuel**

France CEE: 83 €  
Etranger (avion, frais compris): 86 €  
Les règlements payés par chèques  
payables sur une banque située hors  
de France doivent être majorés de 10 €,  
sauf à utiliser l'identifiant international  
de compte IBAN  
FR08 3004 1000 0116 3000 3Y02 023  
Le numéro: 20 €  
Le bulletin d'adhésion est en p.73  
Membre du SPCS Syndicat de la Presse  
Culturelle et Scientifique

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

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

Membre de la FIG (Fédération Internationale des Géomètres) 

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

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

**■ Editorial ..... 5****■ Info-Topo**

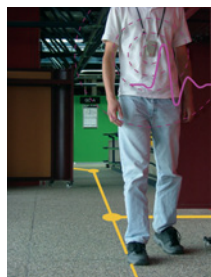
> Les informations de la profession..... 6

**■ Manifestation**

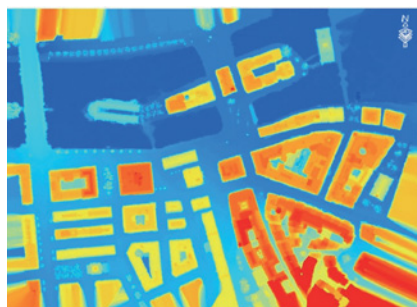
> EGECS: un réseau thématique pour  
une meilleure collaboration entre instituts  
de topographie à l'échelle de l'Europe  
Tania LANDES - Emmanuel NATCHITZ ..... 11

> La délimitation du domaine public artificiel  
Jean-Pierre MAILLARD ..... 12

> André Bailly officier, AFT distinguée .... 13

**■ 3<sup>e</sup> Forum de la Topographie**

> Techniques  
de localisation intra-  
muros à transmission  
Ultra Large Bande  
Valérie RENAUDIN,  
Bertrand MERMINOD  
et Michel KASSER .... 15

**■ Prix AFT 2006**

> Étude pour la réalisation de cartes  
de visibilité satellitaire GNSS  
Guillaume BIZOUARD ..... 21

> Le Wi-Fi pour le positionnement et  
la navigation en intérieur  
Arnaud BÉTRÉMIEUX ..... 27

**DANS LE PROCHAIN NUMÉRO D'XYZ n°112:**  
**Techniques de localisation en intérieur**  
(suite)

Pour la recherche de nos annonceurs  
consulter la page 71.

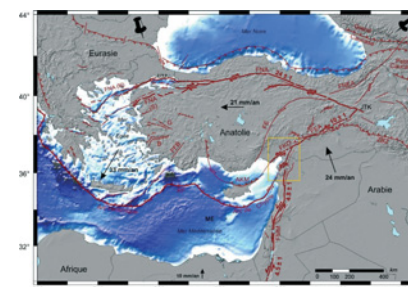
**■ Topographie:  
un demi-siècle d'évolution  
technologique (2/4)**

> Les théodolites électroniques  
ou stations totales

> Autres instruments de mesure ou de lever



Paul COURBON ..... 31

**■ GPS**

> Surveillance tectonique par GPS  
à la jonction des plaques Afrique,  
Arabie et Anatolie, au sud-est de la Turquie  
Sophie BERTRAND ..... 43

**■ Histoire**

> Histoire de l'hélicoptère  
Jean TARIEL ..... 53

> En majesté à la BnF les globes  
du Roi-Soleil  
Jack BIQUAND ..... 63

**■ Art et Géométrie**

> Yvaral à Aix: "Ostinato rigore"  
Jean-Pierre MAILLARD ..... 66

**■ Livres ..... 70****■ GSF**

> Chassé-croisé frisquet... Du nord au sud  
et du sud au nord  
François BODIN ..... 72

*La conjonction du troisième Forum de la topographie organisé par l'AFT en mars dernier et celle du résultat de ses prix 2006 fournit à la revue des sujets denses et nombreux dans les domaines de la localisation en intérieur et de la géomatique. Le n° 111 ne suffit donc pas à la publication de deux contributions au Forum ni à celle de tous les articles primés. Aussi, pour les autres contributions et articles, XYZ est conduit à solliciter la patience de ses lecteurs jusqu'aux prochains numéros. A ceux pour qui l'attente sera par trop insupportable, il reste la consultation, sur Internet, des sites de l'ENSG et de l'AFT pouvant répondre a minima à leurs questions. Ceci dit l'avantage des articles publiés reste la qualité de la lecture et la certitude d'un passage préalable des textes relatifs aux sujets traités au filtre du comité de rédaction ou encore celle du nécessaire recul qui s'impose à la validation des propositions. On voit bien qu'Internet se situe entre le téléphone et le courrier et, ce faisant, occupe un créneau pratique et efficace. En revanche, il garantit rarement la finalisation des écrits par la signature des auteurs ce qui impose dès lors une appréciation plus critique et distante. Bref, soyez fidèles au papier !*

*La lecture d'XYZ viendra aussi renouveler l'actualité centrée depuis le dernier numéro et jusqu'à maintenant, il faut bien le dire, sur les échéances électorales. Bien sûr, l'AFT, n'a pas à prendre position en matière politique. Elle n'en est pas pour autant indifférente aux professions de foi des candidats à la présidentielle ou à la députation. Elle veut donc croire que les efforts en matière de recherche annoncés par leur ensemble seront effectifs et profiteront également aux domaines techniques qui entrent dans l'objet de l'association.*

*2008 sera l'année du trentième anniversaire de l'AFT. Le code civil fixe justement à trente ans la durée maximum de la prescription acquisitive, la célèbre usucapion. C'est une belle étape dans la vie d'une association. Cela laisse à penser que dans l'esprit des professionnels le rôle de l'AFT est bien posé et que sa représentativité est intacte. La part de vrai de cette situation est incontestable. Il n'empêche que, pour durer, toutes les entreprises humaines ont besoin d'engagement et de renouvellement. Alors vous êtes invités à vous questionner sur la forme de votre prochaine participation. A titre d'exemple, à la rentrée 2007, il faudra arrêter la façon de marquer ce trentième anniversaire et la ou les manifestations correspondantes. Vos suggestions sont dès maintenant les bienvenues.*

*En parlant d'anniversaire, XYZ ouvre ses colonnes à l'histoire de l'hélicoptère, un appareil qui fête cette année son centenaire et qui a largement contribué à faire progresser les techniques de lever. Dans une étude poussée, à partir du point de vue professionnel, Jean Tariel montre l'évolution depuis la première utilisation de l'hélicoptère à des fins topographiques.*

*Ainsi, de la localisation en intérieur à l'hélicoptère, le n°111 d'XYZ traite de choses terre à terre et fait prendre l'air soulignant par-là même la diversité des outils utilisés dans la profession.*

**Jean-Pierre Maillard**

# Hommage à Jean Gervaise

## 1921-2007

■ Michel MAYOUD (successeur de Jean Gervaise de 1986 à 2005)

*Retraité depuis 1986, Jean Gervaise est décédé le 10 avril dernier. Ce géodésien français a fondé et développé le groupe de métrologie du CERN (Laboratoire Européen pour la physique des particules), poussant inlassablement à l'innovation pour répondre aux demandes toujours plus exigeantes des accélérateurs et des détecteurs. Sous sa direction, la métrologie du CERN a acquis une réputation internationale. Il fut également présent et actif au côté des premiers membres fondateurs de l'AFT, animant une des commissions techniques initiales et participant à de nombreuses manifestations professionnelles. Il fut aussi pendant longtemps un des représentants de la France à la FIG.*



Jean Gervaise en 1956 mesurant à l'invar et au théodolite.

**D**iplômé de l'Ecole Nationale des Sciences Géographiques Jean Gervaise a débuté sa carrière au sein de l'Institut Géographique National (IGN) dans le prestigieux département de la Géodésie. Cette discipline "reine" (disait-il) offrait en outre des missions nationales ou internationales passionnantes et variées, dans des conditions parfois très aventureuses ! Cette riche expérience initiale a forgé les grandes qualités professionnelles et les traits de caractère les plus saillants de l'homme, et du personnage. Car Jean Gervaise se distinguait tout autant par l'audace et la pertinence de ses visions techniques que par son panache et son franc-parler.

Mis temporairement à disposition du CERN par l'IGN, il a rejoint l'Organisation fin 1954 avec André Decae pour concevoir la métrologie de positionnement du premier Synchrotron à Protons "PS". Ce projet était fort exigeant pour les moyens de l'époque et demandait déjà des solutions novatrices. Cette mission s'est ensuite commuée début 1956 en détachement permanent. Ce fut le début d'une carrière prodigieuse, qui fut toujours imprégnée de l'enthousiasme et de l'esprit d'initiative de ces pionniers du CERN, qui avaient tout à concevoir, développer et réaliser. Responsable de ce qui fut communément appelé "Groupe Survey" en "franglais" du CERN, il a satisfait avec succès aux exigences métrologiques toujours plus

grandes des machines et expériences successives, s'adjoignant les compétences nouvelles nécessaires, initiant le développement de méthodes et instruments spécifiques ("distinvar", écartomètres à fil ou à laser), et réalisant des performances techniques lui valant une reconnaissance internationale en la matière. On en trouve des applications en bien d'autres réalisations scientifiques, techniques ou industrielles.

Les innovations remarquables accomplies dès ses débuts lui permirent d'obtenir brillamment un doctorat, en 1965, à l'Université de Munich. Très féru de géologie et de géomécanique, il s'est aussi beaucoup investi dans la recherche et la qualification géotechnique des sites européens possibles pour le projet de machine 300 GeV (SPS).

On retiendra aussi les développements apportés aux gyroscopes d'orientation souterraine et son audace à baser le pilotage des tunneliers du SPS (7 km de circonférence), puis du LEP (27 km de circonférence) sur des longueurs inhabituelles entre points de contrôle issus de la surface d'où une économie considérable. Cela paraissait inconcevable avec les précisions requises, et ce fut dans les deux cas un grand succès.

L'acquisition d'un distancemètre exceptionnel (le "Terrameter", précision 1 mm à 10 km) permit d'établir dès 1982

pour les besoins du LEP le réseau géodésique le plus précis du monde. L'usage différentiel ultrafin du GPS put alors faire l'objet d'une vérification fort probante sur ce réseau, le tout constituant une surprise étonnante en 1985 lors d'un congrès sur ces premières applications du GPS en positionnement de précision. Le niveau absolu de précision tridimensionnelle requis sur l'étendue d'un tel projet obligeait aussi à prendre en compte concrètement les déviations de la verticale et les altérations du géoïde, d'où des mesures astro-géodésiques et gravimétriques locales tout à fait inhabituelles pour l'époque, hors géodésie scientifique. Parallèlement, il faut aussi mentionner en lui le dirigeant soucieux de l'avenir du CERN mais aussi de celui de ses collaborateurs, veillant à leur évolution et à leur bien-être. Attentif à l'enseignement et à la communication, il portait une attention particulière à la formation des jeunes. Cet esprit a été maintenu, voire amplifié, par ses successeurs : plus de 250 stagiaires européens sont passés dans ce groupe, dont une très grande majorité de jeunes ingénieurs français.

On ne peut enfin passer sous silence l'homme sympathique et généreux qui se cachait derrière le personnage. Celui des attachements profonds et sincères, celui de tous les bons moments festifs ou très simplement humains qu'il savait ménager dans ses relations. ●





L'exposition des constructeurs et des producteurs de logiciels.

# La localisation en intérieur

*L'invention du GPS a grandement simplifié les travaux d'intérieur des topographes en rendant le positionnement simple, précis et rapide. Il n'est pas surprenant que des solutions aussi confortables soient attendues dans le positionnement à l'intérieur des bâtiments avec des applications pour la topométrie ou la localisation des personnes ou du matériel, et en particulier la navigation de robots. Des recherches en ce sens sont conduites par plusieurs laboratoires universitaires et de constructeurs. Diverses voies sont explorées :*

- utilisation de réseaux locaux de communication (WiFi, UWB...)
- adaptation de techniques satellitaires (pseudo GPS...)
- utilisation de capteurs de déplacement (gyroscopes, accéléromètres, odomètres...)

*Ce sujet méritait en lui-même une journée spécifique.*

*A l'invitation de l'AFT, trois conférenciers sont venus présenter leurs travaux sur ce thème novateur retenu pour le 3<sup>e</sup> Forum de la topographie : "la localisation en intérieur", forum accueilli cette année à l'Ecole nationale des sciences géographiques à Marne-la-Vallée. De même la journée a été agrémentée par l'exposition des constructeurs et producteurs de logiciels. Qu'ils en soient tous remerciés.*



Les conférenciers de gauche à droite : Philippe Saint Martin, Nel Samama et Valérie Renaudin.

# Techniques de localisation intra-muros à transmission Ultra Large Bande

■ Valérie RENAUDIN, Bertrand MERMINOD et Michel KASSER

*Alors que les techniques de radiolocalisation à l'extérieur des bâtiments sont largement exploitées dans les applications commerciales, la localisation intra-muros se place au cœur de beaucoup d'activités de recherche.*

*Une nouvelle technologie de transmission sans fil à ultra large bande suscite l'engouement. Elle permet des résolutions temporelles théoriques supérieures aux modes de transmission conventionnels. Son fort potentiel face aux exigences de localisation intra-muros est présenté au travers de résultats expérimentaux dans un milieu construit difficilement modélisable.*

## ■ mots-clés

ULB, Navigation  
pédestre, AOA,  
TDOA, RSS



**Piéton portant l'émetteur ULB  
Ubisense autour du cou.**

## Techniques de navigation intra-muros

Il s'agit essentiellement de signaux radio utilisés pour de la télécommunication. On peut citer le système MIT Cricket [1] qui exploite la combinaison d'émission d'ondes radio autour de 418 MHz et d'impulsions d'ultrasons. Des émetteurs sont placés à intervalles réguliers dans un bâtiment. Un récepteur mobile reçoit les signaux et utilise les temps de vol pour calculer sa position. Une autre solution, proposée par Aeroscout [2] exploite les points d'accès WiFi 802.1b (Wireless Fidelity) des réseaux sans fil déjà installés dans les bâtiments. Des boîtiers contenant des étiquettes actives à radio-fréquences (Radio Frequency Identification) sont portés par les usagers. En

L'engouement actuel pour la localisation de piétons à l'intérieur des bâtiments résulte de la mise en place de nouvelles réglementations et de l'évolution des besoins des usagers.

Partant du principe que les données de localisation précises de l'émetteur d'un appel d'urgence sont utiles afin d'envoyer les équipes d'assistance aux usagers, que ces derniers ne sont parfois pas en mesure d'expliquer précisément où ils se trouvent, et que les infrastructures de téléphonie mobile permettent la localisation des appels, de nouvelles réglementations ont été instaurées dans plusieurs pays. En 1991, l'agence gouvernementale américaine Federal Communications Commission (FCC) a lancé un service d'urgence, le 911. En Europe, le service d'urgence E112 se met en place depuis juillet 2000, date à laquelle le Parlement Européen a proposé une nouvelle réglementation des télécommunications régissant l'usage des données de localisation. De ce nouveau service découle la nécessité, voire l'obligation pour l'opérateur de localiser avec précision l'origine de l'appel.

Depuis l'avènement du GPS en 1973, l'utilisation des signaux satellitaires pour des applications diverses n'a cessé d'augmenter. De nombreux services géodépendants destinés au grand public, tels que l'information routière, l'accès à des données pratiques sur des points d'intérêt ou encore la localisation des membres d'un groupe, occupent notre quotidien. En parallèle, les besoins du monde professionnel grandissent. Les services d'urgence, des hôpitaux, de police ou d'extinction des incendies ont des demandes exigeantes en termes de guidage et de suivi de personnes. Ils jouent un rôle important dans le développement de ces technologies.

La navigation s'adresse alors à un nouvel environnement : l'intra-muros. Dans ce milieu les techniques de navigation par satellites ne fonctionnent pas car les signaux satellitaires ne pénètrent pas à l'intérieur des bâtiments, leur puissance étant trop affaiblie et les trajets subissant de nombreuses réflexions. D'autres technologies sont donc mises à contribution pour localiser des personnes à l'intérieur.



■ ■ ■ référence aux points d'accès fixes et au moyen du même standard de communication WiFi, ils transmettent à une centrale les mesures de temps de vol et de puissance des signaux reçus. Ainsi l'utilisateur est localisé dans l'environnement construit.

Les performances de localisation dépendent non seulement de l'influence de l'environnement construit sur la propagation des signaux, mais aussi de la nature des signaux traités. Aussi de nouveaux systèmes basés sur des signaux à Ultra Large Bande (ULB) sont développés.

L'ULB date des années 1960 et consiste en un moyen de communication sans fil destiné, à l'origine, à des applications radar. En 2002, les règles d'émission des dispositifs sans licence dans la bande de fréquences 3.1 - 10.6 GHz ont été révisées aux Etats-Unis. Ce fut le départ de l'exploitation commerciale de l'ULB. L'approbation au niveau européen de sa normalisation est toute récente puisqu'elle date de février 2007. Son entrée en vigueur, attendue d'ici août, dépend maintenant des différentes autorités nationales.

Un des développements de cette technologie a été conduit par la société Ubisense qui propose un système de localisation constitué de points d'accès et d'émetteurs mobiles ULB portés par les usagers. Comparé aux ultrasons, aux ondes WiFi ou encore au Bluetooth, l'ULB offre de meilleures performances de mesure de distance.

La transmission radio ULB repose sur l'émission de trains d'impulsions modu-

lées sur un support temporel unitaire de l'ordre de la picoseconde, avec une densité spectrale de très faible puissance sur une large bande. Ces caractéristiques lui procurent une immunité face aux trajets multiples, une bonne résistance face aux interférences et permettent de déterminer avec une grande précision son temps de vol. Ces caractéristiques désignent l'ULB comme un bon candidat pour la navigation intra-muros.

## Localiser un nœud à l'aide de l'ULB

Localiser un nœud avec un système sans fil ULB passe par l'enregistrement des signaux radio émis entre un nœud, qualifié de cible, et un certain nombre de nœuds de référence, qualifiés de points d'accès. Suivant la technique de localisation employée, les métriques sont constituées de mesures de puissances de signal, d'angles d'incidence ou de temps de vol.

## Puissance de signal (Receiver Signal Strength - RSS)

Appuyé sur des modèles de propagation du signal et sur les mesures d'énergie d'un signal reçu en plusieurs points fixes, les distances entre le mobile et les références sont estimées. La position

du mobile est ensuite calculée, par exemple par triangulation. Cette technique dépend de l'environnement dans lequel le signal est propagé. La précision de localisation est d'autant plus fine que la modélisation de la propagation du signal dans un milieu est détaillée.

Une technique appelée "Finger Printing" permet d'améliorer cette modélisation. Ce principe utilise une base de données des puissances reçues, collectées dans une phase d'apprentissage, et associe la position du mobile à un élément de la base de données. La phase d'apprentissage consiste à quadriller un espace et à associer les puissances reçues à des positions géographiques de l'espace.

La plupart des applications s'appuyant sur du "Finger Printing" utilisent des signaux WiFi [3]. Ceci s'explique certainement par le fait que ce procédé n'exploite pas la principale caractéristique de l'ULB, qui est l'utilisation d'une très large bande, pour améliorer la précision de la position.

## Angle d'incidence (Angle of Arrival - AOA)

Un système de localisation basé sur les angles d'incidence mesure l'angle entre la direction de propagation du rayonnement électromagnétique incident et la normale aux dioptries des



Emetteur mobile ULB de la société Ubisense

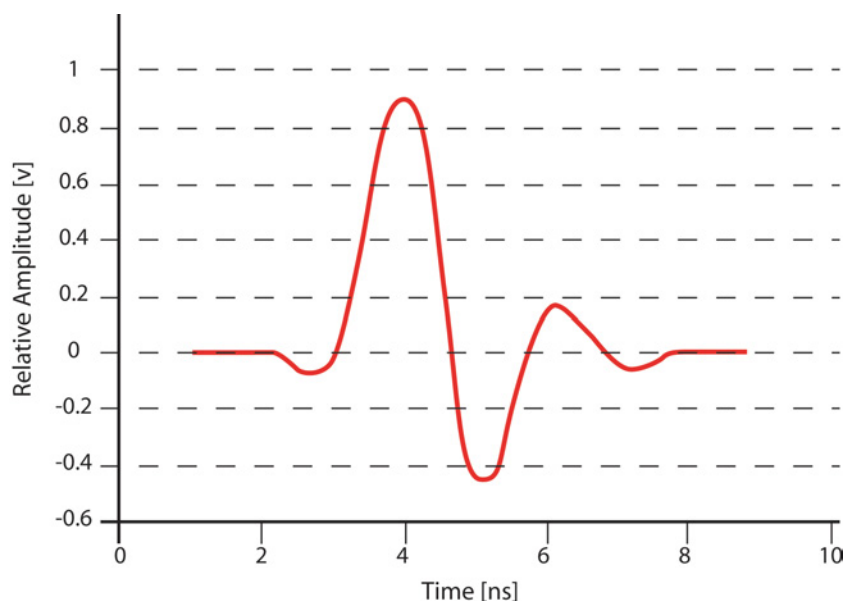
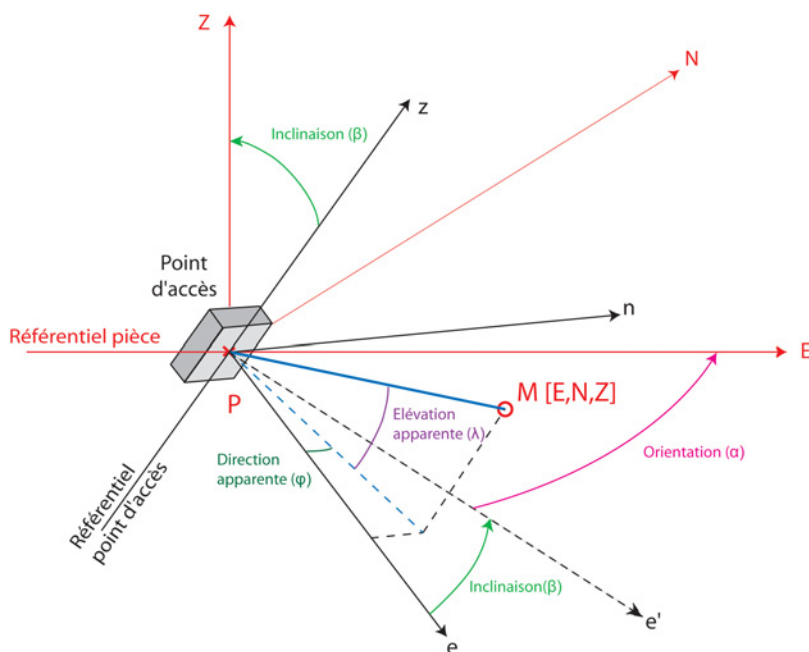


Figure 1 : Exemple de forme d'ULB impulsionnelle.



**Figure 2: Mesure d'angle d'incidence.**

points d'accès, le tout à l'aide de rangées d'antennes spécifiques. Le fait que la propagation des signaux ULB soit plus robuste face aux trajets multiples, grâce à l'emploi d'une très large bande, est plutôt un désavantage dans ce cas. Il est difficile de déterminer avec précision, l'angle d'incidence dans un ensemble de signaux réfléchis.

Ce procédé reste pourtant souvent utilisé dans les systèmes de localisation ULB car il requiert moins de points d'accès pour localiser un mobile. Deux références suffisent pour calculer un point dans un espace plan.

Le système Ubisense mesure les angles d'incidence des signaux ULB émis par l'émetteur mobile. Ainsi les angles de direction apparente (?) et d'élévation apparente (?) du mobile dans le référentiel attaché au point d'accès sont fournis. Afin d'exprimer ces mesures dans le référentiel de la pièce/bâtiment dans lequel on se trouve, il faut tenir compte de l'orientation du point d'accès.

Cette orientation est définie par les angles d'inclinaison (?) et d'orientation (?). Par des contraintes mécaniques, l'angle de rotation autour de la normale au dioptré est ramené à zéro. L'axe (Pn) du référentiel du point d'accès, en noir sur la figure 2, est donc horizontal.

Les angles d'incidence mesurés aux différents points d'accès  $P_i$ , décrits par les coordonnées  $(E_i, N_i, Z_i)$  dans le référentiel pièce, sont reliés aux coordonnées du point mobile  $M(E, N, Z)$  par les équations suivantes. (1)

$$\begin{cases} \tan(\varphi_i - \alpha_i) = \frac{E - E_i}{N - N_i} + v_{\varphi i} \\ \sin(\lambda_i - \beta_i) = \frac{Z - Z_i}{\sqrt{(E - E_i)^2 + (N - N_i)^2}} + v_{\lambda i} \end{cases} \text{ pour } i = 1, \dots, L$$

$L$  correspond au nombre de points d'accès qui reçoivent le signal impulsionnel.  $v_{\varphi i}$  et  $v_{\lambda i}$  sont respectivement les bruits de la direction apparente et de l'élévation apparente.

Le système d'équations (1) peut aussi s'écrire sous forme vectorielle comme suit :

$$\mathbf{B}_{AOA} = \mathbf{H}_{AOA} \mathbf{x} + \mathbf{v}_{AOA} \quad (2)$$

avec

$$\mathbf{B}_{AOA} = \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \lambda_1 \\ \vdots \\ \varphi_L \\ \lambda_L \end{bmatrix}, \mathbf{v}_{AOA} = \begin{bmatrix} v_{\varphi 1} \\ v_{\lambda 1} \\ \vdots \\ v_{\varphi L} \\ v_{\lambda L} \end{bmatrix}, \mathbf{H}_{AOA} = \begin{bmatrix} \tan^{-1}\left(\frac{N - N_1}{E - E_1}\right) + \alpha_1 \\ \sin^{-1}\left(\frac{Z - Z_1}{\sqrt{(E - E_1)^2 + (N - N_1)^2}}\right) + \beta_1 \\ \vdots \\ \tan^{-1}\left(\frac{N - N_L}{E - E_L}\right) + \alpha_L \\ \sin^{-1}\left(\frac{Z - Z_L}{\sqrt{(E - E_L)^2 + (N - N_L)^2}}\right) + \beta_L \end{bmatrix}$$

## Temps de vol (Time of Arrival - TOA)

Un système de localisation basé, sur le temps mesure, sur les points d'accès l'instant d'arrivée du signal émis par le

mobile. Si les horloges du mobile et du point d'accès ne sont pas synchronisées, il faut ajouter une inconnue de temps à l'équation (4).

Contrairement aux équipements de localisation utilisant la puissance, la précision du système peut être améliorée en augmentant le rapport signal sur bruit ou la largeur effective de la bande. Comme il est possible d'atteindre une très grande précision de localisation, par exemple 2 à 3 cm avec une largeur de bande de 1.5 GHz et un SNR de 0 dB, la qualité de la mesure du temps et la synchronisation de tous les nœuds influent fortement sur les performances.

Il est possible de s'affranchir du problème de synchronisation des horloges entre le mobile et les points d'accès en travaillant avec des différences de temps d'arrivée (TDOA). Dans ce cas, la différence de temps d'arrivée d'un signal émis par un mobile sur deux points d'accès est calculée. Dans l'espace, le lieu géométrique des positions possibles du mobile est décrit par un hyperboloïde dont les foyers sont les deux points d'accès utilisés. Trois mesures de TDOA, résultant de la réception simultanée du signal sur trois points d'accès distincts, sont nécessaires pour calculer la position du mobile. Etant donné la complexité de l'environnement construit, seule une très forte densité de points d'accès, permet d'envisager une telle configuration.

Les points d'accès du système Ubisense, installés de manière fixe sur les murs, sont tous synchronisés via un réseau dédié de câbles blindés Cat5e. L'enregistrement des mesures de TDOA est ensuite fait en continu.

Une mesure de TDOA impliquant le mobile  $M$  et les deux points d'accès  $P_1$  et  $P_2$  s'exprime comme suit : (4)

$$c \cdot \Delta t_{12} = \sqrt{(E - E_1)^2 + (N - N_1)^2 + (Z - Z_1)^2} - \sqrt{(E - E_2)^2 + (N - N_2)^2 + (Z - Z_2)^2} + v_{\Delta t12}$$

$v_{\Delta t12}$  modélise l'erreur de mesure sur la différence de distances et  $c$  la vitesse de la lumière.

En fixant le point d'accès numéro 1 comme référence, l'équation (4)



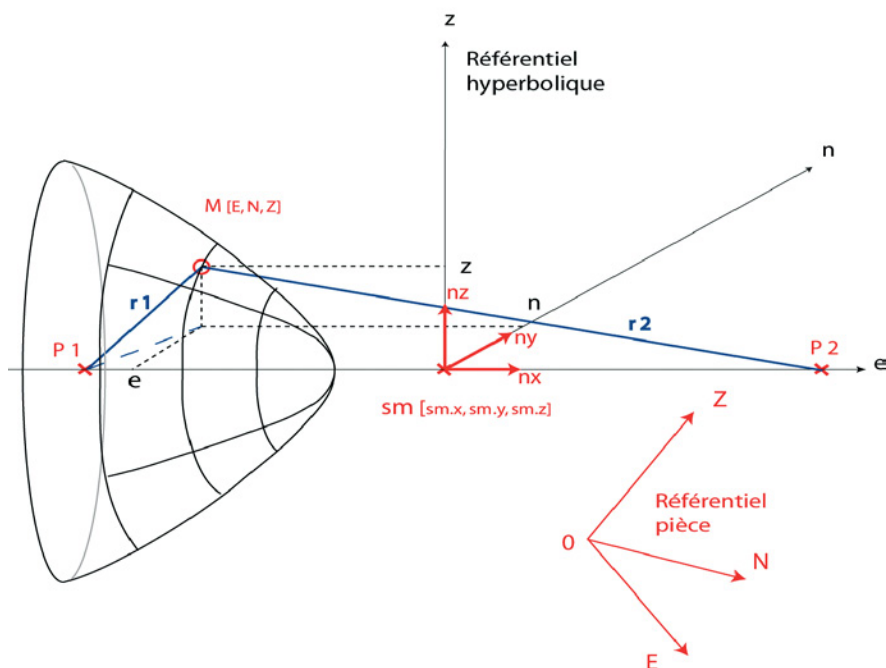


Figure 3 : Mesure de différence de temps d'arrivée.

généralisée à l'ensemble des mesures de TDOA simultanées peut s'écrire sous forme matricielle mettant en relation les mesures et les coordonnées de l'émetteur mobile M.

$$\mathbf{B}_{\text{TDOA}} = \mathbf{H}_{\text{TDOA}} \mathbf{x} + \mathbf{v}_{\text{TDOA}} \quad (5)$$

Avec

$$\mathbf{B}_{\text{TDOA}} = \mathbf{c} \cdot [\Delta t_{1,2} \quad \dots \quad \Delta t_{1,L}]^T, \\ \mathbf{v}_{\text{TDOA}} = [\mathbf{v}_{\Delta t1,2} \quad \dots \quad \mathbf{v}_{\Delta t1,L}]^T, \\ \mathbf{H}_{\text{TDOA}} = \begin{bmatrix} \sqrt{(E - E_1)^2 + (N - N_1)^2 + (Z - Z_1)^2} - \dots \\ \dots - \sqrt{(E - E_1)^2 + (N - N_1)^2 + (Z - Z_1)^2} \\ \vdots \\ \sqrt{(E - E_1)^2 + (N - N_1)^2 + (Z - Z_1)^2} - \dots \\ \dots - \sqrt{(E - E_1)^2 + (N - N_1)^2 + (Z - Z_1)^2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

## Algorithme hybride de localisation dans R<sup>3</sup>

L'intra-muros est un environnement complexe en perpétuelle évolution. L'homme interagit au quotidien avec ce milieu. Il installe du mobilier, ouvre et ferme des portes, modifiant les conditions de propagation. Le corps humain, constitué principalement d'eau salée, absorbe une grande partie des signaux radio. Sa gestuelle réduit parfois l'hémisphère dans lequel les signaux se propagent, comme lorsqu'il s'assoit devant un écran d'ordinateur. Tous ces

éléments montrent à quel point localiser un piéton à l'intérieur, par ondes radio, est une tâche difficile.

Une approche naturelle est de combiner plusieurs méthodes afin d'améliorer les performances de localisation, telles que la précision et la disponibilité. De nombreux algorithmes permettent d'hybrider différentes mesures et de filtrer la position. Elles font souvent l'hypothèse que les bruits qui affectent les mesures sont suffisamment petits et qu'ils sont modélisables comme des variables aléatoires gaussiennes centrées, dont on connaît les covariances.

Des algorithmes utilisant le calcul du maximum de vraisemblance [4, 5], des filtres de Kalman [6], ou bien l'évolution de particules [7] dans des démarches bayésiennes ont été développés. La suite de cet article présente la construction d'un algorithme hybride de mesures TDOA et AOA dans R<sup>3</sup> différent de celui utilisé par la solution Ubisense.

## Algorithme par moindres carrés

Les équations (2) et (5) contiennent le même vecteur d'état composé des coordonnées du mobile dans le réfé-

rentiel pièce : le Nord (N), l'Est (E) et la hauteur (Z). L'étape suivante est de linéariser les équations qui décrivent les mesures de différences de temps d'arrivée.

Pour transformer le système d'équations en un système linéaire, il suffit d'élever au carré l'équation (4) et d'introduire la variable intermédiaire  $r$  qui fait intervenir la distance entre le mobile et un point d'accès choisi comme référence fixe.

$$r = \sqrt{(E - E_R)^2 + (N - N_R)^2 + (Z - Z_R)^2} \quad (7)$$

Le nouveau vecteur d'état devient :

$$\mathbf{x} = [E - E_R \quad N - N_R \quad Z - Z_R \quad R]^T \quad (8)$$

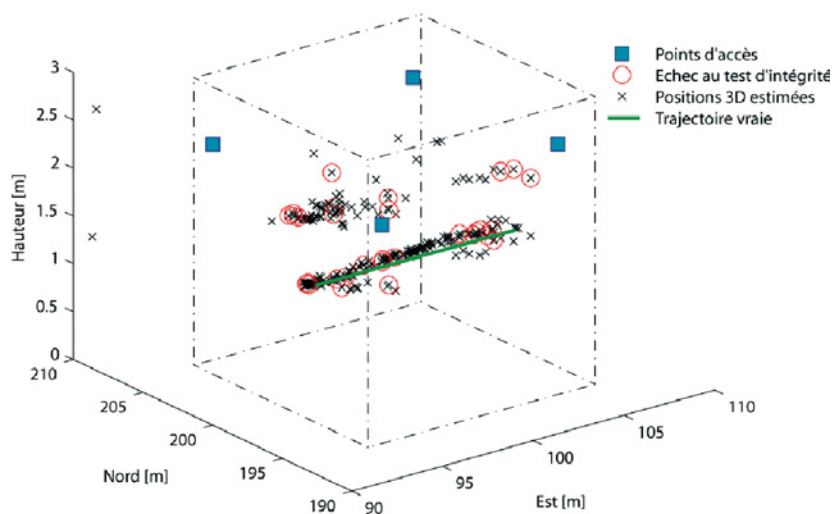
En présence d'erreurs de mesure, l'algorithme d'hybridation détermine la position du mobile via l'algorithme standard des moindres carrés. L'estimation de la position du mobile est donc donnée par :

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{B} \quad (9)$$

## Résultats expérimentaux

Les hypothèses et les performances de l'algorithme d'hybridation ont été évaluées dans une salle de classe de 225 m<sup>2</sup>, aux murs en métal, équipée avec le système Ubisense. Un piéton portant l'émetteur ULB autour du cou, comme illustré sur la photo, a parcouru la pièce à plusieurs reprises dans sa largeur. Les résultats sont présentés sur la figure 4.

L'écart moyen entre la trajectoire vraie et les positions hybrides est de 1.8 m associé à un écart-type de 10.9 m pour 255 positions calculées. Sur la figure 4, on constate qu'un certain nombre de positions sont complètement erronées, ce qui est cohérent avec l'importance de l'écart-type. Ce constat remet en cause l'hypothèse de modélisation des erreurs de mesures par des variables aléatoires gaussiennes, faite dans la majeure partie des algorithmes de localisation. Afin de vérifier cette explication, un test d'intégrité a été imaginé.



**Figure 4 : Résultats de la localisation AOA & TDOA.**

## Test d'intégrité

L'analyse du vecteur d'état (Equation 8) montre qu'il contient à la fois les coordonnées du vecteur entre le mobile et le point de référence  $P_R$  et sa norme. Il est donc possible de comparer la norme calculée à partir des coordonnées au dernier élément du vecteur d'état. Ainsi on peut tester l'intégrité de la solution et détecter tous les points où l'écart est supérieur à 1 mètre. Sur la figure 4, les points ne passant pas le test d'intégrité sont entourés en rouge.

Le test détecte des biais, mais aussi des positions non biaisées. Les erreurs de positionnement à l'intérieur sont dues aux bruits de mesure, mais aussi à la complexité de l'environnement qui agit sur la propagation des signaux en induisant, par exemple, des trajets multiples.

## Conclusion

Les premiers résultats de localisation de personnes à partir de mesures ULB et d'un algorithme d'hybridation TDOA & AOA montrent que l'intra-muros requiert une approche différente de celles connues à l'extérieur. Les erreurs de mesures résultent en grande partie de l'interaction de l'environnement construit sur la propagation des signaux radio. Les multiples échos pro-

duits par les phénomènes physiques de transmission, de diffraction et de réflexion sont difficiles à détecter parmi tous les trajets reçus.

Accroître une forme de connaissance a priori de l'environnement construit est une piste pour répondre à cette problématique. Mais cette connaissance est figée et sa mise à jour est fastidieuse.

Modéliser l'intra-muros est une tâche complexe et les attentes des usagers sont hautes. Ce constat ouvre la voie à de nouvelles idées qui nourrissent une recherche prolifique. Les transmissions ULB offrent de belles perspectives de conception de solutions de radiolocalisation intra-muros. ●

## Contact

**Valérie RENAUDIN**  
**Bertrand MERMINOD**  
 Ecole Polytechnique  
 Fédérale de Lausanne  
 ENAC INTER TOPO  
 Station 18 - 1015 Lausanne  
 SUISSE  
<http://topo.epfl.ch>

**Michel KASSER**  
 Ecole Nationale des Sciences  
 Géographiques  
 Marne-la-Vallée  
<http://www.ensg.ign.fr>

## Références

1. Priyantha N.B., 2005. *The Cricket Indoor Location System*. Massachusetts Institute of Technology.
2. Villacampa F., 2005. *AeroScout piste en RFID*, Décision Informatique, Vol. 631.
3. Evennou F. and Marx F., 2006. *Advanced integration of WiFi and inertial navigation systems for indoor mobile positioning*, Eurasip Journal on Applied Signal Processing.
4. Cheung K.W., So H.C., et al., 2006. *A constrained least squares approach to mobile positioning: algorithms and optimality*, Eurasip Journal on Applied Signal Processing, p. 1-23.
5. Gezici S., Tian Z., et al., 2005. *Localization via Ultra Wide band Radios*, IEEE Signal processing magazine, p. 70-84.
6. Renaudin V., Yalak O., and Tomé P., 2007. *Hybridization of MEMS and Assisted GPS for Pedestrian Navigation*, Inside GNSS, January/February, p. 34-42.
7. Gilliéron P.-Y., Spassov I., and Merminod B., 2005. *Indoor Navigation Enhanced by Map-Matching*, European Journal of Navigation, Vol 3.
8. Site Internet: [www.ubisense.net](http://www.ubisense.net)

## ABSTRACT

**Keywords:** Ultra Wide Band, pedestrian navigation, AOA, TDOA, RSS

*Indoor localization is a main current research topic, whereas outdoor radiolocation techniques are widely used in commercial applications.*

*A new ultra wideband (UWB) radio is regarded as one of the most viable solution for indoor positioning. It has an extremely fine time resolution which enables accurate ranging. Experimental results present its strong potential in indoor environments that are extremely hard to model.*



# Palmarès du Prix de l'AFT 2006

***Le conseil de l'AFT avait approuvé en 2001 la création d'un prix de l'AFT destiné aux jeunes ingénieurs diplômés en Topographie.***

***Les étudiants des Ecoles d'Ingénieurs sont ainsi 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 sont récompensés et publiés dans la revue XYZ.***

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. La qualité du contenu scientifique et de la rédaction de l'article sont les critères essentiels retenus.

En 2006, une dizaine d'articles a été soumis au jury, constitué par Emmanuel Natchitz (ESTP), Stéphane Durand (ESGT),

Tania Landes et Pierre Grussenmeyer (INSA de Strasbourg) et Michel Kasser (ENSG) et président de l'AFT.

- Le premier prix a été attribué à Guillaume Bizouard (600 euros), récompensant un article sur la réalisation de cartes de visibilité satellitaire GNSS
- Le deuxième prix à Arnaud Bétrémieux (500 euros), pour un article innovant sur le Wi-Fi pour le positionnement et la navigation en intérieur
- Le troisième prix à Céline Ravier (400 euros) pour son article sur la représentation 3D architecturale du temple d'Auguste et Livie à Vienne (Isère).

Ces prix ont été remis le jeudi 15 mars 2007 à l'occasion du forum de l'AFT à l'ENSG. L'AFT tient à remercier la société LEICA Geosystems, représentée par Jean-Philippe Picon, qui a accepté de financer l'édition 2006 (photo).

Toutes nos félicitations à l'ensemble des candidats pour l'excellente qualité des travaux qui nous ont été soumis.

Les articles des trois lauréats ainsi qu'une sélection de résumés parmi les articles soumis sont publiés dans ce numéro ainsi que dans le XYZ 112. ●



De gauche à droite Michel Kasser (ENSG), Guillaume Bizouard, Jean-Philippe Picon (LEICA Geosystems) et Pierre Grussenmeyer (INSA de Strasbourg).

Pour le prix 2007, la date limite de proposition des articles est fixée au 1<sup>er</sup> décembre 2007. Un montant global de 1 500 euros est prévu, comme en 2006.

Toutes les instructions sont téléchargeables sur le site de l'AFT. **[www.aftopo.org](http://www.aftopo.org)**

# Étude pour la réalisation de cartes de visibilité satellitaire GNSS

■ Guillaume BIZOUARD

*Les systèmes de positionnement par satellites sont en plein essor actuellement mais ils sont toujours limités par la présence d'obstacles qui masquent la visibilité des satellites. Cependant, la récente technique d'acquisition qu'est le levé par laser aéroporté laisse augurer de nouvelles applications pour prévoir la visibilité satellitaire. Il permettrait effectivement de modéliser les masques par l'intermédiaire d'un Modèle Numérique de Surface. Allié à un puissant logiciel d'analyse spatiale, il est alors possible d'envisager la création d'une application permettant de générer des cartes prévisionnelles de visibilité satellitaire. C'est l'objet de ce projet : créer un prototype réalisant de telles cartes, le tester, le valider, l'analyser et imaginer ses perspectives.*

## ■ mots-clés

Visibilité, satellite, GNSS, géotraitements, LiDAR

## Contexte et problématique

La visibilité satellitaire a toujours été une préoccupation majeure pour tout utilisateur des systèmes de positionnement par satellites, qu'il soit du milieu de la topographie ou du milieu des transports. De la quantité de satellites visibles dépend en premier lieu la capacité à effectuer ou non des mesures GNSS, puis la qualité de ces mesures. Or cette visibilité satellitaire dépend de la présence de masques faisant obstacles entre l'antenne réceptrice du système de positionnement et les satellites dans le ciel. Ces masques sont évidemment très présents en environnement urbain ou forestier et c'est la raison pour laquelle l'utilisation de tels systèmes à des fins topographiques est très difficile dans ces environnements. Néanmoins, leur emploi n'y est pas totalement à proscrire : il s'agit en fait de connaître les horaires auxquels les bonnes fenêtres de visibilité surviennent. Actuellement, les logiciels permettant de déterminer ces fenêtres sont les logiciels dits "de planification de mission" développés par les fabricants de matériel topographique (Leica, Trimble, Topcon...). Leur inconvénient majeur est la prise en compte des masques qui s'avère être assez contraignante puisqu'il faut se déplacer sur le terrain pour effectuer un levé de masques relativement sommaire pour l'intégrer ensuite dans le logiciel. D'où une perte de temps et de rendement.

Néanmoins, l'apparition et le développement rapide de la nouvelle technique d'acquisition de masse qu'est le laser aéroporté (ou levé LiDAR) permet d'envisager alors de nouvelles perspectives. Elle apporte effectivement exhaustivité,

précision et homogénéité à l'ensemble des informations collectées, le tout sur une très grande zone géographique. La modélisation des masques devient donc bien meilleure, sans déplacement sur le terrain pour l'utilisateur. Si on rajoute à cette technique de puissants logiciels d'analyse spatiale, la prévision de visibilité satellitaire peut alors prendre une nouvelle dimension.

A la vue de ces constatations, la Direction Cantonale de la Mensuration Officielle (DCMO) de Genève a mandaté l'entreprise GeoDataNetwork, spécialisée dans les services géoinformatiques, pour analyser en profondeur ce sujet. Celle-ci a alors confié l'étude à un étudiant topographe de l'INSA de Strasbourg comme sujet de Projet de Fin d'Etudes.

Cette nouvelle orientation autour de la prévision de visibilité satellitaire est donc assez récente ; elle a suscité quelques études et même le développement de logiciel tel Ergospace (T. Tirtaine & J. Marais [2005]). Seulement, les conditions énoncées par la DCMO ne permettaient pas d'étudier ou d'employer ce logiciel car il fallait concevoir une application compatible avec les logiciels standards et les données utilisés à la DCMO, soit la plate-forme logicielle ArcGIS (ESRI) et ses différents formats propriétaires de données.

Dès lors, l'objectif principal de ce projet a été de créer un prototype d'application de toutes pièces sous ArcGIS qui permet de générer des cartes de visibilité satellitaire prévisionnelles. L'étude de M. Germroth [2005] à ce sujet s'avère être extrêmement intéressante puisqu'elle apporte l'idée principale pour parvenir au dessein du projet : exploiter le géotraitement



- d'ombrage de l'extension Spatial Analyst pour analyser la visibilité des satellites par rapport à un Modèle Numérique de Surface (MNS). L'article exposera donc tout d'abord la conception de ce prototype, puis il traitera des tests de validation, et enfin il s'avancera sur le futur d'une éventuelle application.

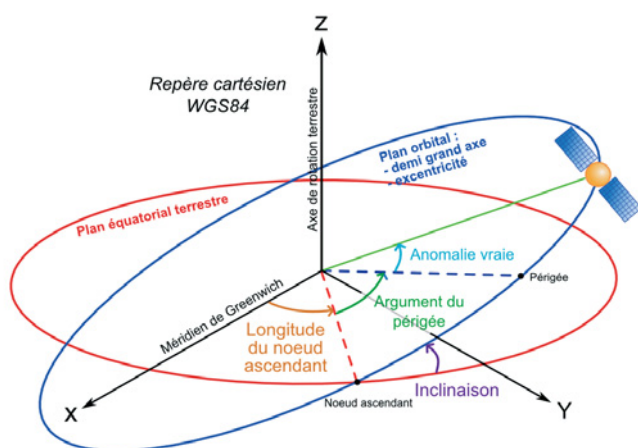
## Le prototype

Son élaboration constitue le cœur du projet ; elle s'est effectuée en trois parties. La première s'attache à la localisation des satellites à l'heure souhaitée, soit l'heure de prévision, et dans un repère approprié. Puis la seconde partie étudie la création d'un MNS optimal à partir d'un semis de points LiDAR. Enfin, la dernière traite de la conception d'une séquence de géotraitements permettant d'analyser la visibilité des satellites, pour générer à terme la carte de visibilité satellitaire.

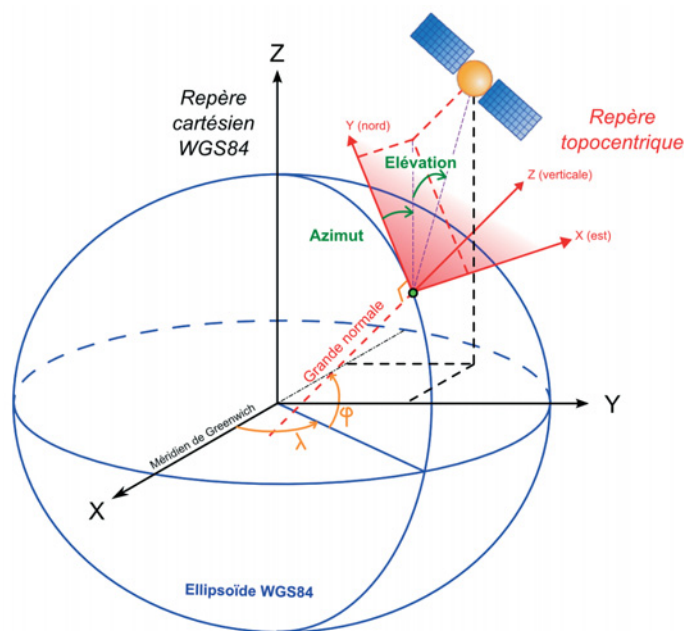
### ■ Localisation des satellites

Pour pouvoir réaliser une carte de visibilité, il faut tout d'abord savoir où se situent les satellites dans l'espace et à quel moment. C'est l'enjeu de cette partie initiale qui fait appel aux domaines de la mécanique céleste et de la géodésie spatiale. Les almanachs des constellations de satellites constituent la source de données principale pour pouvoir calculer la position des satellites. On y trouve effectivement les paramètres képlériens/orbitaux de chaque satellite d'une constellation qui définissent leur position (cf. figure 1). A partir de ces éléments, un algorithme est établi calculant les coordonnées de ces satellites dans un système de référence pertinent à l'heure de prévision souhaitée. Cet algorithme se décompose en plusieurs étapes :

- extrapolation des paramètres orbitaux à la date de prévision ; ces calculs sont un classique de mécanique céleste tirés, entre autres, de l'Interface Control Document [2004].



**Figure 1.** Localisation d'un satellite par ses paramètres orbitaux.



**Figure 2.** Localisation d'un satellite dans un repère topocentrique.

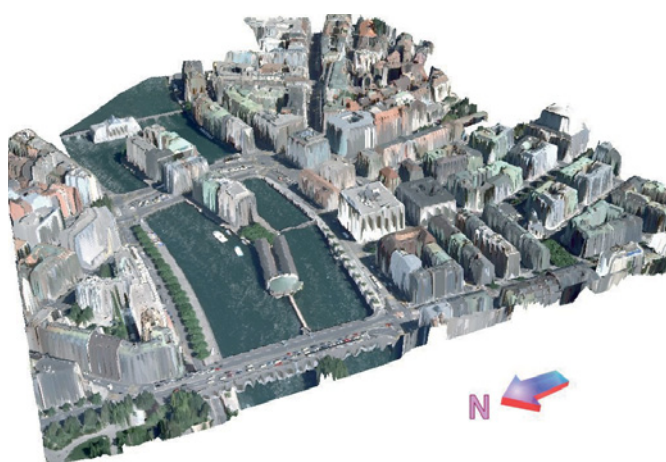
Puis interviennent divers changements de repères :

- passage aux coordonnées cartésiennes orbitales,
- passage aux coordonnées cartésiennes WGS84,
- passage aux coordonnées cartésiennes topocentriques,
- passage aux coordonnées topocentriques (azimut ; élévation).

En définitive, on obtient ainsi pour chaque satellite de la constellation ses coordonnées topocentriques (azimut ; élévation) qui sont relatives à un lieu d'observation sur Terre (cf. figure 2). Le problème de la visibilité se résout effectivement d'un point de vue local puisque suivant où l'on se trouve sur Terre, la visibilité des satellites n'est pas la même. L'ensemble de l'algorithme a été contrôlé en comparant ses résultats à ceux donnés par les logiciels de planification de mission. Il a été intégré dans un fichier XLS en grande partie automatisé : l'utilisateur charge l'almanach, saisit sa date et son heure de prévision souhaitées, ainsi que les coordonnées du lieu d'observation, puis lance les quelques macros Visual Basic pour obtenir instantanément les résultats. Ce fichier correspond à la première composante du prototype. A partir de là, on est en mesure de déterminer la visibilité des satellites par rapport au lieu d'observation en comparant leur angle d'élévation à un angle de référence ( $0^\circ$  ou un angle de coupure), mais sans prendre en compte les masques. D'où les deux composantes suivantes qui vont apporter la véritable innovation du projet : la prise en compte des masques de manière exhaustive, précise et homogène, sans déplacement sur le terrain.

### ■ Génération d'un Modèle Numérique de Surface

Pour analyser la visibilité satellitaire d'un lieu en fonction de ses obstacles environnants, il faut nécessairement disposer



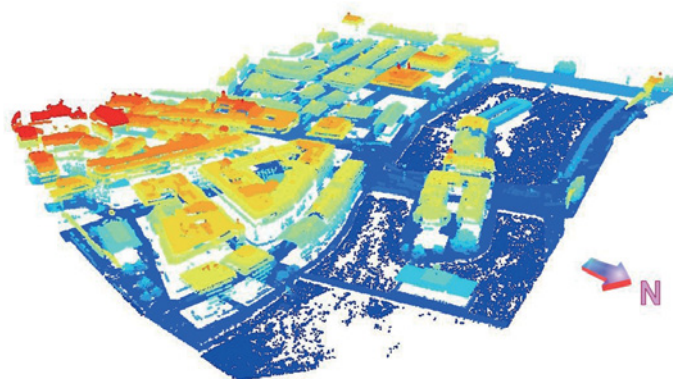
**Figure 3.** Zone test du centre-ville de Genève - Quartier de l'Île (orthophoto drapée sur le MNS)

de géodonnées décrivant l'espace autour de ce lieu. Pour le projet, la DCMO a fourni un semis de point LiDAR couvrant deux zones tests au profil différent: la première en plein centre-ville de Genève avec donc de nombreux bâtiments (cf. figures 3 et 4) et la seconde dans un lotissement en périphérie de la ville avec un fort couvert végétal.

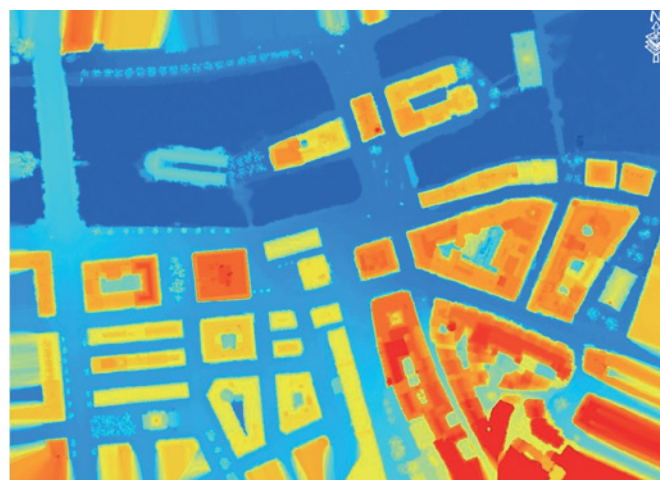
Seulement, un semis de points LiDAR n'est pas directement exploitable pour effectuer des analyses poussées du fait de son volume de données important et de son format peu commode (vecteur ponctuel). Il faut ainsi forcément transformer le semis en un raster (une image numérique), pour générer alors un Modèle Numérique de Surface pour être plus précis car on souhaite modéliser les masques hors-sol: bâtiments, végétation... Ce choix est aussi dicté par le format nécessaire à l'utilisation du géotraitement d'ombrage. C'est une partie importante car on peut intuitivement penser que de la qualité de la modélisation de l'espace dépend la qualité de la prévision de la visibilité des satellites.

Outre les quelques traitements préliminaires classiques qu'il a fallu réaliser sur le semis, le point sensible de cette étude s'est porté sur le choix de la méthode d'interpolation en raster à employer. Pour ce faire, on s'est appuyé sur les travaux réalisés par le Laboratoire des SIG de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne [2005]. Le rapport montre effectivement que la méthode TIN (*Triangulated Irregular Network*) passant par la triangulation de Delaunay est la plus à même de modéliser fidèlement l'espace bâti: façades de bâtiments plus verticales, base des bâtiments moins évasée, plan des toits mieux modélisé. Ce sont des caractéristiques clés pour avoir la meilleure modélisation des masques possible.

Un autre paramètre important pour la génération du MNS est sa résolution pixellaire, c'est-à-dire la taille des pixels dans la réalité. Selon les travaux de SL Smith et al. [2003], elle doit être équivalente voire légèrement inférieure à la densité de points du semis LiDAR. Compte tenu de la densité du semis fourni par la DCMO, une résolution de 50 cm a été retenue.



**Figure 4.** Semis de points LiDAR couvrant la zone test du centre-ville



**Figure 5.** MNS raster de la zone test du centre-ville.

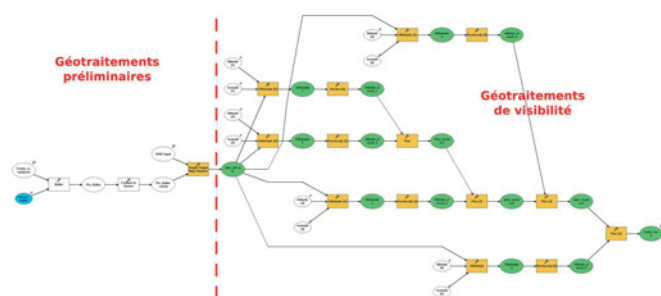
Au final, un MNS raster a été généré pour chacune des deux zones tests selon les conditions précédentes, ce qui constitue la seconde composante du prototype (cf. figure 5).

## ■ Séquence de géotraitements

Tout ce qui a été fait auparavant a été guidé en grande partie par un seul objectif, en plus de celui d'avoir les données optimales pour une analyse de visibilité: aboutir au type et au format de donnée nécessaire à l'usage du géotraitement d'ombrage de Spatial Analyst (MNS raster et coordonnées azimut/élévation des satellites). Car ce traitement, au but initial anodin, s'avère être la pièce maîtresse de tout le projet. Dans le cas normal, il permet, comme son nom l'indique, d'ombrer une surface suivant la position du soleil, en déterminant la luminosité de chaque pixel d'un MNS raster et en analysant si un pixel est dans l'ombre d'un autre ou non. Dans le cadre du projet, il va permettre de déterminer si un satellite est visible ou non depuis chaque pixel du MNS.

Pour simplifier grandement la tâche, une séquence de géotraitements a été développée via l'interface ModelBuilder d'ArcGIS 9 qui permet de créer des modèles, eux-mêmes





**Figure 6. Séquence de géotraitements ModelBuilder employée pour analyser la visibilité satellitaire.**

■ ■ ■ contenant plusieurs géotraitements (cf. figure 6). Son principal avantage est de pouvoir combiner et enchaîner les géotraitements les uns à la suite des autres de manière automatique. Enfin, grâce à cet outil, aucune programmation ArcObjects n'a été réalisée pour le projet.

Le modèle développé pour analyser la visibilité, qui est la troisième composante du prototype, comprend donc plusieurs géotraitements, à commencer par une petite série préliminaire permettant de tenir compte de la hauteur d'antenne du récepteur GPS/GNSS. L'idée est de surélever le MNS généré au préalable de la hauteur d'antenne spécifiée. Mais cette surélévation n'est que locale, aux endroits souhaités par l'utilisateur, celui-ci devant les matérialiser sous forme d'entités ponctuelles, linéaires ou surfaciques.

S'ensuit les géotraitements de visibilité avec d'abord le traitement d'ombrage par rapport au MNS localement surélevé et à un satellite a priori visible, dont les coordonnées entrées sont l'élévation et l'azimut calculées dans le fichier XLS. Ensuite l'image résultante est reclassifiée selon deux classes pour simplifier l'image (zones où le satellite est visible, zones où il ne l'est pas). Ces deux traitements sont à répéter autant de fois qu'il y a de satellites potentiellement visibles. Les images classifiées obtenues sont finalement additionnées entre elles pour avoir le raster de visi-

bilité. Au final, à l'aide d'une mise en page adéquate, on a alors la carte de visibilité satellitaire prévisionnelle, valable à une heure et une date données (cf. figure 7) et qui indique le nombre de satellites visibles depuis chaque pixel du MNS.

Pour résumer, le prototype qui a été conçu comporte trois composantes :

- un fichier XLS qui permet de calculer les coordonnées topocentriques de tous les satellites d'une constellation et d'en déduire les satellites a priori visibles ;
- un MNS au format raster couvrant la zone d'études, accompagné d'un fichier d'entités des lieux à analyser ;
- un modèle de géotraitements réalisant les analyses de visibilité par rapport au MNS et aboutissant à la carte de visibilité.

## Tests de validation

C'est une partie très importante car elle permet de valider le prototype, ses composantes et ses prévisions. Le principe des tests est le suivant : confronter les prévisions du prototype à des observations réelles faites sur le terrain. Ainsi, des observations sont effectuées sur les deux zones tests, des points étant levés et le Nombre de Satellites Visibles (NSV) noté. Ensuite, on réalise pour chacun des points levés une prévision grâce au prototype en intégrant les paramètres de date, d'heure et de lieu du levé. Enfin, on compare les observations et les prévisions au niveau du NSV.

Au terme de trois séries de tests, les résultats ont été les suivants (sur 57 points levés) :

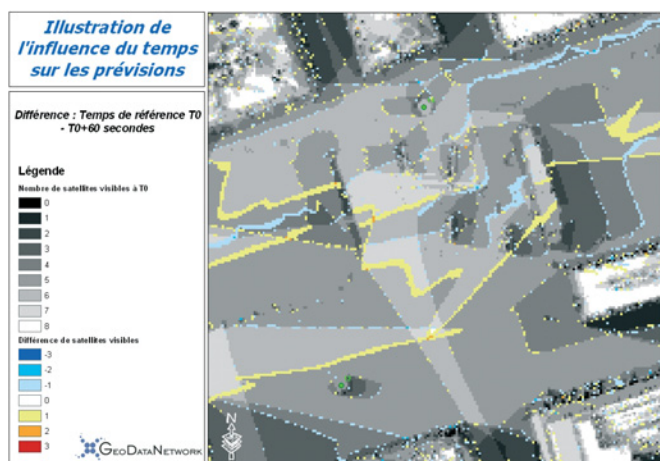
- 42 points où il y a concordance entre les observations et prévisions → 74 % du total,
- 8 points où il y a discordance → 14 %.

Le reste des points (12 %) sont des prévisions incertaines (points levés situés sur une limite entre deux valeurs de NSV sur la carte de visibilité). D'autre part, il est intéressant de noter que le prototype sous-estime toujours le NSV dans le cas de prévisions fausses ou incertaines ; ce qui est sécurisant.

Outre les résultats intrinsèques, ces tests ont permis de mettre en évidence les lacunes du prototype et même plus généralement de la prévision de visibilité satellitaire. En effet, suivant sa densité et son type de feuillage, voire d'autres paramètres, un signal de satellite peut traverser ou non la canopée d'un arbre. La grande majorité des fausses prévisions des tests est d'ailleurs due à des arbres n'ayant pas joué un rôle de masque à cause d'un feuillage transparent vis-à-vis des signaux des satellites. Le comportement de la végétation est donc un paramètre difficile à appréhender, et les tests montrent qu'il y aurait avantage à considérer des MNS fonctions des saisons pour obtenir de bonnes prévisions. On supprimerait de ce fait les arbres à feuilles caduques du MNS pour l'hiver, la fin de l'automne et le début du printemps ; et pour le reste de l'année, on ôterait seulement les arbres à feuillage non dense. C'est une idée



**Figure 7. Carte de visibilité satellitaire analysant les points symbolisés par les points jaunes.**



**Figure 8.** Durée de validité d'une prévision. En niveau de gris : prévision réalisée à une date de référence. En couleur : différence avec une prévision effectuée 60 secondes plus tard (pixel de 50 cm).

qui n'a pas été expérimentée lors du projet mais elle pourrait améliorer nettement les résultats.

Ensuite les tests montrent également la faiblesse du prototype à distinguer les satellites à signal faible, non pris en compte par les récepteurs GNSS dans les calculs de positionnement, des satellites à signal normal. Ce qui est assez handicapant mais difficilement modélisable dans le prototype. On peut aussi constater que le prototype ne prend pas en compte le phénomène de multitrajet, ce qui a peut-être engendré quelques fausses prévisions lors des tests.

Malgré ces points négatifs, les résultats sont tout de même très satisfaisants et permettent de valider le prototype réalisé.

Un bilan des erreurs et des études complémentaires ont conduit aussi à des conclusions intéressantes quant au fonctionnement du prototype :

- ancienneté de l'almanach à employer ;
- précision que l'on peut accorder aux différents paramètres d'entrée ;
- confirmation que l'usage d'almanachs, et non d'éphémérides, est suffisant ;
- répétabilité d'une prévision sur les jours suivants (chaque jour 4 minutes plus tôt) ;
- durée de validité d'une prévision.

Cette dernière information est d'ailleurs très importante car elle va conditionner l'avenir que l'on peut envisager pour ce projet. Les tests effectués montrent ainsi qu'une prévision du prototype ne peut guère être valable plus d'une minute, à cause de la rapidité de mouvement des satellites dans le ciel. Comme on peut le voir sur la figure 8, à partir de 60 secondes, le déplacement au sol des ombres des satellites est assez significatif : 1 m à 1 m 50 en moyenne, voire plus à certains endroits. Dès lors, si l'on veut prévoir la visibilité sur une période de temps, il va falloir de nombreux traitements assez longs à réaliser.

Exemple numérique : sur une demi-journée de 4 heures, avec des prévisions toutes les 2 minutes, cela représente 120 prévisions ; sachant qu'une seule prévision avec le prototype met environ 2 mn 15 s avec une assez puissante station de travail, une éventuelle application automatisant toutes les phases du prototype pourrait mettre au mieux 4 h 30 mn pour réaliser l'ensemble des prévisions. Nous tenons là le facteur le plus limitant de la prévision de visibilité satellitaire avec le prototype développé.

## Perspectives

Le dernier objectif du projet fut d'anticiper l'avenir, à la vue des divers tests et études menés, d'une éventuelle application finale qui serait développée pour des clients. Dans un premier temps, on s'est penché sur les produits envisageables pour l'application. Pour l'instant, le prototype fournit une carte de visibilité fixe qui indique le nombre de satellites visibles à une date et une heure précise. Ce type de carte est assez limité dans l'usage qu'on peut en faire et ce d'autant plus que la prévision est plutôt éphémère. En effet, un géomètre ne va pas utiliser ce prototype pour connaître la visibilité satellitaire à un moment exact mais plutôt sur une plage horaire comme une matinée ou une après-midi. L'idéal serait même que le prototype détermine le meilleur moment pour avoir une visibilité optimale. Dès lors, d'autres types de cartes doivent être créés pour répondre aux besoins réels des utilisateurs potentiels de l'application finale.

On peut ainsi réaliser d'abord une carte dynamique de visibilité qui permet d'avoir l'évolution de la visibilité des satellites sur une plage horaire, à raison d'une certaine fréquence d'analyse. C'est ici à l'utilisateur d'analyser lui-même les horaires et lieux optimaux. D'où l'autre type de carte qui présente un début d'analyse : une carte de visibilité minimale/maximale qui donnerait alors la pire ou la meilleure visibilité que l'on puisse avoir sur une période de temps. Une carte des horaires auxquels cette pire/meilleure visibilité survient peut être aussi associée. Des prototypes de ces nouveaux genres de cartes ont été réalisés durant le projet et d'autres sont aussi possibles.

Dans un deuxième temps, ce sont les perspectives de développement de l'application qui ont retenu l'attention. Les domaines qui pourraient être déjà intéressés sont évidemment la topographie (levés, implantations...) mais aussi les transports pour qui l'information de la visibilité satellitaire est de plus en plus importante. Quelques exemples d'applications : gestion des passages à niveaux, guidage de véhicules, gestion de réseaux routiers en fonction des transports collectifs, etc.

Quant au contexte d'utilisation, il est à l'heure actuelle difficilement envisageable de commercialiser un tel produit à des entreprises privées comme des bureaux de géomètres à cause des temps de traitement trop longs. Un géomètre ne peut pas attendre quelques heures pour



- ■ ■ avoir une prévision sur une demi-journée. On pourrait penser alors à la création d'un service web prévoyant la visibilité sur l'ensemble du Canton de Genève mais finalement, la perspective d'emploi la plus plausible serait plutôt comme outil d'aide à la décision dans des projets importants et de ce fait, il serait plutôt diffusé pour des bureaux d'études de grosses entreprises ou des institutions publiques. De la même manière que l'on réalise des études d'impacts sur l'environnement ou sur le paysage, des études d'ensoleillement ou des sondages géologiques pour un projet de construction, on pourrait faire ainsi des études de visibilité satellitaire en vue d'avoir la meilleure sécurité.

## Conclusion

Cette étude pour la réalisation de cartes de visibilité satellitaire a permis de répondre à de nombreuses interrogations que pouvait soulever le projet, en premier lieu sur sa pertinence. La problématique posée et le recensement des études et logiciels existants qui traitaient du sujet ont ainsi confirmé le bien-fondé de ce projet qui répond à un problème actuel. C'est d'autant plus certain que les diverses questions qu'a suscitées le projet lors des quelques présentations publiques montrent tout l'intérêt que portent les utilisateurs potentiels à ce genre de projet. Et pour répondre à la question qui revenait le plus souvent, ce projet de carte de visibilité est toujours d'actualité même avec l'intégration des diverses constellations GPS, GLONASS et bientôt Galileo. Certes, la visibilité sera meilleure et il sera bien plus aisé d'effectuer des mesures en milieux très masqués, mais il restera toujours des endroits où la visibilité sera difficilement appréhendable. Et cette application permettrait aussi d'avoir l'assurance d'obtenir une bonne visibilité en toutes circonstances.

Ensuite, la conception du prototype a montré que le projet était réalisable puisque celui-là arrive à générer des cartes de visibilité, objectif principal du projet. Puis des séries de tests pour le valider ont été menées avec des résultats satisfaisants : 74 % de bonnes prévisions contre 14 % de fausses, le reste étant des prévisions incertaines ; ils témoignent de la pérennité du projet. Cependant, les études complémentaires du prototype ont également mis en évidence des informations sur son fonctionnement, ses sources d'erreurs et ses limites. On voit à travers elles que le projet mériterait d'autres études complémentaires pour améliorer le prototype et ses prévisions. Elles montrent aussi que des progrès informatiques sont plus que nécessaires pour diminuer de façon significative les temps de traitements.

Enfin, des pistes ont été apportées pour l'avenir du projet : ses produits potentiels et ses perspectives. Si ces dernières paraissent assez limitées pour l'instant vis-à-vis de son contexte d'utilisation, elles pourraient s'élargir quand les performances informatiques auront augmenté et si d'autres études sont menées. ●

## Contacts

**Guillaume BIZOUARD**

guillaume.bizouard@gmail.com

GeoDataNetwork SA

www.geodatanetwork.ch

info@geodatanetwork.ch

Direction Cantonale de la Mensuration Officielle de Genève

Tél. : +41 (0)22 327 45 61

dcmo@etat.ge.ch

## Références

**ARINC Engineering Services [2004]**, *Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interfaces* – Interface Control Document.

**CARTSTENSEN L. & GERMROTH M. [2005]**, *GIS and Satellite Visibility: viewsheds from space* ; ESRI International User Conference, San Diego (USA), 25-29 juillet 2005.

**CHEVALIER P.A. [2002]**, *Une introduction didactique à la géométrie du GPS: 3ème partie – Fondements mathématiques du positionnement par GPS*, Haute Ecole Technique et Informatique de Bienne.

**GACHET G. [2005]**, *Etude comparative de différentes méthodes d'interpolation pour générer des Modèles Numériques d'Altitude raster à partir de points bruts LiDAR*, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne – Laboratoire des SIG.

**Navigation Center@ [2006]**, *US Coast Guard – Navigation Center*.

URL : <http://www.navcen.uscg.gov/>

**SMITH S.L. et al. [2003]**, *The effect of changing Grid size in the creation of laser scanner digital surface models* ; Geocomputation '03, University of Southampton, 8-10 septembre 2003.

**TIRTAINE T. & MARAIS J. [2005]**, *Validation expérimentale du logiciel de lancer de rayons Ergospace et estimation de la précision du MNE requise pour son utilisation* ; XYZ n°102, Association Française de Topographie, p.50 à 54/82.

## ABSTRACT

**Keywords:** visibility, satellite, GNSS, geoprocessing, LiDAR

*Nowadays, satellite-positioning technologies have a rapid development but they are still limited by low penetration factors that are weakening the strength of the signal received in "shadowed" places, like dense urban areas. However, airborne laser technologies foresee a new kind of applications to forecast satellite visibility by the modelling of masks in 3D with a Digital Elevation Model. Coupled to spatial analysis software, it could be possible to imagine the conception of an application, which could generate estimated maps of satellite visibility. This is the aim of this project: to create a prototype, to verify it, to analyse it, and to imagine its outlooks.*

# Le Wi-Fi pour le positionnement et la navigation en intérieur

■ Arnaud BÉTRÉMIEUX

*Cet article présente les recherches menées à l'Ecole de Technologie Supérieure de Montréal sur le positionnement d'un appareil Wi-Fi à l'intérieur des bâtiments. On utilise la technique dite du "RF fingerprinting", qui consiste à relever les caractéristiques (fingerprint) des signaux aux différents endroits du bâtiment lors d'une phase de calibration, puis à les enregistrer dans une base de données qui permettra par la suite d'associer caractéristiques du signal et lieu. Une nouvelle approche du RF fingerprinting est introduite, fondée sur l'utilisation de "stations de scan" Linux, approche qui permet la localisation de tout appareil Wi-Fi sans l'utilisation d'un logiciel particulier sur l'appareil, et avec une latence très faible.*

## ■ mots-clés

Wi-Fi, 802.11, positionnement en intérieur, "RF Fingerprinting", Réseaux de neurones artificiels, Modèles de Markov à états cachés

**L**es systèmes GNSS (navigation par satellite) sont de plus en plus efficaces et précis, mais ils ne peuvent malheureusement pas fonctionner en intérieur : les structures des bâtiments font obstacle à la propagation des ondes provenant des satellites, et les faibles signaux qui parviendraient tout de même jusqu'au récepteur seraient difficiles à distinguer du bruit électromagnétique créé par les appareils électroniques environnants. Par ailleurs, la grande quantité d'obstacles de formes et de natures diverses rend la propagation des ondes dans les bâtiments très complexe (effets multi-trajet très importants) ; l'utilisation de tout système de positionnement radio en intérieur est donc difficile et de nombreuses recherches sont en cours dans ce domaine.

Les quelques systèmes radio existant sur le marché et spécifiquement conçus pour un usage en intérieur sont généralement onéreux ou peu précis et peu réactifs. Les systèmes utilisant des lasers sont, quant à eux, limités à une seule pièce, les ondes lumineuses ne pouvant traverser les murs.

Si les applications du positionnement en intérieur ne sont pas toujours évidentes, elles sont pourtant nombreuses. Dans le domaine de la robotique par exemple, la capacité d'un robot à se repérer est indispensable à son autonomie. Pour une entreprise, il peut également être très intéressant de localiser des personnes ou du matériel. Le Wi-Fi, qui a été conçu pour permettre un accès par radio aux réseaux informatiques, est une technologie éprouvée, et pourrait bien être la solution la plus intéressante pour ce type d'applications :

- Le Wi-Fi a été conçu spécifiquement pour une utilisation en intérieur ; Les infrastructures Wi-Fi sont déjà présentes dans la plupart des bâtiments, et le matériel lui-même est très répandu et peu onéreux.
- Le fait d'utiliser pour le positionnement le même composant que pour la communication permet de réduire les coûts.

C'est pour toutes ces raisons que le Wi-Fi a attiré l'attention des chercheurs du laboratoire LACIME, de l'Ecole de Technologie Supérieure de Montréal,

qui travaillent sur le projet WINS (Wireless Indoor Navigation System), de positionnement et de navigation en intérieur.

## Le principe du positionnement par Wi-Fi

Une installation Wi-Fi classique (Figure 1) comprend généralement un ou plusieurs clients, appareils souvent mobiles qui souhaitent accéder au réseau (ordinateurs portables ou de poche par exemple), et un ou plusieurs points d'accès fixes, appareils qui font l'interface entre les clients et le réseau.

Lorsqu'en un endroit, plusieurs points d'accès peuvent être utilisés pour accéder à un même réseau, c'est l'appareil client qui doit décider sur lequel il souhaite se connecter. Pour cette raison, la norme 802.11, qui définit les standards pour les réseaux sans fils, impose que les appareils Wi-Fi soient capables d'indiquer la puissance du signal qu'ils reçoivent d'un point d'accès ou d'un autre appareil. Ainsi, le

■■■



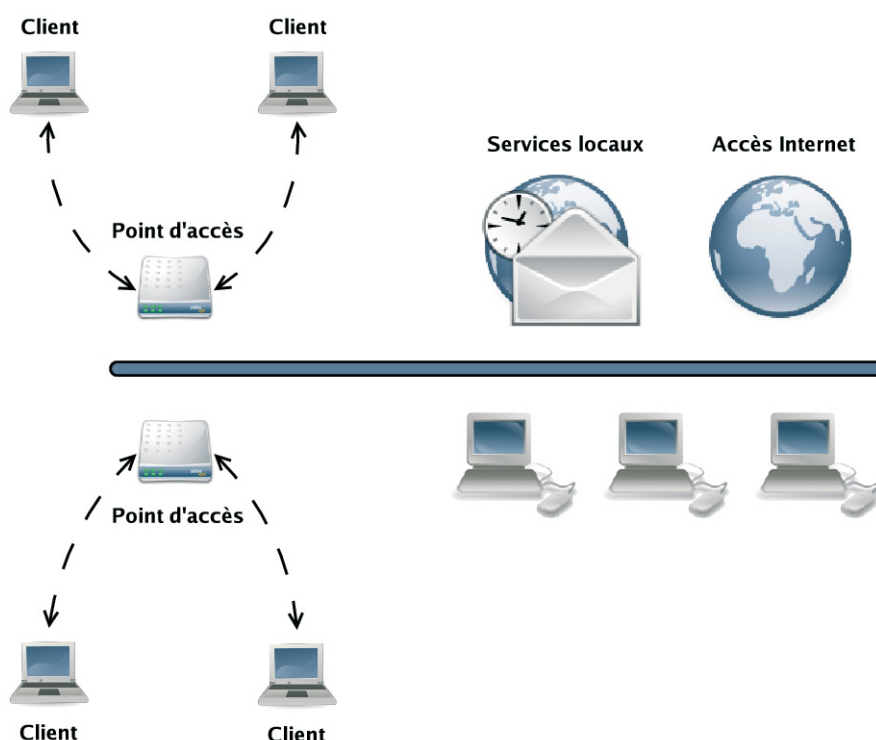


Figure 1. Topologie d'un réseau classique

- client peut sélectionner le point d'accès avec lequel la liaison radio fréquence sera la meilleure.

## ■ La méthode "Signature"

Si suffisamment de points d'accès sont disponibles dans un bâtiment, un appareil client peut calculer sa propre position de la position des points d'accès et des puissances du signal qu'il reçoit de chacun d'entre eux. Cette méthode (Figure 2) a été baptisée "Signature" dans le cadre du projet WINS, en référence à la "signature" du lieu que forment les puissances des signaux provenant des points d'accès. Elle est déjà utilisée dans des solutions commerciales, notamment celle de la société Ekahau: l'EPE ou Ekahau Positionning Engine. Elle a cependant deux inconvénients principaux:

- Il faut que l'appareil localisé soit équipé d'un logiciel adéquat, puisque c'est lui qui transmet les informations de puissance des signaux (il peut aussi éventuellement faire les calculs si sa capacité de traitement le lui permet) ;
- des points d'accès dont les zones de couverture se recoupent ne peuvent utiliser le même canal radio sans se

perturber. Le mobile doit donc scanner les 14 fréquences disponibles pour le Wi-Fi à la recherche des points d'accès, ce qui introduit une latence d'une à deux secondes dans le positionnement.

C'est pour ces raisons qu'une nouvelle méthode (Figure 3), dénommée "Perimeter", a été conçue par les chercheurs du projet WINS.

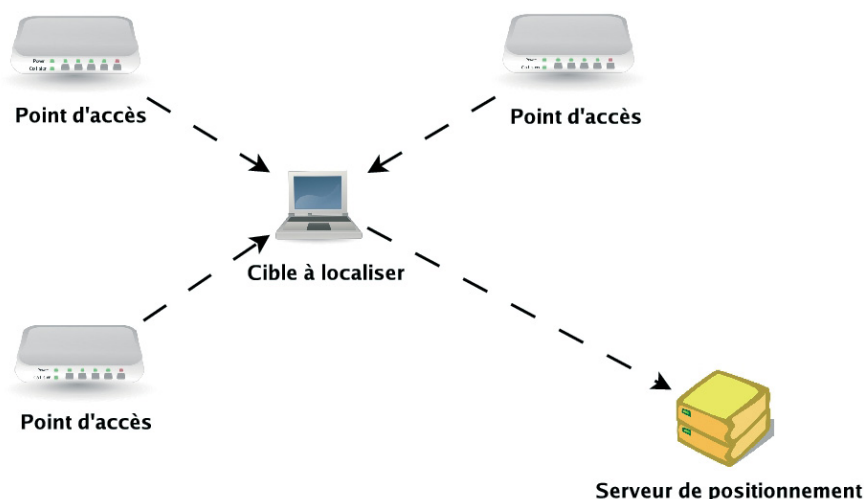


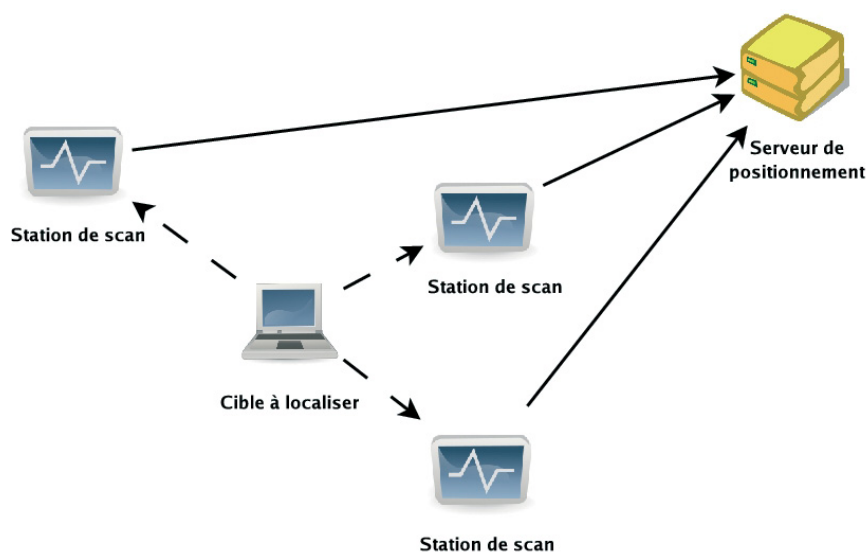
Figure 2. Principe de la méthode "Signature"

## ■ La méthode "Perimeter"

Cette méthode n'utilise plus les points d'accès, mais se base sur des ordinateurs supplémentaires, appelés "stations de scan". Chacune de ces stations repère les puissances des signaux émis par l'appareil à localiser lors de ses communications réseau. A partir des puissances relevées par plusieurs stations, un serveur de positionnement déduit la position de l'appareil.

Dans cette méthode, il n'y a plus besoin de logiciel sur le dispositif mobile à localiser ; celui-ci devient complètement passif. Par ailleurs, les stations ne faisant que recevoir, elles peuvent toutes opérer à la même fréquence radio que l'appareil à localiser, ce qui évite d'avoir à scanner les canaux et permet d'obtenir des mesures à plus haute cadence et donc d'augmenter la réactivité du système.

Les "stations de scan" s'appuient sur le mode "Monitor" offert par certains pilotes de matériel Wi-Fi du système d'exploitation libre Linux. Dans ce mode, le pilote transmet au système l'ensemble des données reçues, qu'elles soient ou non destinées à l'appareil. De plus, il indique en permanence les caractéristiques du signal. L'inconvénient de la méthode Perimeter est la nécessité d'utiliser des stations de scan. Ces stations peuvent être créées à partir de points d'accès



**Figure 3. Principe de la méthode "Perimeter".**

modifiés et coûteraient sensiblement le même prix (environ 100 €), mais elles viennent s'ajouter à l'infrastructure Wi-Fi existante du bâtiment, un même appareil ne pouvant être à la fois station et point d'accès.

Les méthodes Perimeter et Signature se complètent, car elles ont chacune des avantages et inconvénients différents selon l'application visée. Les chercheurs du LACIME ont donc décidé de développer les deux méthodes dans le cadre du projet WINS. Selon l'application les algorithmes de traitement sont différents ainsi que leurs performances.

## Déduire la position de puissance des signaux

La complexité de la propagation du signal rend plutôt complexe l'utilisation de modèles mathématiques d'où l'utilisation d'une technique dite de Radio Frequency (RF) fingerprinting. Cette technique consiste à relever certaines caractéristiques des signaux (ici la puissance) aux différents endroits du bâtiment lors d'une phase de calibration, puis à les enregistrer dans une base de données qui permettra par la suite d'associer caractéristiques du signal et lieu. Le RF fingerprinting a été développé à l'origine pour localiser les téléphones portables à partir des puissances des signaux transmis entre plusieurs relais

et le téléphone, en particulier pour les appels d'urgence (112 en Europe et 911 en Amérique). Par ailleurs, les variations importantes dans la puissance des signaux à la fois dues au bruit et à la mauvaise qualité des émetteurs rendent trop incertaine l'association directe entre "fingerprint" et la position du mobile. Un système probabiliste s'impose, et on propose ici l'utilisation de l'inférence bayésienne, la plus forte probabilité devant correspondre à la réalité.

### ■ Les automates de Markov à états cachés

Afin d'obtenir une plus grande précision, il est intéressant que le système ne considère pas que le dernier "fingerprint", mais qu'il associe l'ensemble des "fingerprints" relevées jusqu'à l'instant du calcul à l'ensemble de points (trajectoire) correspondant. De cette façon, les erreurs dues à l'imprécision de la mesure et aux variations imprévisibles de la puissance du signal seront compensées par l'obligation d'obtenir une trajectoire probable, à la fois dans l'absolu (continuité) et pour le mobile qui est positionné (sa vitesse maximale, sa probabilité d'être en mouvement, etc.)

Les Modèles de Markov Cachés (MMC) ou automates de Markov à états cachés – en anglais Hidden Markov Models (HMM) –

sont particulièrement adaptés pour modéliser l'association entre "fingerprints" et lieux. Ils permettent une représentation des points de calibration sous la forme d'un réseau nœuds/chemins, tout en associant à chaque chemin une probabilité (celle pour le mobile suivi de passer d'un nœud à un autre) et à chaque nœud ou endroit, les probabilités d'y voir chaque "fingerprint". Un aspect très intéressant des modèles de Markov est que des données ou mesures externes provenant d'autres systèmes de positionnement, ou de capteurs, même simplistes (accéléromètres par exemple) peuvent être prises en compte dans les probabilités pour refléter encore mieux la réalité. Une fois le modèle défini, l'algorithme de Viterbi permet de trouver la séquence la plus probable d'états cachés (trajectoire) ayant conduit à la génération d'une séquence de sortie donnée (fingerprints).

La difficulté principale est ici la complexité (donc la taille des matrices de définition) d'un modèle de Markov qui intégrerait à la fois tous les points du bâtiment nécessaires à un positionnement précis, et pour chaque point, l'ensemble des "fingerprints" probables. Un tel modèle rendrait le traitement par l'algorithme de Viterbi bien trop long. Une solution est de créer un modèle dynamique, dont les matrices de définition sont mises à jour en temps réel en fonction des "fingerprints" observées, de façon à obtenir un bon compromis entre précision du positionnement et temps de traitement.

Selon le mobile qui va être suivi, définir les probabilités du modèle de Markov peut être difficile. On obtient de meilleurs résultats en ne considérant que la dernière "fingerprint" plutôt qu'en tentant d'obtenir une trajectoire cohérente pour une série de "fingerprints" à partir d'un modèle mal défini.

### ■ Interpolation

Le système ainsi conçu ne pouvant positionner un mobile que sur un point auquel il a préalablement été calibré, il faudrait, pour obtenir une bonne granularité, calibrer un nombre important de points, ce qui serait trop fastidieux. Pour résoudre ce problème, on peut utiliser



■■■ un système d'interpolation pour déduire une carte de référence dense d'un jeu de points de calibration plus espacés. Ne pouvant pas associer de fonctions mathématiques à la répartition des puissances des signaux, il faut une technique d'interpolation susceptible d'interpoler tout type de distribution.

La méthode choisie se base sur des réseaux de neurones artificiels (Artificial Neural Networks ou ANN). On peut ainsi créer un programme qui "apprend", s'améliorant avec chaque nouveau point de calibration qui serait ensuite capable de prédire par interpolation les puissances des signaux qui seront rencontrées en n'importe quel point. Pour que l'interpolation fonctionne correctement, il faut que les points de calibration soient assez rapprochés dans les zones où les variations de signal sont importantes (en raison de nombreux meubles, objets ou recoins) mais ils peuvent être plus espacés dans les zones telles que les couloirs ou les pièces relativement dégagées.

## Résultats et conclusions

Le système WINS développé à l'Ecole de Technologie Supérieure de Montréal permet de localiser un nombre important d'appareils Wi-Fi. La latence est inférieure à la seconde, et l'erreur est inférieure à un mètre en statique, et à quelques mètres en dynamique, selon la structure, l'aménagement et la fréquentation des locaux. Ces résultats sont d'autant plus encourageants qu'ils ont été obtenus dans un des bâtiments de l'ETS, ancienne brasserie industrielle dont la structure est particulièrement néfaste à ce genre d'expériences, et qui abrite des laboratoires d'électronique et d'informatique, donc un nombre bien supérieur à la normale d'appareils électroniques susceptibles de perturber les liaisons radio. ●

## Contact

### Arnaud BÉTRÉMIEUX

Recherches au laboratoire LACIME de l'Ecole de Technologie Supérieure de Montréal, dans le cadre du projet WINS (Wireless Indoor Location System)  
arnaud.betremieux@arnoo.net

### René Jr. LANDRY

Professeur au laboratoire LACIME associé au département de génie électrique et instigateur du projet WINS  
rlandry@ele.etsmtl.ca

## Références

### Cisco wireless location appliance

<http://www.cisco.com/en/US/products/ps6386/products/datasheet0900aecd80293728.html>

### EkaHau Positioning Engine

<http://www.ekahau.com/?id=4500>

### Yi-Chao Chen, Ji-Rung Chiang, Hao hua Chu, Polly Huang, and Arvin Wen Tsui.

*Sensor assisted Wi-Fi indoor location system for adapting to environmental dynamics.* National Taiwan University, 2005. <http://mll.csie.ntu.edu.tw/papers/MSWiM05.pdf>

### Andreas Haeberlen, Eliot Flannery, Andrew M. Ladd, Algis Rudys, Dan S. Wallach, and Lydia E. Kavraki.

*Practical robust localization over large-scale 802.11 wireless networks.* Rice University, 2004. <http://www.cs.rice.edu/~ahae/papers/mobicom2004.pdf>

### John Krumm and Eric Horvitz.

*Locadio: Inferring motion and location from Wi-Fi signal strengths.* Microsoft Research, Microsoft Corporation, Août 2004. [http://research.microsoft.com/\\_horvitz/locadio.pdf](http://research.microsoft.com/_horvitz/locadio.pdf)

### John Krumm and John Platt.

*802.11 + regression = location.* Microsoft Research, 2003. <http://research.microsoft.com/workshops/MLUI03/platt-poster.pdf>

### Chahé Nerguizian, Charles Despins, and Sofiène Affes.

*A framework for indoor geolocation using an intelligent system.* INRS-Télécommunications, 2001.

### M. Ocaña, L. M. Bergasa,

**M.A. Sotelo, J. Nuevo, and R. Flores.**  
*Indoor robot localization system using WiFi signal measure and minimizing calibration effort.* Universidad de Alcalá. Departamento de Electrónica. Madrid. Spain, 2005.

**Julia Letchner** (University of Washington), **Dieter Fox** (University of

Washington), and **Anthony LaMarca** (Intel Research Seattle). *Large-scale localization from wireless signal strength.* University of Washington, 2005. <http://www.cs.washington.edu/homes/lechner/Papers/wifi-location.pdf>

## ABSTRACT

**Keywords:** Wi-Fi, 802.11, indoor geolocation, RF Fingerprinting, Artificial Neural Networks, Hidden Markov Models

*This article outlines our work and our findings in the development of an indoor positioning system based on Wi-Fi: the Wireless Indoor Navigation System (WINS).*

*The author introduces a novel approach to RF fingerprinting based on the use of Linux scanning stations, which allows the location of any Wi-Fi device without the need for dedicated software on the client side, with a very low latency.*

*The positioning algorithm is based on probabilities, and the fingerprint to location relation is considered in the context of a hidden Markov model, in which the reference locations are the possible system states and the fingerprints the resulting observations. To determine the most probable position, the WINS system uses either the Viterbi algorithm with the whole history of recorded fingerprints or a naive Bayes classifier with only the last one, depending on the situation and user preference.*

*To reduce the time needed for calibration, we interpolate between spaced (5 m) calibrated points with an RBF (Radial Basis Function) based artificial neural network, which generates a fine grid (1 m or less) of reference locations. Our system can provide meter-class accuracy for a device which has been static for a few seconds, and can position a moving device within a few meters. Latency is under one second.*

# Topographie : un demi-siècle d'évolution technologique

## *partie 2/4*

■ Paul COURBON



## *Les théodolites électroniques ou stations totales*

**A**vec les progrès de l'électronique, la diminution de la taille des distancemètres allait permettre de les associer au théodolite. Tout d'abord en les fixant au-dessus de la lunette, puis ensuite, en les incorporant au théodolite avec une mesure coaxiale par la lunette. Il faut y ajouter la mesure électronique des angles et les progrès de l'informatique permettant aussitôt l'enregistrement de ces mesures dans un carnet électronique que l'on vidait sur un ordinateur dès le retour au bureau. Le théodolite électronique, appelé aussi station totale, était né. Hormis les hauteurs de voyant, tapées manuellement par l'opérateur, plus de fautes de transcription ! Mais surtout un gain énorme de temps et la suppression du fastidieux travail de retaper sur le clavier de l'ordinateur les observations notées manuellement sur le terrain. Mais, ce terme de "station totale" employé par les constructeurs et repris par la plupart des utilisateurs ne fait pas l'unanimité. Pour le Professeur Rudolf STAIGER, tachéomètre ou théodolite électronique serait mieux adapté.

La documentation fournie par certains constructeurs à la pointe du progrès semble contenir des contradictions, parfois inexactitudes, qui n'ont pas facilité mes recherches. Le résultat de celles-ci n'est donc pas absolu.

### **Les premiers appareils**

En 1970, ZEISS Oberkochen avait sorti le SM11, à l'étude depuis 1968. Ce tachéomètre mesurait les angles classiquement, mais, première mondiale, il comportait un distancemètre Infrarouge intégré, dont les deux optiques d'émission et de réception étaient coaxiales avec la lunette (voir le paragraphe sur *les distancemètres à onde infrarouge*). Autre innovation, l'origine du cercle vertical était commandée par un compensateur pendulaire et non une nivelle. Ce petit bijou pesait 20,5 kg, plus 2,5 kg pour la batterie et 1,5 kg pour le trépied. Il fallait une claie de portage et de sérieuses aptitudes physiques pour le transporter entre les stations !

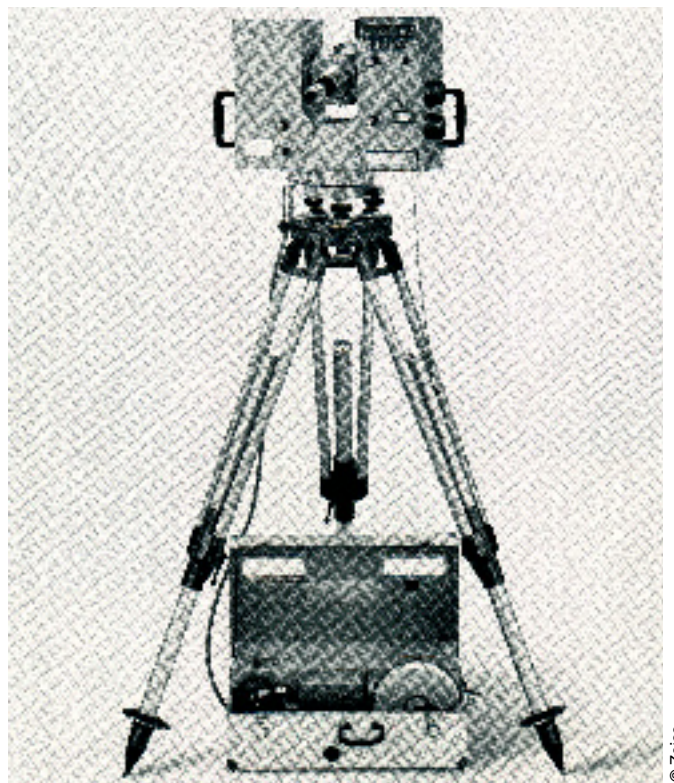
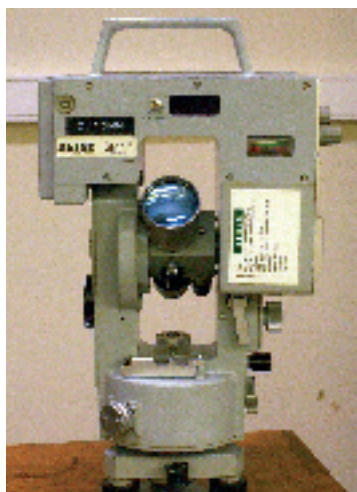


■ ■ ■ Mais, depuis 1968, ce constructeur travaillait sur le prototype d'un autre tachéomètre permettant en plus la lecture automatique des angles et l'enregistrement des mesures : le Reg ELTA 14 (abréviation de REGistriern des ELEktrischen TACHymeter). Ce gros appareil gris et peu esthétique était extérieurement le frère jumeau du SM1. Comme lui, il comportait le même distancemètre Infrarouge intégré, coaxial avec la lunette. Les mesures étaient faites automatiquement après pointé et commande par un déclencheur souple. Elles étaient enregistrées sur bandes perforées ! L'électronique était encore en gestation, aussi de nombreuses parties du procédé de lecture relevaient de l'électromécanique, d'où l'appellation "Elektrische". Nous verrons plus loin le principe général des lectures angulaires. Le prototype de 1968, aboutit à un modèle commercialisé en 1972, en petit nombre il est vrai. Cette année-là, un modèle adapté servit à toutes les déterminations des épreuves de lancer, lors des jeux olympiques de Munich. Il fut aussi employé par le cadastre allemand. Identique extérieurement au SM11, il pesait lui aussi 20 kg nu ! La portée maximale de son distancemètre variait de 500 m avec un prisme, à 1200 m avec sept prismes. La précision des mesures de distance était de 5 à 10 mm.

Le doute plane quant au Geodimeter (AGA) dont le modèle 700/710, présenté en 1971/1972, a été qualifié par le constructeur de première station totale. Un auteur lui attribue un distancemètre. Mais, sur la photo d'époque, la lunette du théodolite semble beaucoup trop fine, pour être associée à un distancemètre coaxial. Il faut dire qu'en 1971 le distancemètre était encore un appareil très volumineux. Il n'y a pas non plus de place au-dessus de la lunette pour en fixer un.

Dans le doute, je préfère ne pas classer ce modèle comme station totale. Mais, innovation très importante, les mouvements angulaires sont mesurés électroniquement et enregistrés sur le Geodat, que Geodimeter présente encore comme premier enregistreur de mesures. Je n'ai pu avoir de Trimble, qui a racheté Geodimeter, aucun détail sur la réalisation de cet appareil, ainsi que sur l'enregistrement et le stockage des données. De ce fait, je laisse au Reg ELTA 14 le titre de première station totale.

**Le Zeiss SM4, petit tachéomètre qui comme le SM11, mesure les distances électroniquement et les angles optiquement. De la génération suivante, sa taille a diminué et l'affichage de la distance se fait par LED.**



**Le Reg Elta 14. On voit la grosseur de la lunette, à laquelle est intégré le distancemètre coaxial. En haut à droite, la fenêtre où les mesures peuvent être lues une à une. En bas à droite, la petite fenêtre où peuvent être introduits les paramètres du chantier ou des visées. L'électronique n'est pas encore miniaturisée et l'ensemble est très gros. Sous le trépied, dans la caisse, la bande perforée où étaient enregistrées les mesures.**



**En 1968, début de l'association théodolite-distancemètre : un DI 8 monté sur un T2. On voit au sol l'imposant coffret où sont traités les signaux et effectués les calculs.**





**Wild TC1, théodolite électronique de la nouvelle génération avec deux versions : une avec enregistrement des mesures sur coffret extérieur et l'autre avec notation manuelle.**

**Le Wild TC 1000 de la génération suivante.**

**Le tachéomètre électronique est associé à un distancemètre démontable DI 1000 qui a une optique d'émission et une de réception.**



## La nouvelle génération

Les progrès de l'électronique, avec la miniaturisation des appareils de mesure, permet de produire à partir de 1977 des appareils moins encombrants, plus légers et plus performants, se rapprochant des stations totales actuelles. Les progrès de l'informatique permettent un meilleur enregistrement et un meilleur stockage des données.

En 1977, Hewlett Packard (HP) commercialise sa première station totale HP 3820A qui mesurait électroniquement distances et angles. Mais elle n'eut pas grand succès et après le lancement du modèle 3821, HP abandonna la filière. Wild (aujourd'hui Leica) lance sa première station totale TC1 en 1978. Sur la photo d'époque, la lunette et le distancemètre étaient coaxiaux, les mesures pouvaient soit être notées à la main, soit être enregistrées sur une cassette externe. A la même époque, Zeiss Oberkochen lance ses stations ELTA 2, puis ELTA 4, les observations étaient enregistrées sur carnet électronique externe.

Chez Wild, le théodolite T 1000 succéda au TC1 en 1981. Il était couplé au carnet électronique GRE3 et à un distancemètre (DI 1000 ou 2000) monté au-dessus de la lunette et non plus coaxial. Ce distancemètre non intégré pourrait sembler un recul technique. En fait, il était dicté par les conditions du marché de l'époque, certains utilisateurs ne faisant que de la triangulation et voulant éviter le surcoût d'un distancemètre onéreux ! On séparait donc le distancemètre du théodolite. Quant au carnet GRE3, il permettait la codification et l'intégration d'un système de points, en vue de leur implantation.

Dans le modèle TC 2000, produit de 1983 à 1987 on voit réapparaître un distancemètre coaxial avec la lunette, le menu est intégré. Mais, pendant de nombreuses années seront encore produites des stations dans lesquelles les excellents distancemètres DI 1000 ou DI 2000 seront montés au-dessus de la lunette.

En 1986, Geodimeter commercialise le modèle 400 qu'il présente comme la première station totale programmable. Pourtant, le Wild TC 2000 avait lui aussi un menu intégré. Le



© Photos transmises par Jorg Duedal

**le Wild TC 2000 suit le TC 1000. Il retrouve un distancemètre intégré.**



**Le Geodimeter 422 du début des années 1980. Le distancemètre n'est pas coaxial et comporte encore deux optiques séparées.**



**Le Nikon C 100, tachéomètre de base, acheté par mon cabinet en 1990. Il fonctionnait associé à un carnet électronique externe PSION organiser.**

■■■ programme était intégré au théodolite, permettant d'effectuer diverses tâches, telles que implantation ou codification, mais, sans carnet électronique ou micro-ordinateur externe. Le distancemètre était coaxial avec la lunette.

Il y eut d'autres constructeurs européens : Pentax avec sa série ATS, UOMPZ avec le T10E, Geo-Fennel avec le FET 120 et Spectra Precision avec sa série 600 M.

A partir de 1990, les constructeurs japonais font leur apparition en France : Nikon avec le C 100 puis la série DTM, Sokkia avec le SET 500 et la série du même nom, Topcon avec la série GPS, etc.

Cependant, les premières stations totales valaient cher : entre 100 000 et 150 000 F en 1985, ce qui, compte tenu de l'inflation, correspondrait à 30 ou 40 000 € aujourd'hui. Bien que certains cabinets en aient fait l'acquisition avant, il fallut attendre 1984-1985 pour voir leur généralisation chez les géomètres français.

### ■ La motorisation et la robotisation

En 1982, la société ETH de Zürich s'était lancée dans un projet de motorisation qui aboutit en 1986 au prototype Topomat. Entre 1985 et 1987, le constructeur suédois AGA Geotronics met au point un instrument servo-commandé capable de suivre une cible dans les applications hydrographiques. Cela aboutit en 1990 au système Geodimeter 4000, première station robotisée du monde. Leica suivra en 1995 seulement, avec la station TCA 1000 et plus tard avec la RCS 1100. D'autres constructeurs aussi, tel Zeiss (Elta S10/20), ou Topcon (AP-L1A). Là, plus besoin d'un opérateur derrière la station totale qui est reliée au prisme par radio. Le porteur de prisme travaille seul et, à partir d'un tableau de commande fixé à la canne du

prisme, il transmet toutes ses instructions à la station. De nouvelles versions avec d'autres développements et d'autres constructeurs ont suivi.

Cependant, à côté des stations robotisées existent aussi les stations motorisées qui ne sont pas commandables de l'extérieur, mais qui peuvent rechercher et se pointer sur un prisme. Plusieurs types de stations motorisées existent :

- Les stations manuelles avec motorisation assistée. Ils peuvent rechercher un prisme après avoir été grossièrement orientés ou se mettre dans une direction dont on a programmé les angles, mais ils ne peuvent pas être télécommandés. Ce sont les Leica TCM 1800, les séries S de Zeiss, 600 AF de Topcon, R 100 de Pentax, TPS 5000 de Leica. Ces stations motorisées sont utiles pour des auscultations ou mesures de stabilité.
- Dans les stations motorisées, il y a deux types de recherche automatique d'un objectif : les servothéodolites associés à une vidéocaméra. Ce sont les séries TM 3000 de Leica, ou E2-SE et ST de Kern. La recherche automatique peut être aussi faite par capteurs (Zeiss S.10, Leica TDA 5000, Leica TCA 1800, etc.).
- Il y a aussi les stations motorisées qui poursuivent automatiquement la cible. Parmi elles, celles qui font les mesures en statique, c'est-à-dire qu'elles peuvent suivre les mouvements du prisme après qu'une mesure ait été faite, mais c'est à l'opérateur de décider de la mesure suivante à la fin du mouvement du prisme. Cela peut être utile quand on travaille dans des zones de végétation où il n'est pas facile de voir le prisme. D'autres stations motorisées peuvent faire les mesures en cinématique, mais avec un mode tracking.



Station robotisée Topcon AP-L1A de 1999. L'antenne permet la liaison radio avec l'opérateur qui tient le prisme. Ici, il n'y a pas de clavier associé au prisme, mais un ordinateur portable sur lequel l'opérateur peut commander la station et faire le dessin en DAO au fur et à mesure du lever. Quant à la canne, elle porte six prismes, ce qui évite à l'opérateur occupé à son lever d'avoir à l'orienter.





**Le Leica TCM 2300 fait partie des stations motorisées. Il peut chercher ou suivre un prisme automatiquement, mais ne peut pas être télécommandé.**

**Son tableau de commande, plus complexe que celui d'un appareil de base, permet d'accéder à de nombreuses fonctions et d'introduire des paramètres plus facilement.**



### ■ Les distances sans prisme

AGA Géotronics fut aussi à l'origine des mesures de distance laser appliquées au théodolite, suite à une technique utilisée lors des coulées d'acier en fusion. On les trouve dans le système 600 des stations robotisées, introduit en 1994 et qui permet au choix, les mesures de distance infrarouge ou laser.

Il faut ajouter que l'apparition des lasers sur les théodolites amena le centrage laser sur les stations au sol.

LEICA commercialisa en 1998 sa première station totale utilisant les ondes infrarouges et le laser : le TPS 1100.

Le distancemètre laser associé au théodolite était une révolution pour les levers architecturaux et les levers de façades sans passer par la photogrammétrie. Au début, la portée de ces mesures laser était inférieure à 50 m. En 2005, on arrive à 2 ou 300 mètres et la plupart des tachéomètres électroniques en sont équipés.

## Mesure électronique des angles horizontaux

Comme nous l'avons vu plus haut, Zeiss Oberkochen, aujourd'hui absorbé par Trimble, fut pionnier en la matière avec le Reg Elta 14, bien que l'appareil ne soit pas classé électronique, mais électrique.

Dans la station totale, la structure de base du théodolite optique n'a pas changé. Il y a toujours une embase, une alidade, une lunette tournant autour de deux axes et les lectures angulaires se font toujours sur un cercle de verre (limbe). Là s'arrête la similitude. Il n'y a plus de mesure stadimétrique des distances, mais un distancemètre électronique incorporé. Le

cercle de verre n'est plus gravé, mais comporte un codage électronique. Seul le pointage est fait par l'œil de l'opérateur, mais, la lecture des mesures et leur enregistrement ne font plus intervenir ni son œil, ni son crayon !

Nous avons vu précédemment la mesure électronique des distances. En ce qui concerne les lectures angulaires, plusieurs types de procédés peuvent être envisagés, mais nous allons en premier lieu nous attacher au Reg ELTA 14.

### ■ L'ancêtre Reg Elta 14

La description en détail du procédé de mesure a été faite par les Professeurs Deumlich et Staiger (voir bibliographie) et nous ne donnerons que le principe général de cet appareil.

En premier lieu, le limbe en verre avec les graduations gravées des théodolites classiques avait été remplacé par un limbe en verre portant un codage absolu. Ce limbe était lié aux mouvements de la lunette par un dispositif complexe de roues embrayables comportant 400 dents correspondant donc à un mouvement de 1 gon.

Le système de lecture se faisait en deux temps, comme pour les théodolites classiques, avec en premier lieu une estimation approchée. Cette estimation était déduite d'un contact électrique en or sur quatre secteurs du limbe. Un classement matriciel décodait les informations reçues pour obtenir cette estimation. Un dispositif lié au fin mouvement de  $\pm 0,8$  gon permettait d'avoir les appoints et les mesures étaient données au mgon. Quant au cercle vertical, son origine n'était plus déterminée par une nivelle, mais par un compensateur pendulaire.

Les LED (Light Emission Diod) et cristaux liquides n'existaient pas encore. On pouvait cependant lire les trois mesures d'un point, l'une après l'autre, sur une fenêtre à tambour, comme pour le MS11. Cependant, les résultats étaient directement enregistrés sur bande perforée.

### ■ Les différents procédés de mesure électronique des angles

#### • Codage absolu sur plusieurs "tracés type code"

C'est ce type de codage qui avait été adopté sur le Reg ELTA 14, mais avec un procédé de lecture différent des procédés actuels. Il a été repris sur des appareils de la génération suivante : ELTA 2, S10 et S20 de Zeiss et HP3820 de Hewlett Packard.



**Le codage absolu du limbe du Reg Elta 14, avec dans la partie interne le codage correspondant aux quatre quadrants.**

■ ■ ■ • **Codage absolu sur un "tracé type code"**

La lecture électronique d'un tel codage a été rendue possible par les capteurs CCD (Charge Coupled Devices) mis au point par les laboratoires Bell à partir de 1970. Mais, le temps de développer cette technique, elle ne fut employée que plus tard par les constructeurs.

Le cercle verre comporte des graduations encodées. Par l'intermédiaire d'une ligne CCD (Charge Couple Device), le capteur transforme la lumière d'un émetteur traversant le limbe en signal électrique digitalisé. Un convertisseur traite ensuite ce signal électrique en image numérique. L'angle précis est déduit d'une interpolation. C'est le procédé adopté sur les Leica T 1000 ou 1600, entre autres. Depuis 1984, LEICA utilise dans ses stations totales, des encodeurs absolus qui conservent la lecture, même si on éteint la station au cours d'un tour d'horizon. Cela évite aussi de réinitialiser le cercle vertical.

• **Codage binaire et "tracés type code" parallèles**

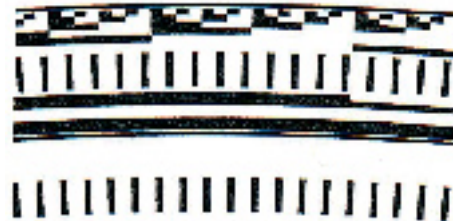
Le codage est fixé sur des cercles concentriques appropriés, chaque graduation ayant une période double de la précédente. Ce procédé est coûteux, mais il permet de conserver l'angle mesuré après l'extinction de l'appareil. Je ne peux citer d'appareils employant ce procédé.

• **Codage incrémenté de "graduations linéaires"**

Par une application numérique et analogique, les traits de la graduation sont incrémentés. On appaire une diode électro-luminescente et une photodiode pour faire ressortir le caractère clair-obscur de ces graduations. Suivant les appareils, le rayon émis par la diode lumineuse est réfléchi par le cercle ou le traverse avant d'être capté par la photodiode. Sur le TC1 de Wild, deux systèmes de balayage diamétralement opposés étaient utilisés. Le limbe, de 80 mm de diamètre était recouvert d'un raster réfléchissant de 12 500 graduations correspondant à un intervalle de 32 mgon. Une grille de phase permettait une interpolation de 1/16, ce qui permettait d'apprécier le mgon grâce aux deux systèmes diamétralement opposés. Bien qu'avec des systèmes de lecture ou d'interpolation propres, les appareils E2 de Kern, les séries E de Zeiss, GTS de Topcon ou DTM 750 de Nikon obéissaient à un procédé de base identique.



**Codage incrémenté des graduations.**



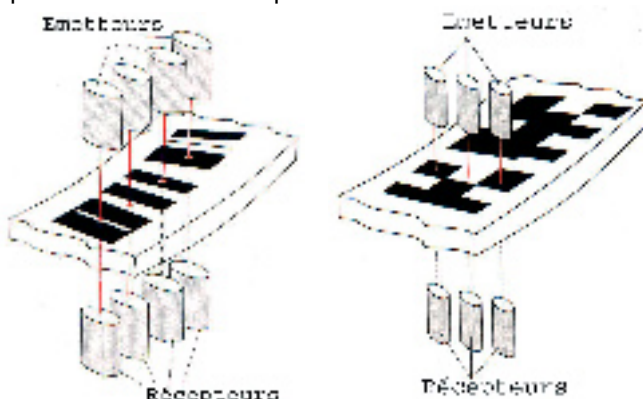
**Sur le Zeiss Elta 2, codage absolu avec des graduations intérieures décalées d'un demi-intervalle.**

• **Procédés de haute précision**

Pour les mesures très précises (0,1 à 0,2 mgon), les techniques précédentes comportent des compléments ou des variantes.

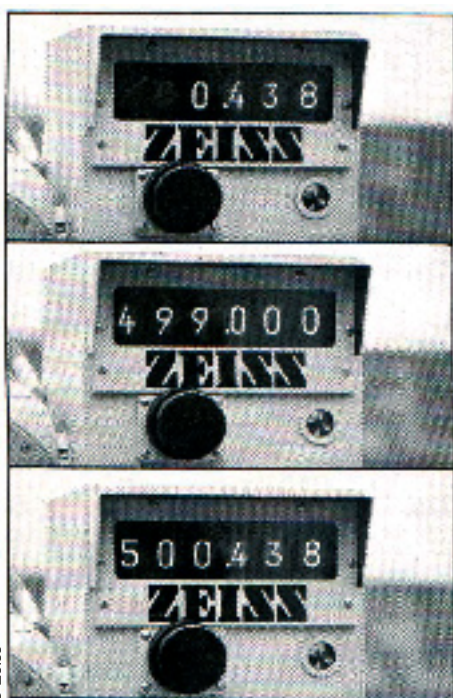
L'ELTA 2, comme nous l'avons vu, utilise le codage absolu. Ce codage absolu est situé du côté extérieur du cercle. Mais, il est complété vers l'intérieur par deux séries de graduations linéaires coaxiales de 0,5 gon d'écart. Ces deux séries concentriques sont décalées l'une par rapport à l'autre d'une demi-graduation et un système de prismes permet de faire les lectures sur deux zones diamétralement opposées. Ce procédé permet d'éliminer l'erreur d'excentricité et d'obtenir des lectures à 0,25 gon près. Pour les mesures fines (appoint), le secteur de 0,25 gon peut être divisé par une grille en 1 250 intervalles. Grâce à une lame à faces parallèles à laquelle est associée une lame raster graduée non linéairement, on peut faire une lecture à 0,2 mgon. Sur l'E2 Kern, le cercle est incrémenté avec 20 000 divisions. Les deux côtés diamétralement opposés du cercle sont superposés avec un léger changement d'échelle (1,005) qui provoque un moiré. Son analyse à travers quatre photodiodes permet la lecture à 0,1 mgon.

Sur la série T2000 et T3000 de Leica, le constructeur innove avec un procédé nommé "lecture dynamique du limbe". Le cercle comporte 1 024 secteurs alternativement clairs et sombres, dont un secteur origine. A chaque mesure angulaire, un mécanisme fait défiler le cercle sur un tour complet, face à deux dispositifs de lecture : l'un lié à la partie fixe de la station et l'autre à la partie mobile. Le comptage différentiel des graduations et le déphasage entre les dispositifs de lecture donne la lecture angulaire exacte. La lecture tient compte de la moyenne des 1 024 angles déterminés par les graduations du cercle entier, éliminant ainsi les erreurs de graduation et d'excentricité. Cependant, le défilement du cercle sur un tour complet prenait du temps (jusqu'à 1 s) et n'était pas adapté au suivi de cible. De plus la méthode était coûteuse, aussi a-t-elle été abandonnée.



**Codage absolu sur un tracé codé.**

**Codage binaire sur tracé parallèle.**



**Système de lecture du SM11 sur tambour chiffré.** L'appoint indiquant les mètres et les décimales commence par 0. La longueur totale ne peut donc être 499,438, mais 500.438.

### ■ Affichage des lectures

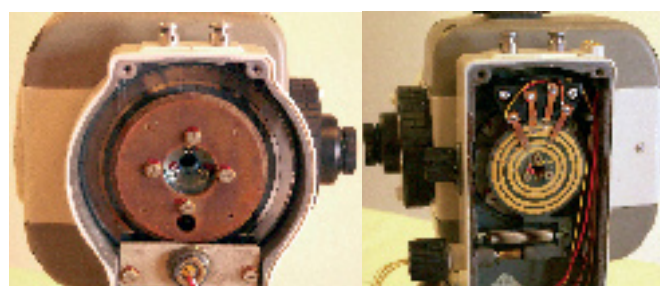
Les LED (Light Emission Diod) ne furent employées pour la première fois en topographie qu'en 1971 sur les calculatrices HP. Les cristaux liquides arrivèrent deux ou trois ans après. Il fallut attendre encore un peu pour les voir apparaître sur les appareils de terrain. Avant la généralisation de cette nouvelle technique, les chiffres sur tambour, comme pour les compteurs kilométriques de voitures servaient à afficher les résultats. C'était le cas pour certains distancemètres électroniques et pour le ZEISS SM11 (voir le paragraphe : *Les premiers appareils*).

## Mesure électronique des angles verticaux

Le principe de lecture et d'enregistrement reste le même que pour les angles horizontaux. C'est la définition de l'origine 0 des angles verticaux qui va changer. Pas de bulle à régler car il y a un compensateur.

Sur les théodolites optiques de la dernière génération, il y avait déjà un compensateur pendulaire qui agissait directement sur la lecture en modifiant le chemin optique. Seul le Kern DKM2 avait innové avec le premier compensateur liquide.

Sur le Reg ELTA 14, le compensateur était pendulaire, comme sur les théodolites optiques précédents. En 1977, HP avec sa série 3800, allait généraliser les "compensateurs à liquide". Dans ce type de compensateur, la partie mécanique du pendule a disparu. Le rayon émis par une diode se réfléchit sur la surface d'un liquide avant d'être recueilli par un capteur. La surface du liquide du compensateur étant horizontale, ce dispositif permet ensuite de déterminer la position exacte du 0 sur le limbe et de supprimer ou rendre la collimation verticale très faible. Plusieurs variantes de compensateurs à liquide ont été conçues par les différents constructeurs, mais le mercure qui servait de liquide dans les premiers modèles a été abandonné. Souvent, une petite rotation



D'un côté, cercle vertical incrémenté d'un appareil Nikon. De l'autre côté, balais-contacts liés à la molette de fin pointé.

aller-retour de la lunette, de part et d'autre de l'horizontale, permet d'initialiser le cercle vertical.

## Précision des stations totales

Le remplacement de la gravure mécanique des limbes en verre par une graduation codée ou incrémentée électroniquement a diminué l'erreur de graduation des cercles. Aussi, l'ignore-t-on sur les appareils de classe moyenne. Leur précision est de 1 à 2 mgon contre 3 à 10 mgon pour les anciens tachéomètres optiques. De plus, des procédés annexes ont permis de supprimer l'erreur d'excentricité.

Il faut aussi noter que le procédé de lecture électronique n'est pas adapté aux multiples répétitions avec origines différentes. Aussi, même avec les appareils de grande précision (0,1 à 0,2 mgon), les fastidieuses observations avec multiples répétitions sur origines différentes du limbe ont disparu. En ce qui concerne certains de ces appareils, nous avons vu l'utilisation de procédés complémentaires, permettant de diminuer encore l'erreur de graduation.

Comme sur les théodolites optiques, les autres erreurs sont éliminées par un double retournement de la lunette. Mais, cela ne signifie pas que la précision angulaire de 0,1 mgon puisse être obtenue par une simple mesure CG-CD avec un théodolite de précision! Quand on vise un objectif lointain, la précision dimensionnelle de cet objectif et les conditions atmosphériques doivent être évidemment prises en compte, une seule paire de mesures ne peut alors suffire... Pour les distances courtes, d'autres paramètres entrent en jeu.

Le caractère absolu de l'informatique et de l'électronique a fait négliger la réalité du terrain à trop d'opérateurs. L'abandon de la triangulation pour le GPS a trop souvent fait oublier la correspondance "dimension-angle" : 0,1 mgon est l'angle sous lequel on voit un objet de 1 cm de diamètre à 6,4 km, ou de 0,1 mm à 64 m et cela est négligé, même dans l'enseignement!

## Levés codés, dessin numérique sur le terrain

L'une des contraintes du lever de détail était le dessin manuel d'un croquis de terrain. Le porteur de prisme chargé de ce croquis y notait les numéros de tous les points levés, ainsi que le signe conventionnel correspondant ou les liaisons des détails





**Le porteur de prisme a en bandoulière l'ordinateur portable sur lequel il commande la station robotisée et sur lequel, il dessine en DAO au fur et à mesure du lever. On voit en bas à gauche l'antenne permettant la liaison avec la station robotisée. La souris est du type crayon. Le logiciel de DAO est ici le TOPOSOFTE.**

- linéaires. Cela alourdissait les opérations de terrain et, surtout, le report au bureau. C'est ainsi que fut imaginé le codage, l'opérateur tapant un code, tant pour les points que pour les lignes à tracer, en accord avec celui adopté sur le logiciel de Dessin Assisté par Ordinateur (DAO). Avec le carnet électronique GRE3, Wild semble avoir été le précurseur, mais, c'était aux utilisateurs à programmer un lien informatique entre le théodolite et le logiciel de dessin.

Cependant, le codage avec son facteur humain, est encore sujet à erreurs ou oublis. Actuellement apparaissent des logiciels, tels GEOVISUAL ou TOPOSOFTE. Le porteur de prisme a en bandoulière un petit ordinateur portable, en liaison radio ou bluetooth avec la station totale, et sur lequel il peut dessiner le levé avec un logiciel de DAO, au fur et à mesure que sont déterminés les points. Le dessin étant fait sur le terrain auquel il peut être immédiatement comparé, la méthode diminue les risques d'oublis et d'erreurs. Il diminue aussi le temps d'exploitation au bureau, mais il augmente celui de terrain. Nous revenons au bon procédé de la planchette, mais d'une manière informatique !

## La technique Bluetooth

C'est une spécification des télécommunications qui utilise une technologie radio courte distance destinée à simplifier les connexions entre appareils électroniques. Elle supprime les liaisons par câble entre de nombreux appareils. Cette technique fut étudiée à partir de 1994 par le constructeur suédois Ericson. Son nom a été donné en hommage au roi Harald 1er dit Blåtad (Dent bleue), qui unifia durant son règne Suède, Norvège et Danemark. Elle voit son application effective en 1999, mais il faut attendre 2002 pour voir ses débuts en topographie. Elle permet, peu à peu de s'affranchir des innombrables fils joignant les appareils topographiques. Elle utilise les bandes de la fréquence ISM (Industrial Scientific Medical) qui vont de

2,4 à 2,4835 GHz. On pense que dans les années à venir elle va permettre des débits 100 fois plus importants.

## Les stations totales en 2005

Comme vu précédemment avec les distancemètres, l'arrivée du GPS a exclu le théodolite de la plupart des travaux de canevas topographique ou géodésique. Par contre, employées par des utilisateurs de plus en plus nombreux, le nombre de stations totales a explosé. Outre les levers de détail, les travaux publics, les levers architecturaux, elles sont utilisées en industrie, pour la surveillance d'ouvrage et les auscultations qui peuvent être faites en mode automatique. Le meilleur exemple de ce type de travail a été réalisé à Amsterdam par les travaux spéciaux de l'IGN.

Enfin, les constructeurs, LEICA et TRIMBLE en particulier, recherchent activement un appairage GPS-Station totale (voir le chapitre GPS).

## Les regroupements en topographie

Dans les pages qui ont précédé, nous avons beaucoup parlé d'AGA Geotronics, précurseur dans de nombreux domaines, de ZEISS lui aussi à la pointe de la technique et enfin de WILD. Aujourd'hui, ces noms prestigieux ont disparu. Du fait de l'arrivée de constructeurs japonais (Nikon, Sokkisha, Topcon) et d'une concurrence de plus en plus dure, de nombreux regroupements se sont faits en topographie. En 1988, après l'association de Wild avec le photographe Leitz, l'association Wild-Leitz absorbe KERN, puis 1990 voit la fusion de Wild-Leitz avec la Cambridge Instrument Company, pour former LEICA (contraction de Leitz et Cambridge). En 1997, Zeiss est racheté par Spectra-Precision qui est à son tour absorbé en 2001 par la marque de GPS américaine TRIMBLE, laquelle rachète aussi le suédois AGA Geotronics. Nous verrons plus loin les regroupements qui se sont faits en lasergrammétrie, technique pourtant nouvelle...

## Bibliographie

**RUEGER J.M. 1990** *Electronic Distance Measurement*, Springer-Verlag, Berlin

**CHEVES M. 2000** Geodimeter the first name in EDM, Professional Surveyor Magazine n°2.

**DEUMLICH F. - STAIGER R. - 2002** *Instrumentenkunde der Vermessungstechnik*, 9<sup>e</sup> édition, Wichmann, Heidelberg. Cet ouvrage remarquable devrait figurer dans la bibliothèque de toutes les écoles de topographie. Il n'existe malheureusement pas en version anglaise ou française.

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

**Sites Internet :** [www.wild-heerbrugg.com](http://www.wild-heerbrugg.com) Musée virtuel Wild réalisé par Jorg Duedal (c'est le site le plus complet, réalisé bénévolement par un ancien employé de Wild.)  
<http://americanhistory.si.edu/collections/surveying/index.htm>



## *Autres instruments de mesure ou de lever*

### **Les niveaux code-barres (ou niveaux de précision numériques)**

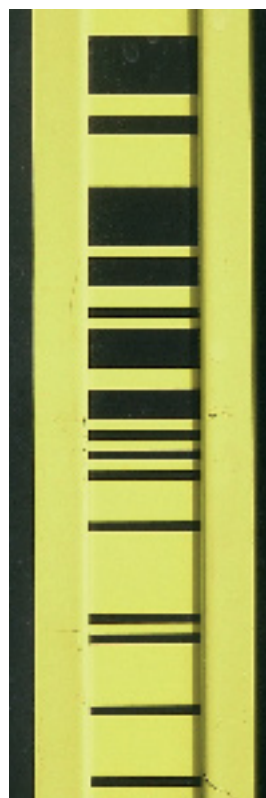
Le code-barres fit son apparition en 1974, employé entre autres pour la gestion des prix dans les centres commerciaux. Les constructeurs de matériel topographique le transposèrent au nivellement, les graduations centimétriques des mires étant remplacées par une graduation "code-barres" et l'œil humain par des diodes détectrices.

La lecture de la mire codée repose sur un système électronique de traitement d'image, intégré à l'instrument. Cela permet d'avoir directement les dénivellations et de les mettre aussitôt en mémoire. On évite ainsi les fastidieux et nombreux calculs de contrôles auxquels devaient s'astreindre auparavant les niveleurs, à partir des trois lectures sur les trois fils du niveau. Pour le nivellement de précision, toutes les procédures de contrôle faites manuellement sur les carnets d'observation de l'IGN étaient impressionnantes !

Rentré au bureau, on peut vider les observations sur ordinateur. Ce nouveau procédé évite ainsi les erreurs de lecture et de transfert. Le gain de temps est encore augmenté et les risques d'erreur sont quasiment éliminés.

Il est aussi possible, si on le désire, de noter sur un carnet les observations affichées à l'écran. Ce qui peut avoir une utilité au cours de la présence sur le chantier.

Grâce à un programme intégré, on peut encore calculer en continu les points de rayonnement, ou encore compenser un cheminement directement, après fermeture.



**Une mire de nivellement  
"code-barres".**

© Instrumentenkunde der Vermessungstechnik

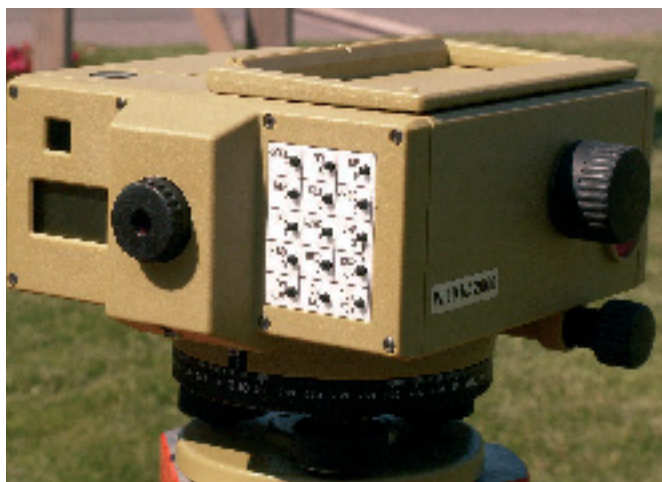


**A gauche, des mires  
classiques, à droite une  
mire "code-barres"**





Un niveleur classique avec son carnet. Fil supérieur, fil niveleur, fil inférieur. Les trois lectures étaient suivies de soustractions pour contrôle. Dans le nivellement de précision, de multiples contrôles étaient faits sur les visées AV, AR et en fin de page.



Le Leica NA 2000, premier niveau numérique apparu sur le marché. Les multiples boutons permettent d'introduire les altitudes des repères de départ et d'arrivée ou de choisir différents modes opératoires.



Le niveau Wild NAK2 de la dernière génération avant l'apparition des niveaux numériques. Cet excellent niveau, sur lequel peut être adaptée une lame à faces parallèles pour lectures au 1/100 mm, a un compensateur pendulaire. La bulle sphérique de l'embase suffit pour la mise en station.



Le NiDi 12 de Zeiss devenu Trimble après l'absorption de Zeiss.

Cependant, si tout le dispositif de lecture, de mémorisation et de calcul relève de l'électronique et de l'informatique, le système de définition de l'horizontalité de l'axe optique reste mécanique, avec un compensateur pendulaire, comme sur les niveaux optiques.

Nous rappelons que le compensateur pendulaire, bien qu'apparu à la fin des années 1960, ne se généralisa qu'au milieu des années 1970. Il nécessite que l'horizontalité de l'axe optique du niveau soit dégrossie avec la nivelle sphérique à une dizaine de cgonns près. Le compensateur pendulaire agit sur la lecture en modifiant le chemin optique.

Le premier niveau code-barres, le NA2000 fut produit par Wild-Leica en 1990, Topcon suivit peu après avec les modèles DL-101 et 102. Par la suite, Sokkia avec le modèle SDL 30 et



Zeiss avec le modèle DiNi 12 produisent aussi ce type d'appareil.

L'IGN fit l'acquisition de son premier niveau code-barres, le NA3000 de Leica, en 1993, qui associé à une méthode motorisée, permettait de faire 50 km de nivellement de précision dans la journée.

## Les scanners lasers (ou lasergrammétrie)

Cette technique toute nouvelle n'a pas encore défini ses termes, aussi peut-on la trouver sous plusieurs dénominations. Devais-je la classer avec la photogrammétrie ? Son aboutissement étant un modèle numérique du terrain et non un plan proprement dit, j'ai préféré la traiter à part.

Elle découle de l'application de la technique des diodes laser pulsées, vue précédemment avec les distancemètres laser, qui pouvait émettre jusqu'à 10 000 tirs à la seconde. Un système de miroirs pivotant permet un balayage laser vertical, puis horizontal, alliant mesures angulaires et mesures de distance. On peut ainsi obtenir en quelques minutes un nuage de centaines de milliers ou de millions de points 3D.

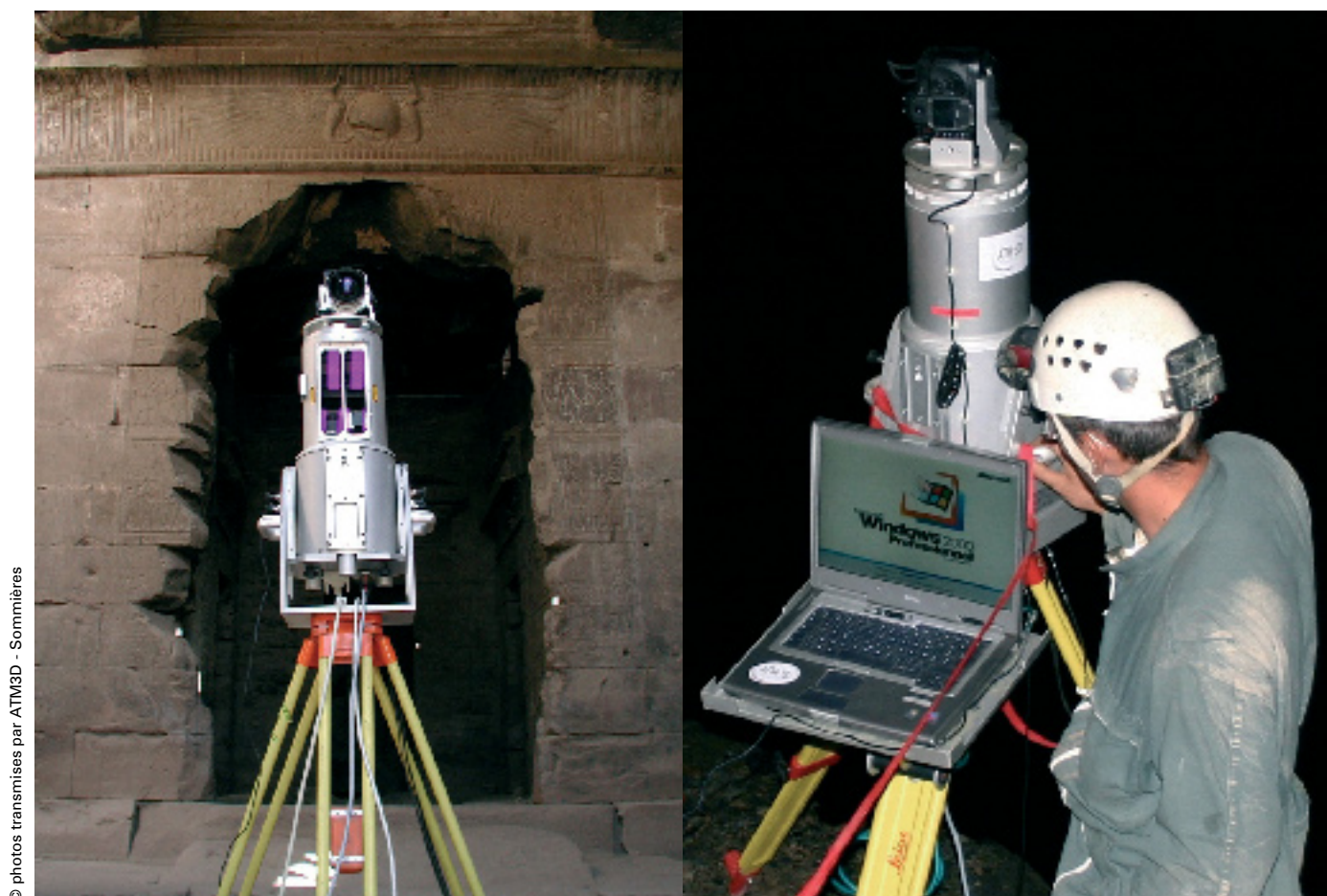
Deux progrès techniques ont permis le développement des scanners laser. D'abord, l'arrivée des sources laser à semi-conducteurs, permettant des longueurs d'onde plus élevées avec de plus fortes puissances, a permis d'accroître la portée des mesures de distances laser sans réflecteur. Elle peut atteindre maintenant 1 km. Il faut y ajouter les progrès de l'informatique permettant de traiter plus rapidement une grande masse de données.

Les distances peuvent toujours être mesurées par le déphasage entre l'onde émise et celle reçue (Leica 4500, FARO). Mais aujourd'hui, avec les progrès sur la mesure du temps, on peut aussi déduire les distances à partir du temps de trajet, appelé à cette occasion "temps de vol" !

Ils trouvent leur meilleure application dans les levés architecturaux 3D (patrimoine culturel), les levés de carrière, falaises ou glissements de terrain. Souvent couplés à une caméra numérique interne qui facilite la lecture de l'image, ils génèrent un "nuage de points", à une cadence qui peut aller de 2 000 jusqu'à 10 000 points par seconde.

Une façade levée par balayage peut comporter un million de points ou plus, lesquels donnent une image fidèle qu'il suffit

■ ■ ■



© photos transmises par ATM3D - Sommières

**Lasers Riegl LMS Z390 et 4201 utilisés à Karnak (Egypte) pour des levés architecturaux et dans le Gouffre de la Pierre Saint-Martin pour lever et déterminer le volume de l'immense salle de la Verna. Remarquer la caméra couplée Nikon D100 située au-dessus de l'appareil.**

■ ■ ■ de référencer en se calant sur des points d'appui (cibles réfléchissantes) déterminés en XYZ, dont le nombre varie en fonction de la morphologie et de la dimension du lever.

La fondation EDF avait financé en 1994 le levé de la grotte Cosquer dans les calanques de Cassis. Ce levé, encore expérimental, fonctionnant avec une technique mise au point par M. SOISIC, préfigurait l'arrivée des scanners-lasers. Pour rappel, le Soisic est une mesure par triangulation avec une portée de l'ordre de 25 m (pour le modèle S25 qui comportait un bras avec à une extrémité l'émetteur laser et sur l'autre extrémité un capteur CCD qui photographiait la position du spot laser sur l'objet) alors que les autres scanners fonctionnent avec des mesures de "temps de vol" du laser. La même année, Cyrax expérimentait lui aussi le scanner laser aux Etats-Unis. Optech parle des premières recherches en 1987. Bien que récente, cette technique a fait l'objet de regroupements. Soisic a été absorbé par Mensi, lui-même absorbé par Trimble, Cyrax a été absorbé par Leica. Subsistent encore, entre autres, le constructeur autrichien Riegl, FARO et l'américain Optech. Ces appareils sont encore d'un prix élevé oscillant entre 70 000 et 130 000 euros en 2005, sans le logiciel de traitement.

La difficulté actuelle réside dans le traitement et l'exploitation du volume monumental des mesures effectuées. Les outils informatiques traditionnels ne sont plus adaptés à la gestion de fichiers de plusieurs millions ou centaine de millions de points. A titre d'exemple, le relevé d'un tunnel de 7 km de long par la société Atm3d comportait 950 millions de points ! Aussi, leur mise en œuvre nécessite des spécialistes, surtout en ce qui concerne l'exploitation des résultats et l'intégration aux logiciels topographiques. De même certains détails très fins, tels que les arêtes de petits motifs sculpturaux, peuvent passer entre les points du semis. On essaye d'y remédier par un maillage entre les points.

Sans caméra numérique intégrée ou couplée, on obtient seulement un semis de points semblable à un Modèle Numérique de Terrain (MNT) permettant de nombreuses

applications. Mais, quand il y a des peintures, telles que dans les grottes préhistoriques Cosquer ou Chauvet, des images sont nécessaires pour compléter le travail du scanner-laser, ce qui demande, évidemment un éclairage. Quant à la caméra numérique intégrée ou couplée, elle facilite grandement l'exploitation des résultats en complétant le semis de points par une image numérique superposée. Mais, elle doit être calibrée auparavant pour permettre de superposer la perspective photographique au semis de points en 3D.

## Levers lasers aéroportés ou Light Detection And Ranging (LIDAR)

A cheval sur la topométrie et la photogrammétrie et ayant quelques similitudes avec la lasergrammétrie, cette nouvelle technique permet d'obtenir un MNT par un balayage laser à partir d'un avion ou d'un hélicoptère.

Au cours du balayage d'une bande de 50 m de large effectué à partir d'une hauteur de 50 mètres, on peut obtenir 30 points par m<sup>2</sup> avec une précision de  $\pm 7$  cm.

Pour un balayage à plus petite échelle, c'est-à-dire pris de beaucoup plus haut, on a une densité d'un point tous les 2 ou 4 m<sup>2</sup> avec une précision de 15 cm en altitude et du double en planimétrie.

Pour un laser bathymétrique, jusqu'à une profondeur maximale de 50 m, on peut obtenir une densité d'un point pour 4 à 25 m<sup>2</sup>, une précision de 0,25 m sur les profondeurs et de 2,5 m en planimétrie. (Documentation Fugro Geoid). ●

## Contact

**Paul Courbon**

Ingénieur des Travaux géographiques (IGN)

Géomètre-expert DPLG

paul.courbon@yahoo.fr

## Bibliographie

**CHAZALY Bernard - LAOZE Emmanuel 2005** *Le relevé par scannage 3D du temple d'Opet à Karnak, XYZ n°102.*

**CHAZALY Bernard 2006** *La lasergrammétrie appliquée à l'auscultation d'ouvrages d'art XYZ n°106.*

### Suite dans le numéro 112 d'XYZ :

#### L'INFORMATIQUE ET LE TRAITEMENT DES DONNEES

*Les ordinateurs et micro-ordinateurs*

*Les calculatrices*

*Exploitation et mise en œuvre de l'informatique*

*Accessoires annexes*

*L'évolution de l'informatique vue à l'IGN.*



Lever d'une façade. La photo complète et permet de mieux comprendre le semis de points.

# Surveillance tectonique par GPS à la jonction des plaques Afrique, Arabie et Anatolie, au sud-est de la Turquie

■ Sophie BERTRAND

*La Terre tremble tous les jours et elle continuera de trembler en raison des mouvements tectoniques imposés par sa géophysique interne et sa géodynamique. La Turquie est l'une des régions les plus sismiques au monde : chacun d'entre nous se souvient des terribles événements de Kocaeli ( $M_w$  7.6) et Düzce ( $M_w$  7.1) survenus les 17 août et 12 novembre 1999 à proximité d'Istanbul et qui causèrent 30 000 victimes, 50 000 blessés et plus de 35 milliards d'euros de dégâts. Ces deux séismes suscitèrent l'intérêt de la communauté scientifique dans ces régions à forte densité de population. De nombreux projets virent ainsi le jour dans les zones de risque sismique élevé au Moyen-Orient, comme le projet européen Archaeosismology and Palaeosismology for the protection of Archaeological sites in the Middle East, ICA-CT-2002-10024 (APAME). Les multiples collaborations entre TUBITAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu, Gebze, Turquie), le Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, États-Unis (MIT) et diverses équipes de l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg (IPGS) ont rendu possible, entre autres, ce travail de thèse de doctorat réalisé à l'IPGS. Cet article présente la quantification par GPS des mouvements tectoniques des structures liées à la convergence des plaques Eurasie, Afrique et Arabie au sud-est de la Turquie, ce qui constitue un enjeu majeur dans la compréhension et l'évaluation du risque sismique.*

## ■ mots-clés

GPS, Moyen-Orient, jonction triple, cinématique, répétabilité, traitement des données, référentiel, champ de vitesses

## Problèmes et motivations

### ■ Contexte géodynamique

Le bloc anatolien (presque intégralement la Turquie actuelle) se situe à l'intersection de trois principales plaques tectoniques nommées Afrique, Arabie et Eurasie et constitue une zone tectonique clef de la ceinture Alpes – Himalaya, qui s'étend de l'Espagne à la Chine (Figure 1). La Turquie est donc un fabuleux laboratoire naturel pour étudier la convergence liée à la collision entre ces trois plaques et les structures qui en sont la conséquence (failles actives décrochantes ou normales, bassins, etc.). Cette collision en cours a comme effet l'expulsion de l'Anatolie vers l'ouest le long de deux failles décrochantes, les failles Nord Anatolienne

(FNA) et Est Anatolienne (FEA), dextre et sénestre respectivement, qui, associées à l'Arc de Chypre, gouvernent la tectonique actuelle de la Turquie.

Notre zone d'étude est localisée au sud-est de la Turquie, dans la province d'Hatay dont le chef-lieu est Antakya (ancienne Antioche). Trois failles s'y rencontrent : la terminaison nord de la Faille de la Mer Morte (FMM), la terminaison sud-ouest de la FEA et l'extrémité orientale de l'Arc de Chypre (Figure 2). La FEA marque la frontière entre l'Arabie et l'Anatolie et s'étend de Karliova où elle joint la FNA à Türkoğlu au nord de la Vallée de Karasu. Sa vitesse varie entre 6 et 15 mm/an selon les échelles temporelles et les méthodes considérées. La branche sud-ouest de la FEA se divise entre la Faille

de Karataş – Osmaniye (FKO) de Türkoğlu à la Mer Méditerranée et la Faille de Karasu (FK) le long de la marge orientale du Massif d'Amanos, entre Türkoğlu et Antakya. La vitesse de la FK est estimée entre 1 et 7 mm/an alors que la FKO est considérée dans certaines études comme inactive.

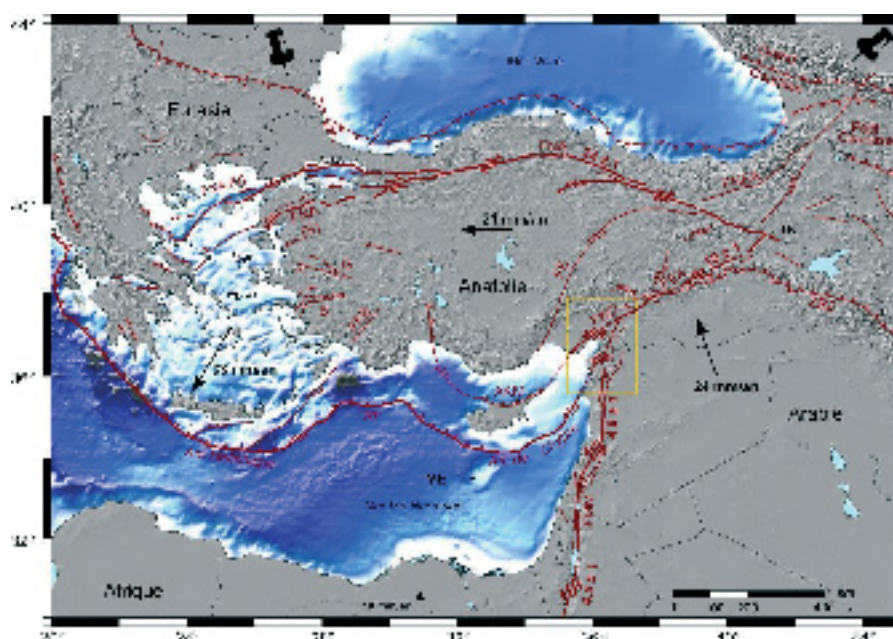
La FMM s'étend de la Mer Rouge jusqu'à la Turquie et constitue la limite continentale séparant l'Arabie à l'est de l'Afrique à l'ouest. Cette faille sert de guide décrochant sénestre au mouvement différentiel vers le nord entre l'Arabie et l'Afrique, estimé entre 4 et 7 mm/an. Enfin, l'Arc de Chypre est regardé comme le segment le plus oriental de la frontière de plaques accommodant la convergence entre l'Afrique au sud et l'Eurasie au nord.



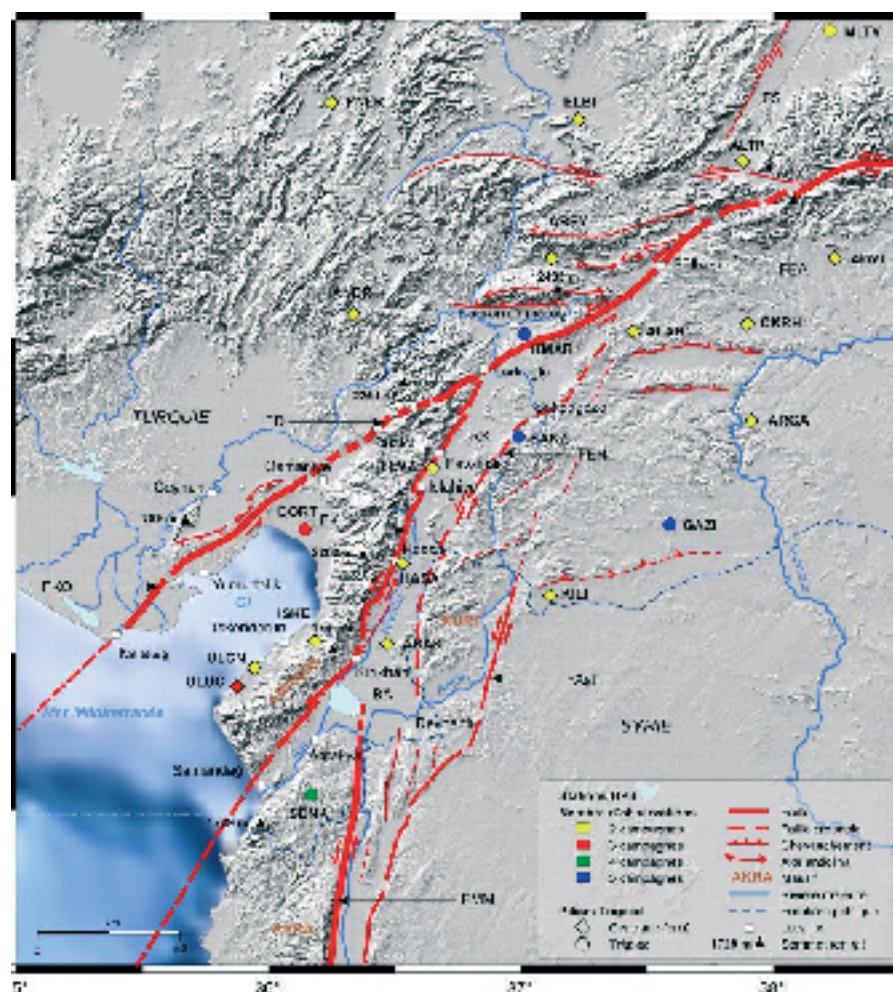
■ ■ ■ Bien que de nombreuses études s'accordent à dire, d'un point de vue cinématique, que la limite entre l'Arabie, l'Afrique et l'Anatolie forme une jonction triple en Hatay, la nature et la géométrie de la zone tectonique à l'approche de cette jonction restent source de débats sur un modèle cohérent de déformation, simplement parce que la cinématique des failles demeure peu claire et que les mouvements des blocs tectoniques ne sont pas bien contraints. Il reste donc à ce jour plusieurs questions, comme par exemple : quelles sont les vitesses le long des failles ? Quel est le rôle de chaque structure dans la déformation régionale ?

### ■ Apport de la géodésie spatiale

La théorie de la tectonique des plaques est basée sur deux hypothèses fondamentales : (1) la lithosphère agit comme un ensemble de plaques rigides en rotation sur une surface sphérique et (2) la vitesse relative entre ces plaques est constante sur les derniers millions d'années. Cependant, ces hypothèses ne sont plus valables dans les régions de limites de plaques, où la complexité des failles, la topographie qui en résulte et l'importante sismicité jouent un rôle primordial dans la déformation active. Pour mieux comprendre les mécanismes de la déformation dans ces régions, il est alors essentiel de mesurer le champ de vitesses en surface. Une telle mesure repose sur du positionnement précis, réalisé depuis une centaine d'années par des méthodes géodésiques aussi bien classiques (triangulation, nivellement, etc.) que spatiales (GPS, InSAR, etc.). En effet, le terrible séisme survenu le 18 avril 1906 à San Francisco provoqua une prise de conscience du danger sismique par les scientifiques. Reid mesura ainsi pour la première fois la déformation associée à un séisme, en comparant des mesures de triangulation effectuées avant et après cet événement. Il montra ensuite, à partir de deux séries de mesures réalisées avant le séisme, que la Terre se déforme également en période de quiescence sismique, en accumulant lentement et progressivement sous



**Figure 1.** MNT de l'est du bassin méditerranéen (données topographiques SRTM et bathymétriques ETOPO2) avec indication de la zone d'étude. Les vitesses des plaques sont données par rapport à l'Eurasie.



**Figure 2 :** Réseau Hatay.



forme de déformation élastique, l'énergie qui sera brutalement relâchée lors d'un séisme par la rupture d'une faille dans la croûte terrestre (Calais, 2000). La théorie du cycle sismique venait d'être posée...

Dès le début des années 1980, les Américains furent les premiers à envisager l'application du GPS à la géophysique, et plus particulièrement à la surveillance des failles actives : en effet, ils attendent toujours le "big one" sur la faille de San Andreas, un séisme dont les effets seraient certainement destructeurs. Le premier réseau de stations permanentes fut donc installé aux abords de cette faille, dans le but de mesurer ses déplacements en continu. De par son aspect portable et sa facilité de mise en œuvre, le GPS n'a ensuite cessé de se répandre et d'améliorer sa précision pour être aujourd'hui un outil très performant de quantification directe des mouvements tectoniques actuels.

Le principe est simple : connaissant la position précise d'un repère, il suffit de mesurer à nouveau la position du repère quelque temps plus tard pour déceler un déplacement et ainsi en déduire une vitesse. Une étude GPS approfondie permet alors de répondre à plusieurs interrogations concernant la distribution spatiale de la déformation : est-elle localisée et limitée aux frontières de blocs, que l'on peut considérer comme quasiment rigides et qui forment la frontière entre les plaques, ou bien est-elle plutôt répartie sur de plus larges régions sous la forme d'un écoulement continu ?

## Réseau GPS à la jonction

La complexité tectonique en Hatay nécessite un réseau GPS dense couvrant les failles par des stations relativement proches, dans le but d'augmenter la résolution spatiale du champ de vitesses. Ainsi, le réseau Hatay comporte 23 stations, formant des lignes de base de 50 km environ entre stations (Figure 2). Le réseau a été installé par des collaborations entre le MIT et TUBITAK.



**Figure 3 : a. Dispositif d'observation avec pilier en béton à la station ULCN. Le montage de l'antenne se fait par centrage forcé sur la vis positionnée sur la plate-forme.**

**b. Dispositif d'observation avec trépied sur le site DORT. Dans ce cas, le point est matérialisé par un repère géodésique placé dans un affleurement rocheux. Pour une hauteur d'antenne d'un mètre, une erreur de  $0.1^\circ$  par rapport à la verticale au-dessus du clou entraîne une erreur de positionnement horizontal d'environ 2 mm.**

La répartition spatiale des stations se base sur les considérations morpho-tectoniques de la jonction. Ainsi, chaque bloc tectonique, défini en fonction de la géométrie des failles, est couvert par un maximum de stations : (1) le nord-ouest de l'Arabie est couvert par six stations (ADYI, ALAR, ARG, CKRH, GAZI et KILI) ; (2) quatre stations se trouvent à l'intérieur de la Vallée de Karasu (ABAK, HASA, FEVZ et SAKZ) ; (3) le massif d'Amanos et le littoral de la Mer Méditerranée sont couverts par quatre stations (DORT, ISKE, ULCN et ULUC) ; (4) le bloc anatolien montre un réseau composé de huit sites (ABEY, ALTP, ANDR, ELBI, KMAR, MLTY, MLT1 et PNLK) ; (5) une station est située à l'ouest de la FMM (SENK). Pour réduire les erreurs dues au centrage des antennes, 17 stations se composent d'un pilier en béton ancré dans le socle et muni d'une vis de centrage (Figure 3a). Pour les autres stations, le centrage s'effectue grâce à un trépied (Figure 3b).

## ■ Campagnes réalisées

La cartographie précise du champ de déformation nécessite une large fenêtre temporelle d'observations (Tableau 1) et plusieurs campagnes de mesures pour chaque site. Les premières mesures ont débuté en 1989, puis le réseau a progressivement été densifié pour atteindre 23 stations en 2004. Au total, sept campagnes ont eu lieu.

Elles ont toutes été conduites entre août et octobre, dans le but de minimiser les erreurs systématiques annuelles, puisque certains effets ont des variations périodiques, comme la densité électronique de l'ionosphère, qui dépend principalement de l'activité solaire, mais qui montre également des variations de période annuelle et semi-annuelle, liées à l'alternance des saisons. L'équipe de Tectonique Active de l'IPGS a participé à la dernière campagne de 2004, avec le soutien financier du projet APAME. Les données des campagnes antérieures ont été fournies



■■■

Site	Longitude	Latitude	Alt. (m)	1989	1991	1994	1996	1998	2002	2004
ABAK (Hatay Kirikhan)	36°27'54.2"	36°31'51.8"	121.1					◆		▲
ABEY (Maras Agbeyli)	37°06'45.5"	37°44'47.8"	1392.4					○		❖
ADYI (Adiyaman)	38°13'51.5"	37°44'49.1"	705.7			○	❖			
ALAR (Maras Pazarcik)	37°26'09.1"	37°31'03.6"	946.2					○		❖
ALTP (Malatya)	37°52'07.5"	38°03'01.2"	1336.4					○		❖
ANDR (Maras Andirin)	36°19'47.4"	37°34'21.0"	1072.8						□	❖
ARGA (S. Urfa Halfeti)	37°54'08.4"	37°14'12.4"	675.6					○		▲
CKRH (Adiyaman)	37°53'10.0"	37°32'29.2"	636.2					○		❖
DORT (Dört Yol)	36°08'14.7"	36°53'57.9"	71.2			○		❖		▲
ELBI (Maras Elbistan)	37°13'12.1"	38°10'44.3"	1218.3					○		❖
FEVZ (Fevzipasa)	36°38'35.7"	37°05'15.2"	599.4					◆		▲
GAZI (Gaziantep)	37°34'26.1"	36°54'03.8"	723.2		□	○	❖	○	□	
HASA (Hassa)	36°31'24.6"	36°47'16.7"	432.2					◆		▲
ISKE (Iskenderun)	36°10'48.2"	36°32'23.7"	373.8						◆	▲
KILI (Kilis)	37°06'21.8"	36°41'06.4"	651.4						◆	▲
KMAR (Maras Merkez)	36°59'45.4"	37°31'17.8"	604.8			○	❖	❖	□	❖
MLT1 (Malatya)	38°12'54.7"	38°27'22.2"	814.6						□	▲
MLTY (Malatya)	38°12'53.4"	38°27'22.2"	821.6	❖		○	❖			
PNLR (Tufanbeyli)	36°14'41.8"	38°13'52.6"	1407.6						□	❖
SAKZ (Sakçagöze)	36°58'19.0"	37°11'25.7"	1051.9			○	❖	❖	◆	▲
SENK (Senköy)	36°07'52.1"	36°02'58.6"	936.4			○	○	❖	◆	
ULCN (Uluçınar)	35°52'13.8"	36°23'48.4"	122.6						◆	▲
ULUC (Uluçınar)	35°56'22.8"	36°27'20.1"	91.5	❖	□	○				

**Tableau 1. Années d'observation des sites. Coordonnées géographiques sur l'ellipsoïde WGS84.**

**Récepteurs :** ◆ : Ashtech UZ-12 ; ❖ : Trimble 4000SSI ; ○ : Trimble 4000SSE ; ● : Trimble 4000SST ; □ : Trimble 4700 ; ▲ : Trimble 5700.

par l'équipe GPS du MIT, qui collabore avec l'IPGS pour cette étude.

### ■ Acquisition des données de la campagne de 2004

Généralement, une campagne d'acquisition de données se compose de plusieurs sessions de mesures, dont la longueur peut varier de quelques heures à quelques jours. Pour la campagne de 2004, toutes les sessions ont été de 10 heures et les répétabilité de 3 jours. La totalité des sites avait auparavant été contrôlée, ce qui consistait à vérifier si le site n'était pas dégradé (vis et/ou pilier vandalisé par exemple), afin d'organiser au mieux la mission d'observation.

Lors du positionnement de l'antenne, il faut prendre garde à deux sources d'erreurs : (1) des erreurs aléatoires dues à une mauvaise mise en station de l'antenne ou à une erreur de lecture de la

hauteur d'antenne et (2) des erreurs systématiques qui se produisent à chaque mise en station, telle qu'une embase mal réglée. Une stratégie pour limiter les effets de ces erreurs consiste à permuter les opérateurs et l'instrumentation (embase, antenne, récepteur). Pour des raisons pratiques (distance entre stations et nombre d'opérateurs), cette manière de procéder n'a pas été utilisée.

Le récepteur enregistre les signaux à un intervalle régulier de 30 secondes, en considérant un angle de coupure de 15°. Cet angle détermine la hauteur sous laquelle les signaux ne seront pas enregistrés, et conditionne donc le nombre d'observations disponibles pour le traitement mais également la tranche d'atmosphère traversée. Par conséquent, plus cet angle est petit, plus la couche d'atmosphère traversée sera épaisse et l'erreur causée par le

décali troposphérique importante. Une valeur de 15° permet d'acquérir suffisamment de données à faible élévation, ce qui est nécessaire pour contraindre la position verticale des stations, mais sans pour autant trop dégrader les enregistrements. Après acquisition, les données sont converties au format d'échange standard rinex.

### Principe du traitement des données

Le traitement des données a été effectué à l'aide du logiciel GAMIT (version 10.1) et GLOBK (version 5.08, King et Bock, 2002 ; Herring, 2002), dans une approche en trois étapes :

- on utilise les observations des doubles différences de phase afin d'estimer les positions des stations pour chaque jour, le décali zénithal à

chaque station toutes les deux heures, les paramètres orbitaux et d'orientation de la Terre, en appliquant des contraintes a priori faibles sur tous les paramètres. On obtient pour chaque session un jeu de "quasi-observations", qui sont les différents paramètres estimés et la matrice de covariance associée (étape GAMIT) ;

- les paramètres estimés et la matrice de covariance associée pour chaque solution journalière à contrainte relâchée sont combinés et ajustés à l'aide d'un filtre de Kalman, afin de définir un jeu consistant de positions et de vitesses. En effet, si l'on utilise de fortes contraintes sur les coordonnées de stations dont les positions a priori ou mesurées sont erronées (problème d'antenne ou mauvaise mise en station par exemple), cela entraîne une erreur sur la position des autres stations et donc une déformation du réseau ;
- après combinaison des quasi-observations, le référentiel n'est que faiblement établi. On le définit en imposant de fortes contraintes sur les stations dont les positions et vitesses dans un référentiel donné sont connues. La solution libre est rattachée à l'ITRF en lui appliquant une similitude spatiale à 7 paramètres (séries temporelles) ou 14 (vitesses), de façon à minimiser les déviations des positions et vitesses des stations IGS intégrées au réseau. Le résultat final est une série temporelle de positions par station, ainsi qu'une position (référéncée à l'époque du milieu de la série de données) ajustée pour chaque site, une vitesse (dans un référentiel donné) et des statistiques qualitatives sur les résultats. Pratiquement, les deuxième et troisième étapes sont liées et effectuées par GLOBK.

## ■ Traitement des données en sessions journalières

Une source importante d'erreur dans la mesure est le délai introduit par l'ionosphère. Comme cette tranche atmosphérique est un milieu dispersif, la réfraction induite sur le signal dépend de sa fréquence et peut introduire un

retard variable. Ce délai peut être réduit à moins d'un mm en formant une combinaison linéaire particulière des phases L1 et L2 appelée LC, qui, en 1<sup>re</sup> approximation, est indépendante des effets de la réfraction ionosphérique. Nous utilisons les orbites précises diffusées par l'IGS, dont la précision est estimée à  $\pm 5$  cm. Nous incluons les données de 20 stations IGS permanentes dont les positions et vitesses sont précisément déterminées dans le référentiel ITRF00 (Altamimi et al., 2002), afin de nous rattacher à celui-ci. Nous appliquons un modèle de correction de centre de phase des antennes dépendant de l'élévation et de l'azimut, un modèle de marées solides lunisolaires et polaires et un modèle de surcharge océanique. La campagne de 1989 n'a pas été traitée, parce que nous n'avons pas eu accès aux fichiers rinx des stations IGS à inclure dans le traitement.

Chaque solution individuelle possède des incertitudes formelles *nrms* (*normalized root mean square*, résidus moyens normalisés) pour les 4 composantes des lignes de base (N-S, E-O, vertical et longueur). Des modèles théoriques permettent d'évaluer ces incertitudes. Cependant, ces modèles ne prennent pas en compte certains phénomènes extérieurs et les erreurs accidentelles qui peuvent survenir pendant l'observation du site et peuvent donc sous-estimer les incertitudes. La répétabilité appelée *wrms* (*weighted root mean square*), ou dispersion, permet de donner un indicateur de la précision des mesures (Larson et Agnew, 1991), en quantifiant la constance des mesures effectuées à différentes époques. La référence considérée est la moyenne des mesures et la répétabilité est l'écart-type à cette moyenne. Le principal critère de validation du calcul des sessions journalières consiste donc à vérifier la dispersion sur les composantes horizontales des lignes de base, qui doit être la plus faible possible. En effet, comme il n'existe pas de référence absolue pour le positionnement, le critère de justesse sera la stabilité de la mesure dans le temps. Nous avons choisi de calculer les répétabilités des composantes des lignes de base en tes-

tant trois différentes solutions :

- (1) avec ambiguïtés fixées (un maximum d'ambiguïtés est contraint à prendre des valeurs entières) et orbites réajustées,
- (2) avec ambiguïtés libres (ambiguïtés laissées à leurs valeurs réelles) et orbites réajustées et
- (3) avec ambiguïtés fixées et orbites fixées.

La composante Est – Ouest a une dispersion plus élevée dans tous les cas, ceci étant lié aux trajectoires des satellites essentiellement orientées Nord – Sud, donnant ainsi une meilleure "répartition" des signaux en N – S qu'en E – O. Bien que les différences soient très faibles, les meilleures répétabilités sont obtenues pour les 1<sup>re</sup> et 3<sup>e</sup> méthodes. En effet, le fait de fixer les ambiguïtés à des valeurs entières permet d'augmenter la précision des mesures : ceci se voit essentiellement sur la composante E – O dont la dispersion maximale atteint ~ 8 mm lorsque l'on ne fixe pas les ambiguïtés et ~5 mm dans le cas où un maximum d'ambiguïtés est fixé. La solution avec orbites fixées est comparable à celle avec orbites réajustées.

Pour rester cohérent avec les solutions SOPAC (*Scripps Orbit and Permanent Array Center*) utilisées lors de la combinaison des campagnes et qui sont calculées avec réajustement des orbites, nous emploierons la stratégie avec réajustement des orbites. Les valeurs moyennes sont de 1 à 2 mm pour les campagnes de 1994 à 2004. Pour celle de 1991, les dispersions atteignent 10 mm sur la composante E – O. L'amélioration de la précision à court terme observée entre 1991 et 2004 est principalement la conséquence de l'augmentation du nombre de satellites formant la constellation, ce qui permet de définir aujourd'hui une meilleure couverture spatiale, mais elle est également due à l'expansion du réseau global utilisé pour déterminer les orbites des satellites.

## ■ Combinaison des campagnes

La combinaison consiste à intégrer sur plusieurs années en continu des solutions calculées par d'autres orga-



nismes, afin d'améliorer la combinaison et la mise en référentiel du réseau régional. SOPAC donne ainsi les jeux de quasi-observations résultant du traitement GAMIT de différents réseaux globaux. Dans cette étude, les 29 réseaux disponibles ont été utilisés. C'est dans ce but qu'il est indispensable, lors de l'étape GAMIT, d'intégrer des stations IGS communes avec les solutions SOPAC.

### ■ Mise en référentiel

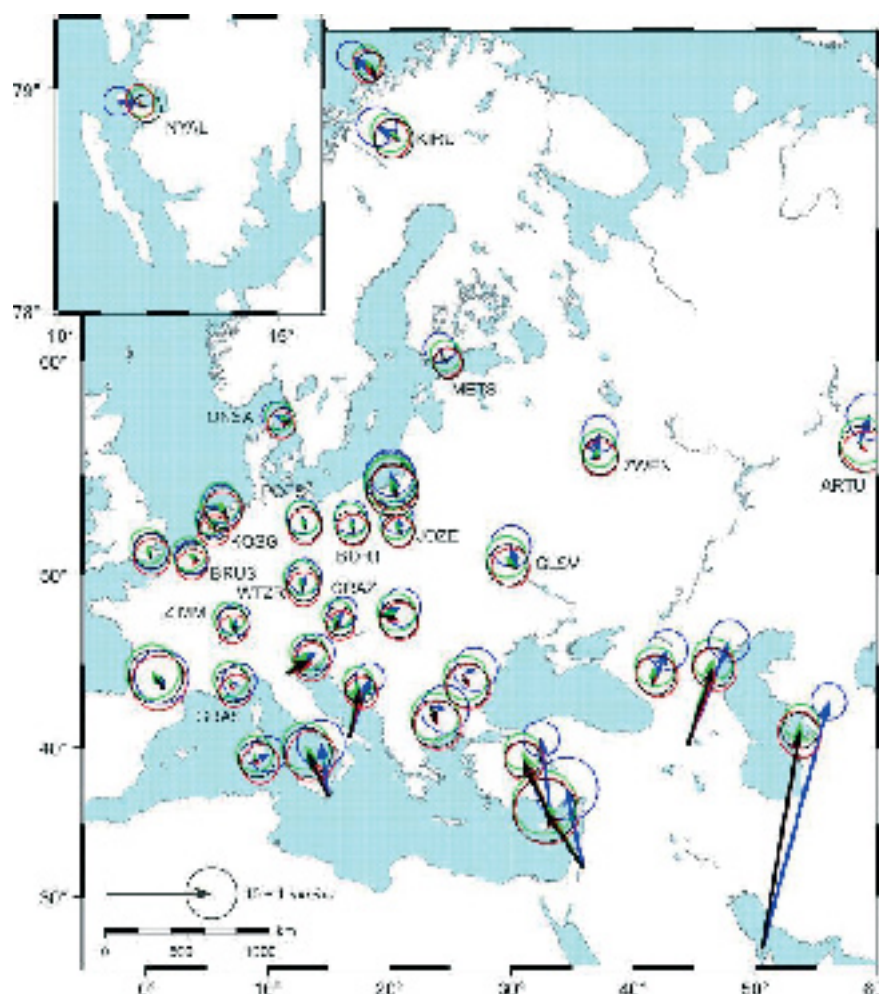
La dernière phase du traitement consiste à définir un référentiel pour exprimer les positions et les vitesses des stations. Deux méthodes peuvent être mises en œuvre :

- estimer les solutions dans un référentiel où positions et vitesses des stations IGS sont bien déterminées. Dans notre cas, il s'agit de l'ITRF00, référentiel où toutes les plaques sont en mouvement ;
- comme l'ITRF00 n'a pas de signification tectonique, il est nécessaire de transférer le champ de vitesses observé dans un référentiel tectoniquement significatif pour distinguer les limites de blocs mais également les mouvements relatifs entre les différentes entités. Compte tenu de la localisation de notre zone d'étude, nous nous intéresserons uniquement à de tels référentiels.

### ■ Définition des référentiels Eurasie, Arabie et Anatolie

La première méthode possible pour définir le référentiel Eurasie consiste à calculer la solution en ITRF00, puis de lui retirer le mouvement de la plaque Eurasie donné par son pôle de rotation. De tels pôles de rotation peuvent être définis par le modèle global de tectonique des plaques NNR-NUVEL-1A de DeMets et al. (1994) ou par des études géodésiques, comme dans les travaux de Sella et al. (2002) et Altamimi et al. (2002).

La seconde stratégie consiste à minimiser les vitesses de sites eurasiens, choisis de façon à avoir des résidus en vitesses les plus faibles possible pour les sites servant à la définition du référentiel. Nous avons ainsi minimisé les



**Figure 4.** Résidus en vitesses des principales stations IGS pour les quatre solutions testées pour définir le référentiel Eurasie (intervalle de confiance à 2?). Flèches noires : pôle d'Altamimi et al. (2002) ; flèches bleues : pôle du modèle NNR-NUVEL-1A (DeMets et al., 1994) ; flèches vertes : pôle de Sella et al. (2002) ; flèches rouges : solution calculée en minimisant les vitesses horizontales de 17 stations IGS.

vitesse de 16 stations IGS en Eurasie : ARTU, BOR1, BRUS, GLSV, GRAS, GRAZ, JOZE, KIRU, KOSG, METS, NYAL, ONSA, POTS, WTZR, ZIMM et ZWEN et contraint la vitesse du site asiatique POL2 à 2 mm/an en composante nord et 0.5 mm/an en composante est, afin de prendre en compte son mouvement par rapport à la plateforme kazakhe (Figure 4).

Les vitesses obtenues pour ces 16 sites sont toutes inférieures à 1 mm/an et celles de la station POL2 ne diffèrent pas de plus d'1 mm/an de leurs valeurs a priori. Par ailleurs, le rms sur les vitesses de ces 17 stations après transformation est de 0.6 mm/an.

La figure 4 présente les résidus en

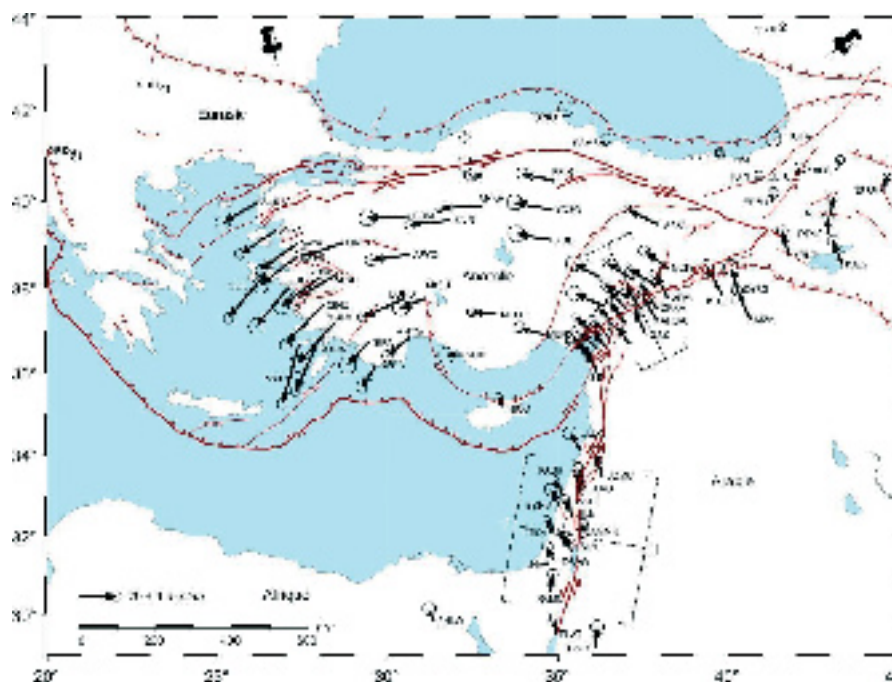
vitesse des principales stations permanentes eurasiennes, pour les quatre solutions testées pour définir le référentiel Eurasie. Les vitesses calculées à partir du pôle de rotation du modèle NNR-NUVEL-1A montrent systématiquement des différences d'orientation par rapport aux trois autres méthodes. Ceci est particulièrement vérifié pour les stations localisées en Méditerranée et au Moyen-Orient. Bien que l'ajustement global avec l'ITRF00 soit de 0.6 mm/an, cette solution a des résidus en vitesses trop élevés pour servir de définition au référentiel Eurasie, avec des résidus la plupart du temps supérieurs à 1 mm/an. Les trois autres solutions sont très peu différentes en termes d'orientation, mais elles pré-

sentent des différences d'amplitude.

Comme les plus faibles résidus sont obtenus par la méthode de minimisation, avec des moyennes des valeurs absolues des vitesses de 0.44 mm/an en est et 0.29 mm/an en nord, cette solution sera gardée pour la suite du traitement. Le référentiel Eurasie ainsi défini permettra d'estimer les taux de glissement instantanés sur les failles en Hatay, à l'aide d'un modèle rhéologique dans un demi-espace élastique. Dans le but de mieux identifier les limites des différents blocs impliqués à la jonction, il est également indispensable de définir des référentiels liés aux plaques participant à la jonction, c'est-à-dire des référentiels Arabie et Anatolie.

Le mouvement de chaque plaque à la surface du globe peut être décrit de manière simple, aussi bien en termes de cinématique finie qu'instantanée, à l'aide de la géométrie eulérienne. Cette géométrie précise que tout déplacement instantané à la surface d'une sphère peut être décrit par un vecteur rotation qui passe par le centre de la Terre et en perce la surface au pôle de rotation, dont le module est la vitesse angulaire de rotation.

Pour déterminer les référentiels Arabie et Anatolie, nous n'avons affecté aucune plaque aux stations du réseau Hatay, puisqu'elles sont localisées dans une zone d'intense déformation. Ces deux référentiels ont été définis par les vecteurs d'Euler relatifs entre plaques : (1) le vecteur Arabie – Eurasie pour le référentiel Arabie et (2) le vecteur Anatolie – Eurasie pour le référentiel Anatolie. En utilisant les stations permanentes IGS et les stations régionales turques intégrées dans le traitement, nous dérivons un vecteur d'Euler Ar – Eu situé à  $27.7 \pm 0.7^\circ\text{N}$ ,  $20.3 \pm 1.6^\circ\text{E}$  et un taux de rotation de  $0.41 \pm 0.03^\circ/\text{Ma}$ , un vecteur An – Ar situé à  $31.0 \pm 1.0^\circ\text{N}$ ,  $41.1 \pm 0.9^\circ\text{E}$  et un taux de rotation de  $0.7 \pm 0.09^\circ/\text{Ma}$  et un vecteur An – Eu situé à  $30.1 \pm 0.7^\circ\text{N}$ ,  $33.2 \pm 0.2^\circ\text{E}$  et un taux de rotation de  $1.1 \pm 0.08^\circ/\text{Ma}$ . Nous obtenons un rms de 0.6 mm/an pour les vitesses résiduelles des plaques Arabie et Anatolie. Les vec-



**Figure 5. Vitesses horizontales GPS et ellipses de confiance à 95 % dans le référentiel Eurasie (1991 – 2004).**

teurs eulériens calculés dans cette étude se situent à proximité de ceux déterminés dans les études antérieures de géodésie spatiale (par exemple, Reilinger et al., 2006). Par contre, leurs localisations confirment les différences entre ceux déterminés par le modèle NUVEL-1A et ceux donnés par la géodésie.

## ■ Estimation de la qualité

La qualité du traitement a été évaluée par l'analyse des séries temporelles pour les sites observés au moins trois fois et par le calcul de la précision à long terme.

Les séries temporelles des positions des stations ont été calculées en utilisant la même approche que pour le calcul des vitesses, excepté le fait que les jeux de quasi-observations sont traités indépendamment. Après avoir éliminé la vitesse estimée pour chaque site, les séries temporelles montrent toutes un alignement correct des positions calculées pour les différentes campagnes, avec une dispersion maximale de 4 mm.

La précision à long terme se définit par la dispersion des différentes compo-

santes des lignes de base par rapport à la régression linéaire qui ajuste au mieux l'évolution de la position de la station au cours du temps. Les moyennes des répétabilités sont de l'ordre de 1.4 mm sur les composantes horizontales. La mesure verticale reste encore environ 3 fois moins précise que le positionnement horizontal, en raison des problèmes liés à la surcharge atmosphérique, à la géométrie du système, etc. Ceci se vérifie dans la dispersion verticale, qui atteint une moyenne de 6.2 mm.

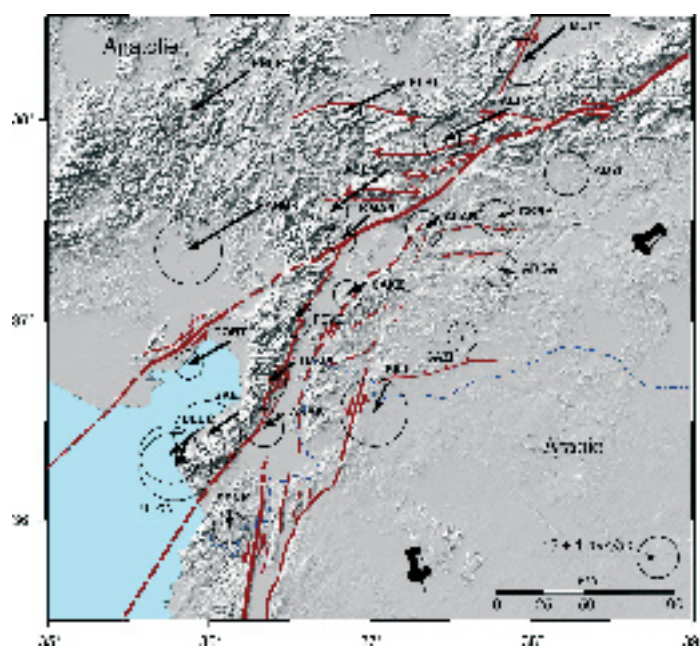
Bien que la plupart des sites n'aient été observés qu'à deux reprises, les critères de qualité du traitement sont vérifiés. Les précisions ainsi obtenues pour les vitesses des stations en Hatay sont de 1 mm/an et permettent de contraindre précisément la déformation régionale à la jonction triple.

## Apport du champ de vitesses GPS

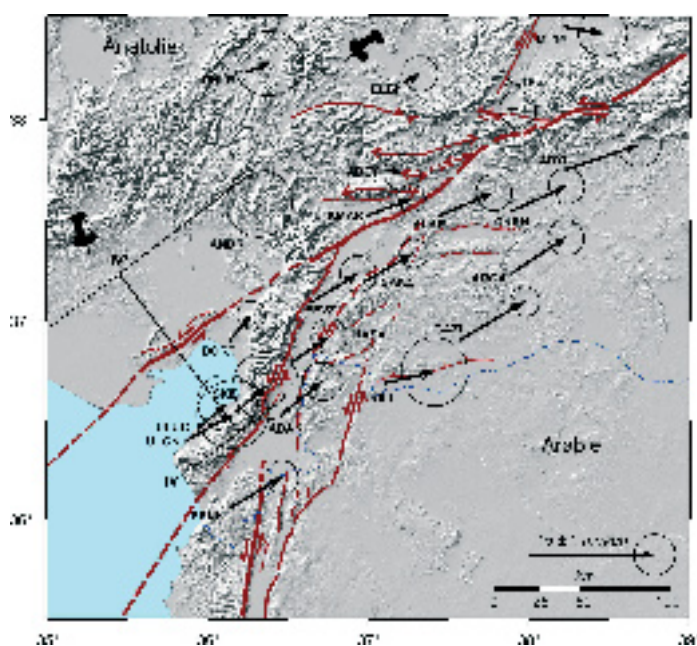
### ■ Description des mouvements en Méditerranée orientale

Le champ de vitesses GPS présenté à la figure 5 dans le référentiel Eurasie





**Figure 6.** Vitesses horizontales GPS et ellipses de confiance à 95 % dans le référentiel Arabie (1991 – 2004)

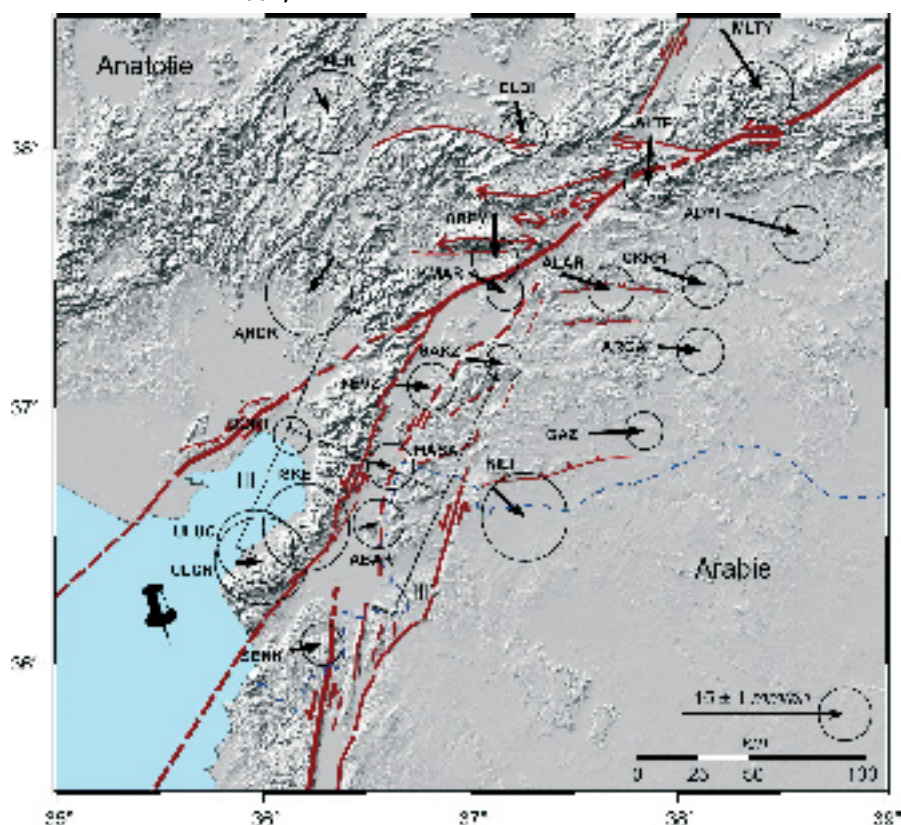


**Figure 7.** Vitesses horizontales GPS et ellipses de confiance à 95 % dans le référentiel Anatolie (1991 – 2004).

■ quantifie les mouvements du nord-est de l'Afrique, du nord de l'Arabie et la rotation anti-horaire de l'Anatolie. Les stations situées au nord de la FNA (HALI, SINO, SAMS, etc.), au nord du Caucase (ZECK) et en Grèce (SOFI, ORID) sont liées à la plaque eurasienne. Les sites en Égée (CEIL, OZDE, KNID et MARM) sont dominés par un mouvement vers le sud-ouest d'environ  $32 \pm 2$  mm/an. Les points en Anatolie (KKIR, YOZG, ABDI) montrent l'échappement vers l'ouest de cette microplaque avec un mouvement de 18 à 19 mm/an orienté  $\sim N75^\circ O$ .

### ■ Cinématique actuelle à la jonction triple

Effectuons à présent un zoom en Hatay. Exprimé dans les référentiels Arabie (Figure 6) et Anatolie (Figure 7), le champ de vitesses illustre clairement le caractère décrochant sénestre dominant de la FEA. Les stations situées sur la côte méditerranéenne (DORT, ISKE, ULCN, ULUC) présentent des mouvements de direction similaire avec celles situées au nord de la FEA (ANDR, ELBI, ALTP) dans le référentiel Arabie et, par conséquent, semblent appartenir à l'Anatolie. Cependant, leurs normes plus faibles



**Figure 8.** Vitesses horizontales GPS et ellipses de confiance à 95 % dans le référentiel "Iskenderun" (1991 – 2004).

(entre 3.5 et 5.7 mm/an), ce qui représente environ la moitié des vitesses des sites anatoliens, impliquent un taux de glissement significatif sur la

FKO. Cette structure est en effet la seule qui puisse prendre en compte une telle différence de mouvement. Cette hypothèse est en accord avec

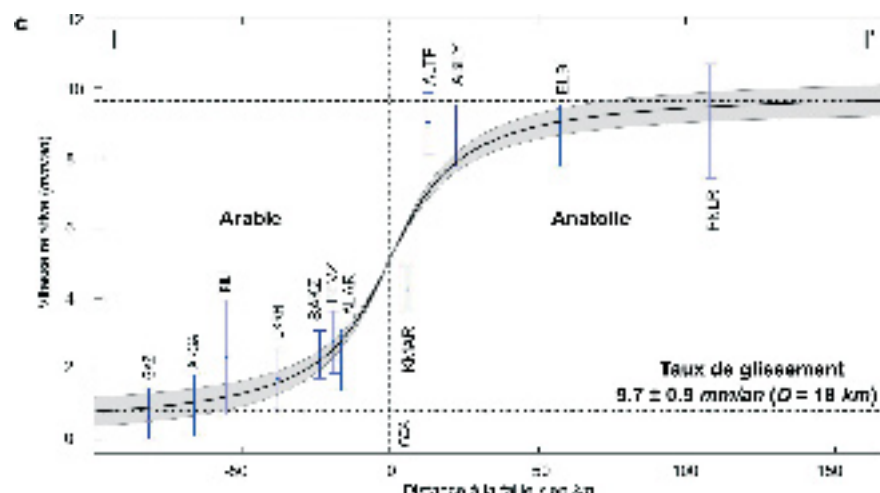
une morphologie d'escarpement de faille visible sur le terrain et sur les images satellites, mais également avec l'occurrence du tremblement de terre de juin 1998 ( $M_W$  6.2), qui est le plus gros événement enregistré pendant la période instrumentale à la jonction triple.

Les vitesses GPS observées suggèrent donc que la FEA se prolonge en direction du sud-ouest à travers le massif d'Amanos, de Türkoğlu jusqu'au nord de Chypre.

Une observation équivalente peut être faite pour les vitesses des stations à l'est et à l'ouest de la FK. En effet, les vitesses des stations à l'ouest de cette faille (DORT, ISKE, ULUC, ULCN) et celles des stations à l'est dans la Vallée de Karasu (ABAK, FEVZ, HASA, SAKZ) ont des directions similaires, obliques à la direction principale de la faille, mais avec des amplitudes à l'ouest environ du double de celles à l'est dans le référentiel Arabie. Ceci indique que la FK est une structure active, caractérisée par un mouvement latéral sénestre prédominant, associé à une composante normale.

Enfin, on peut observer le mouvement vers le sud dans le référentiel Arabie du site SENK, localisé au sud du Bassin d'Amik et à l'ouest de la FMM. Bien que la vitesse soit à l'intérieur de son ellipse d'incertitude, elle reste compatible en direction et en norme aux vitesses des stations localisées plus au sud, à l'ouest de la FMM (Figure 5), ce qui suggère une position associée à l'Afrique.

La combinaison de ces trois observations du champ de vitesses GPS indique clairement l'existence d'un bloc indépendant de l'Anatolie, l'Arabie et l'Afrique, appelé "bloc d'Iskenderun". Ce bloc est limité au nord par la FKO et à l'est et au sud-est par la FK. Un référentiel lié à ce bloc illustre le mouvement vers l'est de l'Arabie (stations ABAK, FEVZ, HASA) et la composante normale de la FK, qui s'accroît en allant du sud vers le nord, s'orientant progressivement vers les vecteurs vitesses des stations situées



**Figure 9.** Vitesses des composantes parallèles à l'ouest de la FEA par rapport à l'Eurasie (incertitudes à 1 $\sigma$ ) et modèle de Savage et Burford (1973) pour une couche sismogène de 18 km. La courbe noire indique la perturbation élastique pour une faille décrochante sénestre fonctionnant à 9.7 mm/an centrée sur la FEA. L'aire grisée correspond à la zone d'incertitude à 1 $\sigma$  du meilleur ajustement. Localisation du profil I-I' à la figure 5.

au sud de la FEA (Fig. 8). Cette extension est estimée à  $1.0 \pm 0.5$  mm/an.

## Gradients de vitesses par rapport aux failles

### ■ Principe

Le champ de vitesses exprimé dans des référentiels tectoniquement significatifs a été analysé. Il reste à présent à déterminer les vitesses des failles. Pour cela, les modèles rhéologiques relient quantitativement la déformation à court terme mesurée par la géodésie au taux de glissement à long terme sur une faille. Le modèle le plus simple considère que la Terre est un demi-espace parfaitement élastique.

En général, le plan de faille entre deux blocs est une zone "rugueuse" sur laquelle le glissement ne s'effectue pas facilement. En période inter-sismique, même si les deux blocs veulent coulisser, on suppose que la faille est bloquée parce que le niveau de contraintes n'est pas encore suffisamment élevé pour la faire glisser. Il se produit alors une accumulation de déformations élastiques entre les blocs qui bougent l'un par rapport à l'autre loin de la faille, mais pas le long de la faille.

Nous utilisons le modèle de Savage et

Burford (1973), qui considère une faille infinie. Cette hypothèse implique que la vitesse de la composante normale à la faille est nulle, alors que la vitesse de la composante parallèle ne dépend que de la distance horizontale à la structure. Le déplacement inter-sismique  $V(x)$  observé par GPS à la distance  $x$  d'un décrochement ayant une vitesse  $V_0$  sous une zone bloquée d'épaisseur  $D$ , peut être décrit par l'équation ci-dessous, dans laquelle  $V_1$  représente un décalage arbitraire entre le profil de vitesses et le repère de référence choisi :

$$V(x) = V_1 + V_0 \frac{1}{\pi} \arctan \left( \frac{x}{D} \right)$$

### ■ Modélisation

L'application du modèle de Savage et Burford à la section occidentale de la FEA permet d'estimer le taux de glissement sur ce tronçon à  $9.7 \pm 0.9$  mm/an en considérant une profondeur de faille bloquée de 18 km (Figure 9). Cette profondeur a été choisie en fonction de la profondeur maximale des séismes enregistrés sur ce segment de faille.

Pour estimer les vitesses sur les FK et FKO, nous disposons de trois stations situées entre ces deux structures (DORT, ULUC et ISKE), la quatrième



■ station (ULCN) présentant un mouvement incompatible avec celui des trois autres. Compte tenu de la proximité de ces stations avec les FK et FKO, les mouvements de ces sites sont liés au mouvement de la FK et à celui de la FKO. Il faut donc déterminer de façon conjointe les vitesses sur les deux failles avec un unique modèle. Cependant, cette approche nécessite une approximation, celle de considérer deux failles infinies parallèles, ce qui est uniquement le cas entre Kirikhan et Samandağ. Nous avons donc considéré les failles parallèles à la direction moyenne des deux structures, c'est-à-dire N044°E. Par cette méthode, nous obtenons des taux de glissement moyens de  $2.5 \pm 1$  mm/an sur la FK et de  $5.5 \pm 1.5$  mm/an sur la FKO.

## Conclusion

Cette étude valide la contribution du GPS à la tectonique active dans des régions de limites de plaques. Les campagnes GPS effectuées entre 1991 et 2004 fournissent une cartographie précise des mouvements actuels à la jonction triple et permettent de quantifier directement la convergence de l'Arabie et l'Afrique avec l'Eurasie et la distribution des segments de failles, et contribuent à une meilleure détermination des mouvements des blocs.

Quand elles sont effectuées avec soin et précision, les campagnes GPS couvrant plusieurs années associées à un réseau dense peuvent donc aisément améliorer la compréhension de la cinématique et de la déformation active dans des régions tectoniquement complexes. La définition de référentiels liés aux plaques tectoniques en présence permet alors de révéler plus clairement la subdivision en blocs, les limites entre ces entités et les failles actives ou inactives. ●

## Contact

### Sophie BERTRAND

Attachée Temporaire à l'Enseignement et à la Recherche (filière Topographie)  
Institut National des Sciences Appliquées

de Strasbourg – Laboratoire MAP-PAGE  
24, boulevard de la Victoire  
67084 STRASBOURG cedex  
sophie.bertrand@insa-strasbourg.fr

## Références

**Altamimi, Z., Sillard, P et Boucher, C., 2002, ITRF2000** *A new release of the International Terrestrial Reference Frame for earth sciences applications*, J. Geophys. Res., 107 (B10), doi:10.1029/2001JB000561.

**Bertrand, S., 2006** *Tectonique active à la jonction des plaques Afrique, Arabie et Anatolie – Eurasie (sud de la Turquie) : caractérisation des failles et analyse de la déformation par un réseau GPS dense*, Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg.

**Calais, E., 2000** *Les réseaux GPS permanents : de nouveaux outils de mesure géophysique*, Géomètres.

**DeMets, C., Gordon, R.G., Argus, D.F. et Stein, S., 1990** *Current plate motions*, Geophys. J. Int., 101, 425-478.

**Herring, T.A., 2002, GLOBK** *Global Kalman filter VLBI et GPS analysis program*, MIT, Cambridge.

**King, R. W. et Bock, Y., 2002** *Documentation for the GAMIT analysis software, release 10.0*, Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.

**Larson, K.M. et Agnew, D.C., 1991** *Application of the Global Positioning System to crustal deformation measurement*, 1. Precision and accuracy, J. Geophys. Res., 96 (B10), 16547-16565.

**Reilinger, R.E., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Cakmak, R., Kadirov, F., Guliev, I., Stepanyan, R., Nadariya, M., Hahubia, G., Mahmoud, S., Sakr, K., ArRajehi, A., Paradissis, D., Al-Aydrus, A., Prilepin, M., Guseva, T., Evren, E., Dmitrotsa, A., Filikov, S.V., Gomez, F., Al-Ghazzi, R. et Karam, G., 2006**, *GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions*, Journ. Geophys. Res., 111, doi:10.1029/2005JB004051.

**Savage, J.C. et Burford, R.O., 1973**, *Geodetic determination of relative plate motion in central California*, J. Geophys. Res., 78, 832-845.

**Sella, G.F., Dixon, T.H. et Mao, A., 2002**, *REVEL: a model for recent plate*

## ABSTRACT

**Keywords:** GPS, Middle East, triple junction, kinematics, data processing, repeatability, reference frame, velocity field

*Earthquakes shake the Earth every day and it will continue so because of the tectonic motions imposed by its internal geophysics and geodynamics. Turkey is one of the most seismically active regions in the world: everybody remembers the terrible events of Kocaeli ( $M_w$  7.6) and Düzce ( $M_w$  7.1), that occurred on August 17th and November 12th, 1999, near Istanbul, which caused 30 000 casualties, 50 000 injured and more than 35 billions euro of damages. These two earthquakes reinforced the interest of the scientific community in these regions of high population density. Many projects were born in the areas of high seismic risk in the Middle East, like the European APAME project (Archaeosismology and Palaeosismology for the protection of Archaeological sites in the Middle East, ICA-CT-2002-10024). The multiple collaborations between TUBITAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu, Gebze, Turkey), MIT (Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, United States) and laboratories of the IPGS (Institut de Physique du Globe, Strasbourg, France) made possible this PhD study performed at the IPGS. This article presents the quantification by GPS of the tectonics of the major structures linked to the convergence of the Eurasian, African and Arabian plates in south-eastern Turkey, which constitutes a major stake for the understanding and evaluation of the seismic hazard.*

# Histoire de l'hélicoptère

■ Jean TARIEL

*Tout au long de l'année, la naissance de l'hélicoptère est commémorée. C'est en effet en 1907 que Louis Breguet expérimenta son "Gyroplane" ; et que Paul Cornu réussit le premier vol libre d'un homme à bord de ce type d'aéronef. De nombreuses manifestations sont prévues en France pour célébrer ce centenaire. C'est peu après la fin de la Seconde Guerre mondiale que se développèrent les premières applications pratiques de cet appareil. Aujourd'hui il est devenu d'usage courant dans de nombreux domaines y compris dans différentes disciplines de la topographie.*

**A**u fil des numéros des articles parus dans XYZ<sup>(1)</sup> ont mis en lumière l'utilisation de l'hélicoptère en topographie, et la couverture de certaines de ces revues ont même mis ces aéronefs en vedette. En 2007 est célébré le centenaire du premier vol libre d'un homme en hélicoptère<sup>(2)</sup>, mais bien peu de personnes savent que ce sont des Français qui jouèrent le rôle initial dans son développement. C'est aujourd'hui un appareil dont l'image est devenue familière. Dans le domaine militaire il est largement utilisé depuis la guerre de Corée (1950-1953). Ses applications civiles sont nombreuses et particulièrement mises en valeur dans la lutte contre les catastrophes : acheminement des secours et opérations de sauvetage.

## Historique succinct de l'hélicoptère

**On sait que le principe du rotor ou "voilure tournante" est connu depuis très longtemps et a fait l'objet de travaux de recherche bien avant le XX<sup>e</sup> siècle.**

L'idée du principe qui devait conduire à l'hélicoptère fut l'une des premières qui vint à l'homme qui cherchait à s'élever dans les airs. Il est attesté que les Chinois, quatre siècles avant notre ère, savaient déjà faire voler des jouets à voilure tournante. En Europe la plus ancienne représentation d'un hélicoptère date du premier quart du XIV<sup>e</sup> siècle, il s'agit d'un jouet dont le "rotor" est actionné par la traction d'une ficelle.

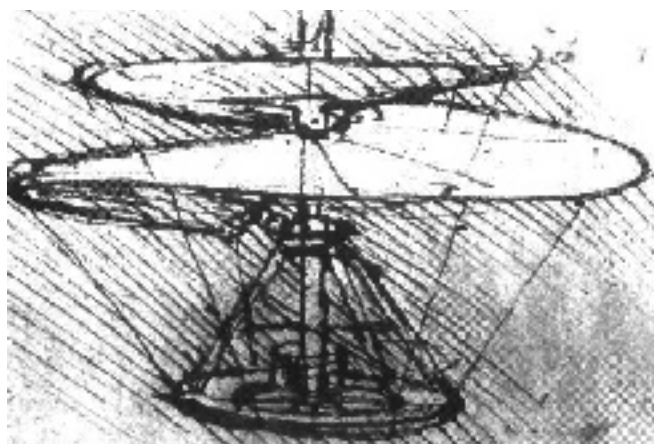
(1) Particulièrement les numéros suivants : 64, 86, 89, 90, 93, 94

(2) Ce centenaire est inscrit aux célébrations nationales pour 2007. Des manifestations sont notamment prévues à Paris et en région parisienne, à Douai (Breguet), Lisieux (Cornu) et Montbéliard (Oehmichen), ainsi qu'en d'autres villes.

(3) L'appareil original est exposé au Musée de l'Air et de l'Espace, au Bourget ; c'est le plus vieux modèle d'hélicoptère motorisé connu au monde.



A gauche : La plus ancienne représentation connue (vers 1325) d'un hélicoptère-jouet. A droite : Détail d'une peinture (vers 1460) représentant un "moulinet à noix" (noix = axe). C'est la première représentation d'une hélice de sustentation, ancêtre direct de tout hélicoptère.



L'hélicoptère imaginé par Léonard de Vinci.

**1486 : Léonard de Vinci** imagine l'"helix ptéron" ou aile en spirale, basé sur le principe de la vis d'Archimède. La machine reste à l'état de projet du fait de la méconnaissance des lois de l'aérodynamique et du défaut de motorisation.

**1754 :** le Russe **Lemonosov** présente à un aréopage scientifique un petit appareil à deux rotors coaxiaux contrarotatifs mus par un mécanisme d'horlogerie ; il démontre ainsi l'existence d'une force de sustentation.

**1784 :** les Français **Launoy** (naturaliste) et **Bienvenue** (mécanicien) font voler devant l'Académie royale des Sciences un petit appareil équipé de deux hélices coaxiales actionnées par la détente d'un ressort tendu par son enroulement autour de l'axe qui les relie.

**1796 :** l'Anglais **George Cayley** fait voler une toupie découpée dans une feuille de fer blanc lancée par traction d'une ficelle. C'est le premier rotor métallique ; il atteint 5 m de haut.

**L'impossibilité de disposer d'une force de sustentation suffisante ne permet pas alors d'envisager la réalisation d'un appareil susceptible d'élever un homme et d'avoir des applications pratiques.**

**1863 :** le Français **Gustave de Ponton d'Amécourt** construit un appareil<sup>(3)</sup> mû par un petit moteur à vapeur, mais ne réussit



■ ■ ■ pas à le faire décoller. On lui doit l'invention du mot "hélicoptère" tiré du grec *helix* " (spirale) et *ptéron* " (aile), c'est-à-dire "l'hélice qui sert d'aile".

**1877** : l'Italien **Enrico Forlanini** réussit à faire voler à plusieurs reprises et à une douzaine de mètres de hauteur, un hélicoptère à moteur à vapeur (de 8 kg et de 0,25 CV) qui entraînait deux rotors coaxiaux contrarotatifs.

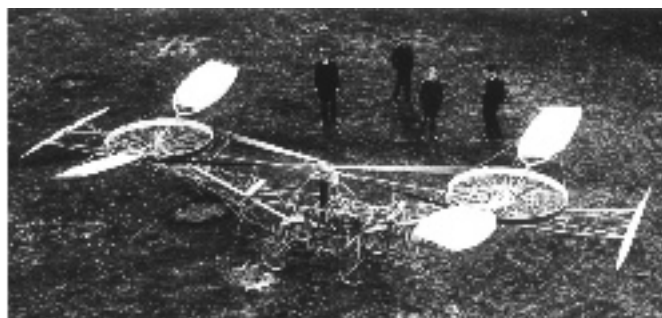
**1877** : le Français **Gustave Trouvé** réalise un petit hélicoptère à moteur électrique alimenté depuis le sol à l'aide de fils de cuivre reliés à des accumulateurs.

**L'invention du moteur à allumage commandé (ou moteur à explosion) permet de penser à la présence d'un homme à bord pour conduire la machine. Et c'est en France en 1907 que les maquettes expérimentales cèdent la place aux réalisations qui visent au transport d'un pilote.**

**Mai 1907** : l'ingénieur **Maurice Léger**, avec le soutien du Prince Albert 1<sup>er</sup> de Monaco, essaie au château de Marchais (Aisne) un hélicoptère équipé d'un moteur de 15 CV qui se soulève mais bascule aussitôt et tombe dans un étang ; il est entièrement détruit.

**AOÛT-SEPTEMBRE 1907** : l'ingénieur **Louis Breguet**, son frère **Jacques** et le professeur **Charles Richet** essaient à Douai (Nord) le "Gyroplane n°1" monté par l'ingénieur **Volumard**. L'appareil est très lourd (578 kg en charge) et d'un grand encombrement (4 hélices de 8,10 m de diamètre) mû par un moteur Antoinette de 45 CV. Comme il n'est pas prévu d'organes de direction il est guidé et retenu au sol par 7 hommes ; il se soulève à 0,60 m puis à 1,50 m, mais ne peut se maintenir en l'air en raison de son poids.

**Novembre 1907** : le mécanicien **Paul Cornu**, aidé de son père et de son frère réalise près de Lisieux (Calvados)<sup>(4)</sup> le **premier vol libre d'un homme en hélicoptère**. L'appareil, lourd de 260kg en charge, équipé d'un moteur Antoinette de 24 CV, est un birotor en tandem. Il s'élève d'une trentaine de centimètres, puis de 1,50 m avec le **premier passager**, en l'occur-



L'hélicoptère de Paul Cornu.



**Paul Cornu aux commandes de son hélicoptère. La maison "aux trois cheminées" visible derrière le bâtiment en bois, existe toujours en 2007. Elle permet de situer l'aire probable des essais.**

rence le frère du pilote qui se cramponne à l'appareil (poids total : 328kg)<sup>(5) (6)</sup>.

**Alors que l'avion se développe rapidement, l'hélicoptère reste un véhicule expérimental jusqu'à la Seconde Guerre mondiale.** Ce retard s'explique par la méconnaissance des différences entre les lois de l'aérodynamique qui s'appliquent aux voilures fixes et celles qui régissent les voilures tournantes. C'est le temps des pionniers qui succèdent aux précurseurs. Parmi de nombreux inventeurs il faut citer : **Yuriev** (Russe) qui dessine et construit le premier hélicoptère à rotor principal et à rotor anticouple. C'est la configuration la plus "classique" de l'hélicoptère actuel.

**Raul Pateras, marquis de Pescara** (Argentin) fixé en Espagne puis en France invente la variation cyclique des pales du rotor. Il pense à l'autorotation.

**Juan de la Cierva** (Espagnol) invente l'autogyre. C'est un avion sur lequel on ajoute un rotor qui est seulement entraîné par le vent relatif et non par un moteur.

**Etienne Oehmichen** (Français) boucle le 4 mai 1924 à Arbouans près de Montbéliard (Doubs) le premier kilomètre en circuit fermé.

**Louis Breguet** (Français) n'a pas renoncé et construit en 1935 avec **Dorand** le "Gyroplane Laboratoire".

**Au moment de la Seconde Guerre mondiale la connaissance de l'aérodynamisme de la voilure tournante permet de maîtriser la technique du rotor articulé et des organes indispensables à sa rotation et l'hélicoptère s'approche du stade de sa maturité.**

**Heinrich Focke** (Allemand) construit le Focke-Wulf 61 (Fw 61). C'est un appareil à rotors latéraux. Il est considéré comme étant le premier qui est bien adapté à ce que l'on attend d'un hélicoptère. La célèbre aviatrice Hanna Reitsch le pilote au

(4) Précisément sur la commune de Coquainvilliers, au lieu-dit La Goulaffre, actuelle usine Péruréna.

(5) Une maquette à l'échelle de 1/10 est présentée au Musée de l'Air et de l'Espace. Dans le cadre du centenaire il est prévu la reconstitution, par des élèves de l'Ecole supérieure des techniques aéronautiques et de construction automobile (ESTACA), d'une réplique en grandeur réelle de l'appareil ; elle sera présentée au Salon aéronautique du Bourget en juin 2007 puis remise au Musée de l'Air et de l'Espace.

(6) Relation (extraits) de Paul Cornu de son envol du 13 novembre 1907, parue dans l'Aérophile du 15 avril 1908 : "...le 13 novembre, pour la première fois, l'appareil enlevant son constructeur s'élève de 30 cm et y reste quelques instants... Le même jour, l'après-midi,..., l'appareil s'enlève emportant l'aviateur ; mais l'avant se soulevant plus haut que l'arrière, mon frère qui mettait en marche le moteur se cramponne au châssis et se trouve également soulevé à 1,50 m environ."

cours de nombreuses démonstrations. Puis Heinrich Focke crée la société Focke-Achgelis qui construit le Fa 223 à 9 exemplaires, c'est le premier hélicoptère construit industriellement. Il est utilisé pour le transport.

**Anton Flettner** (Allemand) invente l'hélicoptère à rotors "engrenants". Il fabrique le FI 282-Kolibri à 24 exemplaires, ce qui en fait le premier hélicoptère fabriqué en série. Il est utilisé pour la reconnaissance.

En fait ces appareils sont très peu utilisés au cours du conflit.

***L'hélicoptère atteint rapidement le stade de son plein développement, notamment aux Etats-Unis d'Amérique et en Europe.***

**Igor Ivan Sikorsky** (Américain d'origine russe) s'était intéressé à l'hélicoptère dès 1909 et avait fait plusieurs voyages en France pour y rencontrer les pionniers. Il construit dès 1910 un appareil mais renonce en raison des problèmes de vibrations qu'il rencontre. En 1919 il émigre aux Etats-Unis et se consacre à la construction d'avions et d'hydravions. En 1930 il se remet à l'étude de l'hélicoptère (le VS 300) qu'il présente en vol en septembre 1939 ; en mai 1940 il se voit remettre la licence N° 1 de pilote d'hélicoptère. **Sikorsky est considéré comme étant le père de l'hélicoptère.**

A la suite de Sikorsky, les constructeurs américains les plus connus sont : **Larry Bell** qui confie la direction de son bureau d'études à **Arthur Young, Stanley Hiller, Franck Piasecki, Charles H. Kaman.**

En France, dès la fin de la guerre, la Société nationale de constructions aéronautiques du sud-est (SNCASE) entreprend des études d'hélicoptère avec l'aide d'Heinrich Focke et d'une partie de son équipe. En 1951 sort l'Alouette I.

Mais équipés de moteurs à pistons les performances des hélicoptères restent modestes comparées à celles des avions de même capacité : vitesses ascensionnelle et de croisière moindres, charges utiles inférieures. En outre les vibrations engendrées par les moteurs alternatifs constituent des contraintes sévères pour la voilure ; et la régulation de la puissance en fonction de la vitesse oblige le pilote à concentrer son attention sur le réglage du régime du moteur par une manipulation incessante et fatigante de la manette des gaz. Entre 1946 et 1948 l'hélicoptère voit ses premières utilisations dans le domaine civil, y compris en topographie.

***C'est en 1955 que s'ouvre l'ère des appareils à turbine avec pour première mondiale la construction en série de l'Alouette II par la SNCASE.*** La puissance est accrue, le niveau vibratoire est réduit, la régulation de la vitesse du rotor en fonction de la puissance est rapide et précise. C'est l'hélicoptère tel qu'on le connaît de nos jours.

## Utilisation de l'hélicoptère en topographie, géodésie, photogrammétrie

Dans *"La véritable histoire de l'hélicoptère"* l'auteur date les premières applications civiles entre 1946 et 1948, aux Etats-Unis. Il rapporte que dès juin 1947 une chaîne de journaux l'uti-

lisait pour la photographie aérienne de reportage. Et il ajoute que *"le transport de matériel en zone difficile est tellement évident que tous les opérateurs la pratiquent déjà,..."*. Il est très vraisemblable que ce furent les Canadiens qui, les premiers, utilisèrent l'hélicoptère pour des travaux topographiques. Dans une rétrospective historique l'Association canadienne des Sciences géomatiques mentionne que dès 1948 la Topographic Division Surveys and Mapping Service, Department of Lands and Forests de Colombie britannique avait affrété un hélicoptère dans le but d'évaluer les possibilités de cet appareil dans l'exécution de travaux sur le terrain ; le même été une équipe de géodésiens opérant dans la même province utilisaient aussi un hélicoptère pour des travaux le long de la route de l'Alaska.

La vaste province de Colombie britannique couvre près de 950 000 km<sup>2</sup>. Elle est en grande partie montagneuse et forestière (sur près de 60 % du territoire). Sauf dans le sud où se concentre la population autour des villes de Vancouver et de Victoria, le reste du territoire est relativement vide d'habitants à l'exception de quelques agglomérations d'importances très moyennes. Toujours à l'exception du sud, les voies de communication terrestre sont peu développées ; un maillage élémentaire fut créé lors de la "ruée vers l'or", c'est encore celui que suivent les routes actuelles. Les voies ferrées sont au nombre de quatre. Ceci pour dire que les travaux géodésiques et topographiques présentent aujourd'hui encore, bien que dans une bien moindre mesure qu'autrefois, des difficultés certaines tant au point de vue des déplacements que celui des observations. Par contre, en raison de l'immensité du territoire et des difficultés dues au relief, le transport aérien y est remarquablement développé.

## Les essais canadiens

Divers articles parus dans *"The Canadian Surveyor"* rapportent les premières utilisations de l'hélicoptère dans le domaine de la topographie. A la fin de la Seconde Guerre mondiale la forte demande d'exploitation des ressources naturelles au Canada entraîna un besoin urgent de cartes topographiques des vastes régions septentrionales, très souvent éloignées de voies de communication. Avant l'utilisation de l'hélicoptère la difficulté principale que rencontraient géodésiens et topographes résidait dans l'accès aux stations qui n'était alors possible qu'à pied et éventuellement avec l'aide d'animaux de bât ; par ces moyens les deux tiers du temps passé sur le terrain étaient réservés au transport du matériel, à l'établissement des camps, au layonnage et à la montée aux sommets. Il ne restait plus que le tiers de ce temps pour exécuter les travaux proprement géodésiques et topographiques. L'un des auteurs (A.G. Slocomb) rapporte que ce fut longtemps le rêve de tous les topographes de disposer d'un moyen qui leur permettrait de "voler" de sommet en sommet et le soir de retrouver le camp de base. Cet auteur qui, avant l'utilisation de l'hélicoptère avait participé à de nombreux travaux sur le terrain mais n'y prenait plus part, ne savait qui blâmer : son père ou l'inventeur de l'hélicoptère qui, l'un et l'autre en ce qui le concernait, avaient mal calculé leur affaire ! Au mois d'août 1948 l'utilisation de l'hélicoptère par le Department of Lands and Forests de la Colombie britannique

■ ■ ■



■ ■ ■ avait avant tout le caractère d'un test : l'appareil pouvait-il être efficacement utilisé pour déposer des topographes et leur équipement à proximité des stations prévues situées sur des sommets ou sur des crêtes et les ramener ensuite à leur camp de base ? La zone choisie présentait les caractéristiques suivantes : terrain très accidenté, maillage relativement serré de routes pour faciliter la maintenance de l'appareil, proximité d'un aérodrome d'altitude peu élevée, forte demande de la feuille à équiper (Echelle : 1 mile au pouce soit 1/63 360<sup>(7)</sup>).

Pour bien saisir le caractère expérimental et novateur de ce test, les auteurs soulignent que très peu de renseignements étaient alors disponibles sur les possibilités des hélicoptères et ce qu'ils avaient déjà réellement accompli. Le scepticisme s'accrût lorsqu'au cours du choix d'un appareil il se révéla que ses performances réelles se situaient bien en deçà de celles qui étaient annoncées. Le pilote lui-même n'avait jamais atterri en montagne et seulement une ou deux fois sur un aérodrome d'altitude ! Ce fut un hélicoptère Bell 47 qui fut finalement retenu. Avant les opérations sur le terrain une "table ronde" fut organisée ; toutes les phases du travail et tous les aspects de l'utilisation de l'hélicoptère furent discutés au bénéfice mutuel du pilote et des topographes. Les résultats de ces essais firent l'objet de deux grandes catégories de conclusions et d'enseignements. Ce qui suit est extrait de l'article : "The Helicopter on a Photo-Topographical Survey".

### ■ Les conclusions du pilote et du mécanicien

Les conclusions qui suivent sont celles déduites des essais de 1948 ; aujourd'hui encore ces conclusions peuvent être pertinentes.

**L'altitude-densité** doit être connue ; c'est la mesure de la résistance de l'air ; cette résistance dépend de plusieurs variables dont les deux plus importantes sont l'altitude et la température. A basse altitude et basse température l'air est dense et la pression élevée, tout aéronef motorisé est performant. Si l'appareil s'élève la pression décroît et il perd en efficacité. Il en est de même quand, pour une altitude du sol donnée, l'augmentation de la température entraîne une diminution de pression qui équivaut à une augmentation d'altitude pour ce qui concerne l'appareil : le moteur produit moins de puissance et la voilure moins de portance.

**La température de l'air** doit être connue avant tout atterrissage ou décollage afin que soit calculée l'altitude-densité.

**La direction et la vitesse du vent** doivent pouvoir être évaluées pour les manœuvres d'atterrissage. En un lieu où l'appareil se pose pour la première fois un fumigène est utilisé. Pour les atterrissages suivants un morceau d'étoffe suffit ; il est fixé à une courte hampe lestée à sa base ou fichée dans le sol.

**Les aires d'atterrissage** doivent être suffisamment vastes et horizontales. Mais en montagne on se contente parfois de surfaces très étroites. Le revers est parfois difficile à apprécier en raison des illusions d'optique créées par les rochers et les

parois environnantes. En haute montagne les alpages sont les surfaces les plus appropriées pour se poser mais les plus problématiques pour s'envoler. Lorsque l'appareil s'est posé sur le rebord d'un escarpement vertical il prend parfois son envol par une manœuvre qui consiste à le basculer dans le vide.

**Les limites de charge** dépendent de l'altitude du lieu d'atterrissage et des conditions de température (cf. : l'altitude-densité) ; elles doivent être scrupuleusement respectées.

### ■ Les conclusions des topographes

Ces conclusions sont surtout propres au contexte canadien de l'époque ou, de nos jours, à celui de vastes pays dans lesquels les liaisons terrestres restent difficiles.

**Le choix des stations** est dégrossi au camp de base à l'aide des cartes et de photographies aériennes ; mais le choix définitif est laissé à la brigade de terrain.

**Des mesures de sécurité** doivent être prévues ; elles consistent à emporter suffisamment de ravitaillement pour deux raisons : les observations peuvent être retardées par le mauvais temps ou l'immobilisation de l'hélicoptère à cause d'une mauvaise météorologie ou d'une panne. Un itinéraire de repli est à prévoir vers le point le plus proche de secours : voie de communication ou lieu habité.

**Les approvisionnements** peuvent poser des difficultés d'acheminement lorsque la distance est importante entre le dépôt et le camp principal.

**Les communications** par radiophonie sont d'une nécessité absolue dans ce genre d'opérations<sup>(8)</sup>.

### ■ Les enseignements tirés de cet essai

**L'altimétrie barométrique par hélicoptère** en vol stationnaire au-dessus de plans d'eau permet en trois quarts d'heure d'effectuer l'équivalent d'un travail qui, à pied, aurait demandé une semaine.

**L'écoulement du temps, la fatigue du pilote et celle des topographes** sont des facteurs fortement reliés. La fatigue du pilote est directement proportionnelle au nombre de décollages et d'atterrissages, plus qu'au temps passé en vol. La fatigue des topographes n'est pas réduite du fait des fréquents déplacements d'une station à une autre.

**Le givrage du carburateur** est un problème sérieux car la puissance nécessaire au dégivrage est perdue par ailleurs<sup>(9)</sup>.

**L'entretien de l'hélicoptère** est une série d'opérations primordiales plus ou moins longues, qui doivent être acceptées par les topographes.

**Les quatre fautes à ne jamais commettre :**

- Ne jamais considérer les atterrissages et les décollages comme des opérations de routine.
- Ne jamais sauter d'un hélicoptère en vol stationnaire.
- Ne jamais laisser sur le terrain une brigade sans le matériel nécessaire à l'établissement d'un camp.
- Ne jamais exiger du pilote et du mécanicien des tâches autres que les leurs.

(7) En 1950 le Système national de référence cartographique adopta le 1/50 000

(8) Deux incidents, heureusement sans conséquences graves, dus l'un à la déficience l'autre au manque de communication radiophonique, sont rapportés dans les récits "Nuit corse" et "Mission héliportée au Sahara" ("La boîte de Pandore – autres souvenirs retrouvés des derniers arpenteurs de l'IGN", Editions APR-IGN – 1995).

(9) Aujourd'hui ce problème ne se pose plus sur les turbines. Je remercie M. Renaud Lataillade du Groupement français de l'hélicoptère d'avoir revu et corrigé certaines parties de ce chapitre.

## En France, les probables premières utilisations de l'hélicoptère en photogrammétrie

Lors de leur première utilisation de l'hélicoptère en topographie, les Canadiens s'en servirent en tant que moyen de transport ; il semble que les Français l'utilisèrent tout d'abord comme plate-forme de prises de vues.

### ■ Prises de vues dans les Terres australes et antarctiques françaises (TAAF)

Les TAAF étant dépourvues d'aérodromes et trop éloignées de pays qui en sont équipés, le seul moyen d'y voler reste l'hélicoptère. C'est celui qu'a utilisé le Professeur Albert Bauer pour réaliser au cours de l'été austral 1962-1963<sup>(10)</sup>, des prises de vues verticales de l'île de Kerguelen et de l'archipel des Crozet.

**Conditions générales des prises de vues :** l'utilisation d'un hélicoptère relativement léger, une Alouette II, et les conditions météorologiques propres à ces régions firent que la réalisation de couvertures photographiques régulières se révélèrent impossibles. Il était inutile d'envisager de photographier des bandes rectilignes et, a fortiori, parallèles entre elles avec un recouvrement convenable. Les vols photographiques ne pouvaient être que de courtes durées en raison des conditions météorologiques locales : vents violents, turbulences dangereuses, variations brutales de visibilité. Le vol rectiligne n'était possible que par vent arrière et la réalisation d'une bande que l'on aurait voulu parallèle à la précédente aurait nécessité le retour, à basse altitude, à la zone de départ.

**Le matériel utilisé** se composait d'une chambre automatique à film SOM et d'un intervallo-mètre-chronodéclencheur de même marque. La chambre reposait sur un plateau installé à l'extérieur de la cabine, et inclinée de 6,5° vers l'arrière<sup>(11)</sup> pour compenser l'assiette moyenne de l'hélicoptère en vol. L'intervallo-mètre était placé au-dessus de la trappe de cabine ; il recevait une inclinaison égale à celle de la chambre. Ainsi lorsque la bulle de sa nivelle se trouvait entre ses repères l'axe de la prise de vue était vertical. Cette verticalité était recherchée, dans la mesure du possible car difficile à obtenir et à maintenir, par le pilote qui agissait sur la vitesse. Dans la conclusion de son article le Professeur Bauer souligne que *"cette méthode demande avant tout un pilote confirmé, s'intéressant à l'exécution des prises de vues, une bonne entente entre pilote et opérateur, et donc, de la part de ce dernier, une bonne connaissance des conditions aérologiques et de l'utilisation de l'Alouette"*.

### ■ Prises de vues stéréophotogrammétriques pour le relevé à grande échelle de très hauts monuments

Les photographies de monuments élevés faites à partir du sol posent un problème difficile à résoudre : les parties hautes

sont très souvent masquées par les plus basses et l'échelle de la prise de vue décroît de la base vers le faite. En 1969 la Société française de stéréotopographie (SFS) a utilisé une Alouette III pour la prise de vue de façades et de tours des cathédrales de Bourges et Reims. L'hélicoptère, équipé d'une chambre Wild RC8 couplée à un système de flashes, a été utilisé pour réaliser à une quarantaine de mètres des monuments et à des hauteurs comprises entre 50 et 75 m au-dessus du sol des couples stéréoscopiques à bases verticales ou horizontales. L'utilisation de l'hélicoptère en vol stationnaire a permis de diminuer les effets de traînée, et l'emploi de flashes (exposition à 1/1000 avec obturateur ouvert à 1/200) de travailler en mauvaises conditions d'éclairage naturel et d'éliminer en grande partie les effets dus aux vibrations de l'appareil.

## Expérience personnelle

Au cours de l'été 1971 j'ai participé au piquetage du tracé d'une ligne électrique à haute tension dans la partie de la Province de Québec frontalière du Labrador (Province de Terre-Neuve). Située sur le Bouclier canadien cette région présente un relief mou, peu prononcé, les lacs y sont fréquents ainsi que des marécages dans les parties basses. L'équipe dont je faisais partie disposait pour le transport du personnel et du matériel d'un avion et de deux hélicoptères<sup>(12)</sup>. La préparation de cet article me remet en mémoire quelques points concernant l'utilisation de ces appareils au cours de ce chantier.

### ■ Relation entre pilote et géomètres

L'un des pilotes, probablement peu au fait des nécessités liées aux travaux topographiques, jugeait désordonnées les activités des géomètres, notamment en ce qui concernait les déplacements parfois fréquents de personnel qui lui étaient demandés. Une "table ronde" préalable aurait vraisemblablement évité des frictions<sup>(13)</sup>.



**Reconnaissance par hélicoptère d'un point géodésique repéré au sol.**

(10) Un tableau d'assemblage de la Photothèque nationale indique qu'une précédente mission photographique héliportée avait été faite en 1957 (Colonel Genty) sur l'île aux Cochons.

(11) L'article du professeur Bauer est ainsi rédigé : *"L'ensemble du plateau est incliné de 6°30' vers l'arrière. Cette inclinaison compense l'assiette moyenne de l'Alouette en vol."* Or un hélicoptère en vol de translation bascule bien vers l'avant et ne se cabre pas ; il semble donc que la chambre doive être inclinée vers l'avant et non vers l'arrière.

(12) Un hélicoptère Bell et un Fairchild-Hiller.

(13) Au cours de la préparation des travaux complémentaires d'abornement franco-brésilien des difficultés sont aussi survenues entre géographes et militaires qui fournissaient un hélicoptère pour le transport du personnel et du matériel sur le terrain. (*"Sur la frontière Guyane - Brésil 1956- 1961-1962-1991"*, Jean Hurault et Pierre Frenay - Les Cahiers historiques de l'IGN, janvier 2005)





Poser près d'un point repéré au sol. L'hélicoptère est équipé de flotteurs.

### ■ ■ ■ ■ Flotteurs

Les deux appareils étaient équipés de flotteurs et pouvaient se poser sans difficulté sur un lac, un marécage et la terre ferme.

### ■ Dépôts de carburant

C'est le point noir de l'utilisation de l'hélicoptère. Des dépôts de carburant (des "caches") sont fréquemment organisés sur le territoire d'un chantier pour l'avitaillement des appareils. En plus des réserves au camp de base notre équipe avait préparé une ou deux "caches". Il nous est aussi arrivé à plusieurs reprises de trouver des bidons plus ou moins remplis, abandonnés par de précédents opérateurs car le coût de leur transport par voie aérienne, la seule possible, est élevé et il est plus facile et surtout moins onéreux de les laisser là où ils ont été déposés, même pleins. Ne sachant pas depuis combien de temps ces bidons avaient été abandonnés il n'était pas question d'utiliser ce carburant, "gracieusement offert" en raison de la présence possible d'impuretés, notamment d'éclats de métal dus à la décomposition du contenant, qui auraient pu endommager les moteurs. Depuis lors des fuites se sont très probablement produites ; qu'elle fut à la longue leur influence sur l'environnement (végétation, eau, animaux) ?

Il est parfois, mais très rarement, tenu compte de ce problème. Aussi est-il bon de signaler qu'en 1995, le Service de cartographie de l'Armée canadienne entreprit la récupération des bidons de carburant qu'il avait abandonnés sur l'île de



Découverte d'une "cache" de carburant abandonné par des opérateurs précédents. Le responsable du chantier de topographie indique que quatre bidons sont encore pleins, mais le carburant ne sera pas utilisé.

Baffin. Le ramassage fut un succès : le nombre de bidons récupérés s'élevait à 110 % de ceux abandonnés par le Service. Pour montrer l'importance du potentiel de pollution, plus de quatre cents d'entre eux étaient encore pleins. Après les avoir rassemblés ils étaient vidés, étuvés, déchiquetés et enterrés dans une décharge et le carburant brûlé. Il est bon aussi de souligner que l'organisation de cette opération semble ne pas s'être faite sans difficultés (importance des moyens à mettre en œuvre, du budget à prévoir)<sup>(14)</sup>.

### ■ Retour problématique vers le camp de base

En fin de journée les hélicoptères recueillaient les équipes de terrain (arpenteurs et bûcherons) pour les ramener au camp de base. Un soir de gros orage et à la tombée de la nuit, les conditions de vol se situant à leur limite, il s'en fallut de très peu que je ne restasse seul sur le terrain pour y passer la nuit, perspective qui ne m'enchantait guère ; ni vivre ni couvert de secours n'ayant été prévus. Abandonnant le matériel (aucun danger de vol, nous étions seuls dans la région) j'ai pu rapidement embarquer, bien heureux à la perspective de manger à ma faim et de retrouver un lit ! L'un des conseils donnés dans les "quatre fautes à ne pas commettre" n'avait alors pas été respecté (voir plus avant : ne jamais laisser sur le terrain...) !

(14) "Op Conservation 95", Scotty Alger-Geomatica Press, 1996



Sur le terrain, avitaillement en combustible de l'hélicoptère Bell.



En fin de journée, récupération d'un topographe qui aide à la manœuvre d'atterrissage en terrain encombré par la végétation. Le morceau d'étoffe blanche a permis au pilote d'évaluer la force et la direction du vent.

## Participation directe de l'hélicoptère à des mesures géodésiques et topographiques

En géodésie l'hélicoptère a pu jouer un rôle autre que celui de moyen de transport. Ses possibilités de vol stationnaire ont permis de l'utiliser comme **"signal"** ou comme **"instrument de nivellement"** au-dessus de points à déterminer.

### • "Signal"

Le Service géologique des Etats-Unis l'a utilisé comme "signal" pour fixer les coordonnées horizontale et verticale de points géodésiques de 4<sup>e</sup> ordre implantés en zones forestières. A partir de points connus des mesures angulaires (horizontales et verticales) étaient faites sur un gyrophare fixé sur l'appareil lorsque celui-ci stationnait au-dessus du point à déterminer ; simultanément étaient exécutées des mesures électromagnétiques de distances. Un système de visée nadirale permettait au pilote de maintenir son appareil à la verticale du point. L'utilisation de l'hélicoptère évitait ainsi de longs cheminements topographiques ou le transport et la construction de signaux élevés.

### • "Instrument de nivellement"

L'hélicoptère a pu être utilisé de deux manières pour le nivellement barométrique :

– Soit comme simple moyen de transport : l'appareil se pose, le topographe en descend avec son baromètre, s'en éloigne suffisamment pour éviter la surpression provoquée par le rotor et effectue ses observations.

En 1956, les Canadiens ont utilisé l'hélicoptère de cette manière, en pratiquant deux méthodes. Celle des deux bases, utilisée quand des points d'altitude connue sont disponibles en nombre suffisant ; des baromètres y stationnent en permanence et observent les variations de la pression atmosphérique. Et la méthode du saute-mouton dans laquelle le cheminement se fait à partir d'un point de référence et après une première série d'observations en ce point les baromètres se chevauchent l'un l'autre de point en point.

– soit en se stabilisant à une certaine hauteur au-dessus du sol, le topographe à bord de l'appareil note les lectures faites au baromètre et mesure la hauteur de vol par rapport au sol. Cette méthode est utilisée en terrain où les déplacements sont difficiles (forêts, marécages, etc.) et les aires d'atterrissage rares, voire inexistantes.

Des essais ont été menés en 1969 au Gabon, dans une région de parcours très difficile (forêt marécageuse) et totalement inhabitée, en utilisant un hélicoptère Alouette II. Ils firent l'objet d'un rapport<sup>(15)</sup> dont on peut tirer les enseignements suivants : lors d'essais préalables à la mission proprement dite, trois baromètres furent embarqués à bord de l'hélicoptère. Les vibrations dues à l'appareil étaient en très grande partie éliminées par l'utilisation de coussins en mousse plastique sur lesquels reposaient les baromètres.

(15) "Utilisation de l'hélicoptère en nivellement barométrique – 2<sup>e</sup> brigade de rattachement APR au Gabon-Octobre 1969", G. Durieux – Brazzaville le 6 janvier 1970 – Centre de documentation de l'IGN – N°49249

## Les drones d'hélicoptère



**Miniature Aircraft USA : équipé pour la photographie aérienne.**

Les drones sont des engins capables d'évoluer dans les airs sans présence humaine à leur bord. Ils sont pilotés par téléguidage. Ils couvrent tous les types d'aéronefs : voilure fixe ou tournante, aérostats dirigeables. Leur dimension, leur puissance, leur performance, leur destination sont diverses.

Depuis déjà longtemps et pour certains travaux ces engins ont retenu l'attention des photogramètres et d'autres spécialistes concernés par des chantiers de petites dimensions car ils permettent de réaliser des prises de vues de manière autonome et économique, à de faibles hauteurs de vol, à proximité des objets à saisir, et aussi au-dessus de zones d'accès difficile à des aéronefs avec équipage ou de régions à restrictions aéronautiques ou dangereuses. Grâce à leurs qualités manœuvrières ce sont les drones d'hélicoptère\* qui retiennent le plus l'attention. Ces appareils sont mus par de petits moteurs à essence ou électriques ; les premiers sont plus puissants et tiennent l'air plus longtemps, les seconds sont beaucoup plus silencieux.



**Maxi-Joker 2 : spécialement étudié pour le transport de petites charges, incluant des appareils photographiques**

Pour la photographie les constructeurs de ces drones ont étudié des supports orientables en direction et en inclinaison et qui préservent au mieux l'appareil de prises de vues des vibrations causées par le moteur. La puissance des drones utilisés ne leur permet d'emporter que de petits (comparés aux chambres photogrammétriques classiques) appareils soit à film (24 x 36 mm ou 6 x 6 cm) soit à dispositif numérique. Les commandes destinées aux prises de vues sont transmises à partir du sol : direction et inclinaison de l'axe optique, déclenchement de l'obturateur, réglage de la distance focale (zoom), etc.

\* Contrairement aux modèles réduits d'avions, la construction et le pilotage télécommandé d'un drone d'hélicoptère ne peuvent être menés à bien que par des spécialistes. Le pilotage exige une grande expérience ce qui nécessite soit faire appel à un pilote chevronné soit s'entraîner longuement.





Les mesures se révélèrent stables et cohérentes<sup>(16)</sup>, les trois appareils réagissant immédiatement et sans retard aux variations rapides d'altitude de plusieurs centaines de mètres, affichant des valeurs correctes et uniformes, notamment celle de départ. Les paramètres pouvant avoir une influence sur les observations étant la hauteur de l'hélicoptère qui produit un effet de sol, l'angle d'incidence des pales qui est fonction de la charge et fait varier le déplacement de l'air à travers le rotor, la place du baromètre dans la cabine, la température et la vitesse de translation.

L'auteur du rapport insiste sur deux points évoqués auparavant par les Canadiens : le soin à apporter à la préparation du vol avec la participation du pilote, et la prise de toutes les mesures de sécurité en cas d'incident ou d'accident.

## Pratique de l'hélicoptère dans le domaine des sciences géodésiques

### Avantages : L'hélicoptère permet

- l'accès des topographes à des sites difficiles d'approche (principalement en montagne)
- le vol stationnaire pour certains travaux particuliers
- le survol à vitesses lentes et à faibles hauteurs et ainsi l'obtention d'une densité élevée de points, d'une meilleure résolution et d'une précision accrue (divergences limitées, distances justes)
- le survol de couloirs rectilignes ou sinueux (routes, voies ferrées, canaux, oléoducs, lignes de transport d'énergie électrique, etc.) (*Gaz de France a fréquemment utilisé l'hélicoptère pour la reconnaissance des tracés et la surveillance des gazoducs*)
- l'exécution en fin de bande des boucles très serrées pour amorcer rapidement la bande suivante
- de ne pas devoir retourner à un aéroport pour le ravitaillement en carburant (*si la pratique des "caches" est favorable pour la rentabilité elle est préjudiciable à l'environnement : voir précédemment*)

### Désavantages

- coût d'exploitation plus élevé que celui d'un avion
- trop lent pour les prises de vues à petites échelles (vitesse rarement supérieure à 60 nœuds soit environ 110 km/h)
- autonomie de vol réduite (de l'ordre de 3 heures)
- capacité limitée d'emport pour le transport de charges importantes (instruments lourds et encombrants)

### Contraintes

- appel à des entreprises locales spécialisées dans l'exploitation d'hélicoptères (*cette contrainte se transforme en avantage, notamment à l'étranger, pour les deux raisons principales suivantes :*  
– *facilite l'obtention des autorisations de vol*  
– *annule les frais d'acheminement de l'hélicoptère et limite les coûts de mise en œuvre*)
- appareils non spécialement aménagés pour les prises de vues\*
- autorisations de survol plus difficiles à obtenir, parfois impossibles en raison de vols à basse altitude (*l'utilisation d'un avion bimoteur est souvent obligatoire au-dessus de zones urbaines*)

\* L'IGN a toutefois exploité entre décembre 1976 et mars 1984 un hélicoptère Alouette III (F-BVVH) spécialement aménagé pour la photographie aérienne et la thermographie ; l'appareil a aussi servi à la calibration d'émetteurs et de réémetteurs du réseau TDF, ainsi qu'à l'acheminement de brigades géodésiques en zones montagneuses. (Il était une fois... le... "service des activités aériennes de l'IGN" (S.A.A.), J. Faivre – 1989).

## L'acquisition des données

*"La photogrammétrie est la technique qui se propose d'étudier et de définir avec précision les formes, les dimensions et la position dans l'espace"<sup>(17)</sup> des objets au moyen de mesures faites sur des images perspectives de ces objets. Cette définition est très générale ; en topographie les objets considérés sont des portions plus ou moins étendues d'un territoire, c'est-à-dire le terrain. Ces images sont très généralement les représentations sur un écran plan des traces de rayons perspectifs ou de gerbes perspectives, ce qui permet de généraliser la définition de la photogrammétrie comme étant "toute technique de mesure qui permet de modéliser un espace 3D en utilisant des images 2D"<sup>(18)</sup>. Les méthodes courantes d'acquisition des données sont la photographie argentique ou numérique ; les méthodes plus récentes font appel au radar, au balayage par télémétrie aéroportée.*

## La géométrie des images photographiques

La géométrie conique est celle qui est utilisée dans tout appareil photographique classique. La géométrie cylindro-conique est utilisée dans certaines chambres photographiques.

**En géométrie conique** l'image perspective se forme soit sur une pellicule recouverte d'une couche sensible argentique, soit est enregistrée sous forme numérique par l'intermédiaire d'une matrice composée d'un grand nombre de petits éléments qui forment un dispositif à transfert de charge (DTC – en anglais : CCD pour "Charged Coupled Device").

Cette géométrie est celle qui est classiquement utilisée en photographie aérienne. Ce mode d'acquisition permet sans difficulté l'obtention de scènes stéréoscopiques qui sont, à une certaine échelle, des modèles en relief du terrain ; il suffit pour cela que chaque point de "l'objet", c'est-à-dire du terrain, figure sur au moins deux clichés pris de deux points de vues différents. A partir d'un aéronef l'axe des prises de vues à caractère topographique est très souvent proche de la verticale. Généralement c'est l'avion qui est utilisé pour la photographie aérienne à caractère topographique. Comparé à l'hélicoptère il permet d'enlever des charges utiles plus importantes, il offre davantage d'espace dans son habitacle, il assure au-dessus d'étendues plus ou moins vastes une meilleure régularité de vitesse, de stabilité et de trajectoire, son rayon d'action est supérieur et son coût d'exploitation inférieur.

Cependant l'hélicoptère est préféré pour des vols de faible hauteur (200 mètres ou moins) et pour sa manœuvrabilité exceptionnelle qui lui permet :

- de progresser lentement pour réaliser des couvertures sys-

(16) Dans les années 1950, une première tentative de nivellement aéroporté avait pourtant été décevante : aucune lecture n'avait été possible sur les baromètres Fortin et anéroïde en raison des vibrations dues au moteur et aux pales ; rapporté dans " Du nivellement aéroporté " ("La boîte de Pandore – autres souvenirs retrouvés des derniers arpenteurs de l'IGN" Editions APR-IGN, 1995).

(17) "Photogrammétrie générale", Henri Bonneval Editions Eyrolles, Paris - 1972.

(18) "Photogrammétrie numérique", Michel Kasser et Yves Egels (sous la direction de) Hermès Sciences Publications, Paris - 2001.

## La photogrammétrie au service de l'hélicoptère

La photogrammétrie industrielle permet la mesure dans les trois dimensions de grands objets de construction mécanique complexe. La photographie en général permet la saisie d'images en un laps de temps restreint, ce qui permet de s'affranchir des déformations de structure dues aux gradients de température et l'étude d'objets en mouvement même très rapide. L'incertitude des mesures est de l'ordre du millimètre pour un volume de l'ordre de 100 m<sup>3</sup>.

Ainsi la Société d'étude et de travaux photogrammétriques (S.E.T.P.)\* a-t-elle contribué à des études sur des hélicoptères pour le compte de la Société nationale industrielle aérospatiale (S.N.I.A.S.) puis pour Eurocopter qui lui succéda :

- Numérisation d'un tronçon entre deux cadres afin de le modéliser en trois dimensions pour la reconstruction d'une matrice mécanique destinée à la confection de carénages latéraux d'un hélicoptère, la matrice originale ayant été détruite dans une usine de sous-traitance à l'étranger.
- Numérisation en trois dimensions de certains points caractéristiques de la structure d'un hélicoptère en les rattachant au référentiel de l'appareil, dans le but de mettre au point un système rapide et efficace de contrôle par du personnel peu spécialisé dans la méthode, des points sensibles de la structure et du train d'atterrissage. Ce type de contrôle a ensuite été étendu aux avions de lignes.

Désormais, pour ce type de mesures la métrologie industrielle utilise le scannage 3D qui permet de recueillir à partir d'une seule station située à plusieurs dizaines de mètres et en quelques minutes un nuage de plusieurs millions de points à une précision de l'ordre de +/- 10 µm/m. Mais l'objet doit être immobile. Seule la photogrammétrie permet d'enregistrer des objets en mouvement même très rapide, ou des phénomènes fugitifs :

- mesure de déformation dynamique d'une pale d'un aéronef convertible, c'est-à-dire capable de décoller comme un hélicoptère puis de voler comme un avion. La détermination consistait à saisir

sous forme angulaire le "dévrillage" de la pale lors du basculement de son rotor. Cette application de la photogrammétrie à un hélicoptère, nécessitait l'utilisation de stroboscopes ; pour l'anecdote, la SETP s'était adjoint la collaboration de la société "Précision scientifique et industrielle" dont le fondateur ne fut autre qu'Etienne Oehmichen (voir l'historique).

- Mesure des déformations élastiques au moment du choc avec le sol lors de l'écrasement d'un hélicoptère Puma S.A. 330 tombant en chute libre, et des déformations statiques du plancher qui supporte les turbines. La difficulté résidait dans la synchronisation des prises de vues stéréométriques avec l'impact au sol de la structure lâchée d'une hauteur de 10 m.
- Mesure de déformation de la structure d'un hélicoptère par soulèvement de l'appareil simulant un décollage, pour connaître la déviation angulaire entre le point de fixation de l'appareil de visée et la tourelle de tir.

De son côté le département de photogrammétrie de l'Université Laval à Québec (Canada) a participé, à la demande de la division Vertol de la compagnie Boeing, à l'étude sur une maquette placée dans une soufflerie de l'aérodynamique des remous produits par un rotor d'hélicoptère. La visibilité des filets d'air, qui décrivaient une sorte de spirale, était assurée par une fumée blanche qui s'échappait de l'extrémité d'une pale. Et des mesures faites sur la voilure elle-même permirent de tirer des conclusions sur les déformations de cette dernière.

\* Société d'étude et de travaux photogrammétriques (S.E.T.P.)  
451, boulevard Georges Clemenceau 13654 Salon-de-Provence  
setp@club-internet.fr

- "Des systèmes de poursuite laser mobiles optimisent la métrologie chez Eurocopter" Reporter N° 50, Leica Geosystems
- "Contrôles dimensionnels par photogrammétrie de structures d'hélicoptères", Maurice Blaustein SETP France - Mesures photogrammétriques sur hélicoptères - Rapport 2006
- "Analyse photogrammétrique de l'aérodynamique d'une voilure tournante", Dr. A.-J. Brandenberger Bulletin N° 41 (janvier 1971) de la Société française de Photogrammétrie.

tématiques spéciales<sup>(19)</sup> ou qui nécessitent des vitesses peu élevées ;

- de s'immobiliser au-dessus des "objets" à photographier ;
- d'atteindre des "objets" inaccessibles pour des travaux au sol<sup>(20)</sup> ;
- de procéder à des déplacements horizontaux et verticaux qui permettent de jouer sur les angles et les échelles des prises de vues ;
- de se retirer rapidement de sites sujets à des prises urgentes de mesures de sécurité<sup>(21)</sup> et, au besoin, de pouvoir se poser au plus vite.

**En géométrie cylindro-conique** l'enregistrement se fait sur un capteur DTC situé au foyer de l'optique et perpendiculaire au vecteur-vitesse de l'image. Transversalement l'image se crée "naturellement" ; longitudinalement elle est engendrée, sous forme d'une bande qui peut être très longue, par le déplacement de la plate-forme. Mais ce mode d'enregistrement ne permet pas l'obtention de scènes stéréoscopiques, donc la reconstitution de modèles en relief, puisque chaque point du terrain n'est enregistré qu'une seule fois. Mais si l'on dispose en plus de la visée verticale d'un système de pointage oblique vers l'avant et vers l'arrière de l'aéronef tout point est observé

à partir de trois points de vues différents et la stéréoscopie devient alors possible. Ce mode d'enregistrement d'images a d'abord été utilisé à bord de satellites. Maintenant il est aussi pratiqué à bord d'avions et d'hélicoptères<sup>(22)</sup>.

## La télémétrie aéroportée

Le principe de fonctionnement repose sur la différence entre le temps de l'émission d'une impulsion laser et celui de sa réception après qu'elle a été réfléchi par l'objet visé. L'instrument utilisé est donc un télémètre électronique équipé d'un disposi-

(19) "Saisie spatiale et représentation infographique en trois dimensions d'un complexe architectural à l'aide de prises de vues aériennes obliques", F.J. Heimes, J. Kanne, H. Junius - Bulletin N° 107 (1987,3) de la Société française de photogrammétrie et de télé-détection

(20) "Helicopter supported photogrammetric survey of Ramsberg Castle", G. Eckstein, J. Peipe - The Photogrammetric Record, Vol.15, Issue 87 (April 1996), pages 447-453

(21) Par exemple dans le prolongement de pistes d'aérodromes.

(22) Il est à noter qu'au cours de la Seconde Guerre mondiale l'aviation américaine de reconnaissance avait utilisé cette géométrie avec des chambres de prises de vues aériennes démunies d'obturateur et à déroulement continu du film. Les vols se déroulaient à très basses altitudes (parfois quelques dizaines de mètres) et à grandes vitesses, les temps d'exposition étaient très brefs.





**Hélicoptère équipé pour la télémétrie laser aéroportée. L'armature que forment la nacelle qui abrite les capteurs et les deux bras qui supportent les antennes GPS, constitue un ensemble rigide. Ce dispositif,**

**fixé sous l'hélicoptère, évite le rattachement géométrique des différents éléments (capteurs, antennes GPS, centrale à inertie) les uns par rapport aux autres à chaque nouvel équipement d'un hélicoptère. Le seul désavantage d'un tel montage serait son aspect impressionnant qui peut parfois intriguer et inquiéter des observateurs terrestres non avertis.**



**Console d'acquisition installée à bord d'un hélicoptère.**

tif optico-mécanique (miroir tournant ou oscillant) qui assure un "fauchage" très rapide du terrain (qui peut atteindre 150 000 points par seconde, voire plus). L'étendue de chaque "fauchée", qui est transversale à la trajectoire de la plate-forme est en

général égale à l'altitude de vol (entre 60 et 200 m, avec une densité de plusieurs dizaines de points par mètre carré). La progression de l'aéronef, la plupart des cas un hélicoptère en raison de la faible hauteur de vol, assure la couverture longitudinale ; il s'agit d'un enregistrement comparable à celui de la photographie en géométrie cylindro-conique.

Si la trajectoire de l'hélicoptère était idéale, c'est-à-dire parfaitement rectiligne et à altitude constante, l'enregistrement obtenu serait un fidèle modèle numérique du terrain (MNT). Mais un aéronef volant à plus ou moins basse altitude subit les turbulences de l'air qui engendrent des mouvements permanents : roulis, tangage, lacet, changements de vitesse et d'altitude. Il est donc indispensable de connaître en permanence les variations de l'assiette<sup>(23)</sup> du capteur, par observation continue selon les trois axes de ses inclinaisons, et les coordonnées de son centre optique. Ces données sont obtenues à l'aide d'une centrale à inertie couplée à un récepteur GPS. Une fois qu'elles sont connues on peut faire subir à l'enregistrement des mouvements "inverses" à ceux observés au cours du vol et le reconstituer tel qu'il aurait pu être obtenu si l'aéronef avait conservé une trajectoire parfaite tout au long de la prise de vue. ●

## Remerciements

à Messieurs : Blaustein, SETP, France – Derwael, Hogeschool Antwerpen, Belgique – De Boeck, Eurosense, Belgique – Tiberghien, FIT SA, France – Bayerli, Fugro-Inpark BV, Pays-Bas – Lacombe, Geiod-Fugro SAS, France – Dübert (et Mme Pavell), Hansa Luftbild, Allemagne – Boulay, Jouis et Lataillade, Groupement français de l'hélicoptère, France.

## Bibliographie

**René Chambe** *Histoire de l'aviation* – Flammarion – Paris – 1972  
**Charles H. Gibbs-Smith** *Aviation – An historical survey from its Origins to the end of World War II* – Her Majesty's Stationery Office – Londres – 1985

**Yves Le Bec** *La véritable histoire de l'hélicoptère de 1486 - 2005* Editions Jean Ducret SA – Chavannes-près-Ressens (Suisse) - 2005

**Le Pays d'Auge** *Trente années dans le ciel de Lisieux* – 48<sup>e</sup> année – Numéro spécial Juin/Juillet 1995 – 14100 Lisieux

**A.C. Hamilton and L.M. Sebert** *"Significant Dates in Canadian Surveying Mapping and Charting"* – Geomatica Press, 1996

**A.G. Slocomb** *"The Helicopter on a Photo-topographical Survey"*, The Canadian Surveyor, Volume X, July 1949, Number 1

**H.N. Spence** *"Helicopter Operation – Knob Lake Vicinity Québec-Labrador - Season 1949"* The Canadian Surveyor, Volume X, January 1951, Number 7

**G.C. Emerson** *"Topographical Mapping by Helicopter"* The Canadian Surveyor, Volume X, January 1952, Number 11

**P.C. Atkinson** *"The Use of the Helicopter for Topographical Mapping Survey"* – The Canadian Surveyor, Volume XI, October 1953, Number 6

**Albert Bauer** *"Utilisation de l'hélicoptère Alouette II pour la prise de vues verticales"*, Bulletin N° 11 (octobre 1963) de la Société française de Photogrammétrie

**Pierre de Fontguyon** *"Emploi conjugué d'un hélicoptère et de flashes pour les prises de vues stéréophotogrammétriques ayant pour objet le relevé à grande échelle de très hauts monuments"*, Bulletin N° 48 (octobre 1972) de la Société française de Photogrammétrie

**Manual of Photogrammetry- Fourth Edition** *"Field Surveys for Photogrammetry – Surveys Giving Both Horizontal and Vertical Control"* American Society of Photogrammetry, 1980.

**M.S. Slivitzky** *"Precise Barometric Levelling in Northern Quebec using Helicopter for Transportation"*, The Canadian Surveyor, Vol. XIV, October 1958, No. 5

**L. Laflamme** *"Precise Barometric Levelling in Northern Quebec with the Help of Helicopters"* The Canadian Surveyor, Vol. XIV, January 1959, No. 6

**Gordon Petrie** *"Ground Based Aerial Photography"*, GEOInformatics, Volume 9, 4, June 2006

**J.M. Ales et D. Talaga** *"Prise de vues aérienne à basse altitude par des moyens non conventionnels"*, Ecole supérieure des Géomètres et Topographes, 1982.

(23) contrairement à l'usage nous avons préféré utiliser le substantif assiette à celui d'attitude qui est repris de l'anglo-américain ; car avec attitude, latitude et altitude on arrive parfois à ne plus s'y retrouver !

## ABSTRACT

*During the year 2007 the birth of the helicopter is commemorated. In fact it is in 1907 that Louis Breguet made experiments with his "Gyroplane" ; and Paul Cornu made the first free flight of a man aboard an aircraft of this type. Many events are scheduled in France to celebrate this centenary. The first practical applications of this machine took place a few years after the end of the Second World War. Nowadays it is widely used in numerous fields. It is interesting to see what were its uses in various domains of surveying and mapping.*

# En majesté à la BnF les globes du Roi-Soleil

■ Jack BIQUAND

*En 1680, Vincenzo Coronelli, vénitien, géographe et fabricant de globes, rencontre le cardinal César d'Estrées, ambassadeur du roi Louis XIV à Rome, pour une commande de deux globes, un Céleste et un terrestre, en vue de l'offrir au roi, image de sa gloire divine et de sa mission terrestre. Les globes seront réalisés à Paris entre 1681 et 1683, les plus grands construits jusqu'alors. Superbes pièces, objet de science, emblèmes du pouvoir et symboles de la conquête du monde, les globes, qu'on appellera désormais "de Coronelli", offrent une représentation complète et synthétique de la Terre et du Ciel, appuyée sur un savoir encyclopédique et un répertoire des curiosités du temps. Ces deux sphères sont conçues et construites au moment où les travaux de l'Académie des Sciences, créée par Colbert en 1666, font progresser l'astronomie et la géographie. Le "terrestre" met magnifiquement en scène les connaissances alors diffusées sur le monde, le "céleste", peint et enluminé, entre autres, par le peintre Jean-Baptiste Corneille, est marqué par le culte du monarque puisqu'il représente l'état des constellations célestes à la naissance de Louis XIV, le 5 septembre 1638.*



## Qui est Coronelli ?

Né à Venise en 1650, cet enfant d'un tailleur vénitien fait des études d'astronomie, puis de théologie. Il commence des travaux de géographe et fabrique des globes dès 1678, dont deux globes manuscrits de 1,75 cm de diamètre. En 1681 il entame la construction des globes du roi, à Paris, avec des assistants dont nous ne connaissons que trois : Perronet, cartographe, Giambatista Moro, artisan, et Jean-Baptiste Corneille, peintre.



De retour à Venise, ce moine géographe fonde l'Académie des Argonautes qui va l'aider à diffuser son œuvre de géographe. En 1685 il est nommé, couronnement de sa carrière, Cosmographe de la Sérénissime République de Venise et publie une série de cartes qui servent à illustrer les volumes de l'*Atlante Veneto*, le *Corso geographico* et l'*Isolario*. Et, par un privilège de Louis XIV il obtient l'autorisation de publier ses travaux en France. En 1701 il publie le premier volume de son grand dictionnaire la *Bibliotheca Universale*. En 1708, en pleine difficulté avec le pouvoir pontifical qui le trouve trop libre avec les idées religieuses permises, il projette de construire des globes quatre fois plus grands que ceux de Louis XIV, mais abandonne, faute de moyens. Il meurt dix ans plus tard, en 1718, vendant cartes et globes jusqu'à la fin de sa vie.

## Les globes, objet d'art et de science

Coronelli se définissait "plus mécanicien que géographe". Effectivement, ses globes étaient des machines. Il dit des globes de Louis XIV "*la matière en laquelle ils sont fabriqués est quelque chose de solide de telle sorte que chacun d'entre eux a la capacité de soutenir le poids d'une trentaine d'hommes*". La structure est constituée par des morceaux de bois cintrés taillés en fuseaux de trois mètres de long. Chaque globe est un assemblage de deux hémisphères, chacun



■■■ constitué de fuseaux qui partent de l'équateur et se rejoignent aux pôles, quatre mètres de diamètre !

En vue de réaliser les opérations proprement géographiques, un important travail préparatoire, particulièrement pour le terrestre, a permis de maîtriser l'abondante documentation réunie. Elle se composait de textes et d'images que Coronelli avait collectés au cours de ses lectures mais sans doute aussi, pour les allégories et certains cartouches, de nombreuses esquisses préparatoires réalisées par des peintres. Il convenait donc d'agencer cette documentation sur le globe en jouant avec les blancs de la carte. Pour les zones disposant d'amples informations cartographiques le tracé était simple, mais là où les connaissances étaient moins précises, la décoration comblait les lacunes et, par exemple, l'énorme cartouche décoratif sur le Nil est excentré à droite pour recouvrir une zone inconnue.

Un travail similaire fut accompli sur le céleste. Le dessin et l'exécution des figures furent réalisés, Coronelli le précise, par Jean-Baptiste Corneille et d'autres artistes peintres. Une fois la peinture achevée, des bossettes de bronze de différentes tailles ont été ajoutées pour représenter les corps célestes selon leur grandeur conformément à la classification copernicienne. Un tableau en donne la légende pour les 1 880 étoiles figurées sur le globe.

Le globe céleste présente deux particularités remarquables. Il s'agit d'un globe convexe, le ciel est représenté conformément à la vision d'un observateur placé à l'extérieur de la voûte céleste. Mais, les constellations gardent les formes perçues depuis la Terre. Quatre langues désignent les constellations, chose unique, le français, le latin, le grec et l'arabe, et, pour la forme arabe, Coronelli n'a pas recopié simplement les globes antérieurs mais a utilisé les travaux récents de l'époque sur les sources originales.

## L'orbite indécise de nos deux planètes sur le territoire

Dès leur achèvement, les deux grosses boules vont être SDF ! Comme des boules de billard, elles vont errer de cachettes en vitrines provisoires. Elles commencent par vingt ans d'enfermement dans des caisses à l'hôtel de Lionne, résidence parisienne du cardinal d'Estrées. En 1703, on les transporte à Marly pour les exposer, elles vont y acquérir leur appellation courante de "globes de Marly", avant d'habiter le Louvre en 1715. Alors que les globes sont arrivés en 1722 à la Bibliothèque Royale, ce n'est qu'en 1731 qu'un salon leur est offert, construit par Robert de Cotte, mais ils n'y seront exposés qu'en 1782, et seront la pièce maîtresse en 1875 de l'exposition de la BN sur la géographie.

En 1914, on les emprisonne, pour les protéger, à l'Orangerie de Versailles où ils vont sommeiller dans le silence jusqu'en 1980, nantis de plusieurs projets avortés d'exposition au public. À cette date, ils subissent un toilettage et une mini-restauration exécutés par une équipe de cartographes de l'Institut



BnF, Département des Cartes et plans, GE A 500 RES

**La dédicace au Roi-Soleil : le texte de la dédicace de César d'Estrées à Louis XIV est accompagné de dix allégories représentant la Géographie – qui a une place prépondérante –, la Navigation, l'Astronomie, l'Histoire, le Temps, l'Éloquence et la Poésie, la Géométrie, la Sculpture et la Musique.**

Géographique National dirigée par Michel Morel, bien connu pour ses travaux en la matière, et une présentation a lieu au Centre Beaubourg lors de l'exposition *Cartes et Figures de la Terre*, avant qu'une longue attente de projets nouveaux les fasse héberger à la halle aux moutons de la Villette, puis à la Cité des Sciences, où ils seront les stars d'une campagne photographique, d'un film tourné pour ARTE, et d'un CD-Rom édité par la BnF.

Brève liberté provisoire et permission de sortie de quinze jours en 2005 pour être exposé au Grand Palais, puis transfert prestigieux dans le hall Ouest du site François Mitterrand de la BnF.

## Visite médicale : bon pour le service

Quand on a plus de deux siècles d'histoire dans sa besace, il faut vérifier si quelques rides ont profité de l'occasion. Auscultations, analyses, radios. Depuis 1965, l'atelier des Cartes et plans de la BN est spécialisé dans la restauration des œuvres de grands formats. La position et l'accessibilité des globes ont permis aux équipes du Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France (CRRMF) de réaliser radios et photos. 288 fichiers en trois rayonnements, visible, infrarouge et fluorescence UV, en tout 1 728 fichiers. Les analyses sur prélèvements ont permis une remise en état au cours de l'été 2006, une restauration plus importante n'étant pas indispensable pour l'instant.



Le Soleil, doré, coulisse sur l'écliptique pour être placé, selon les saisons, dans les constellations du zodiaque qu'il traverse.

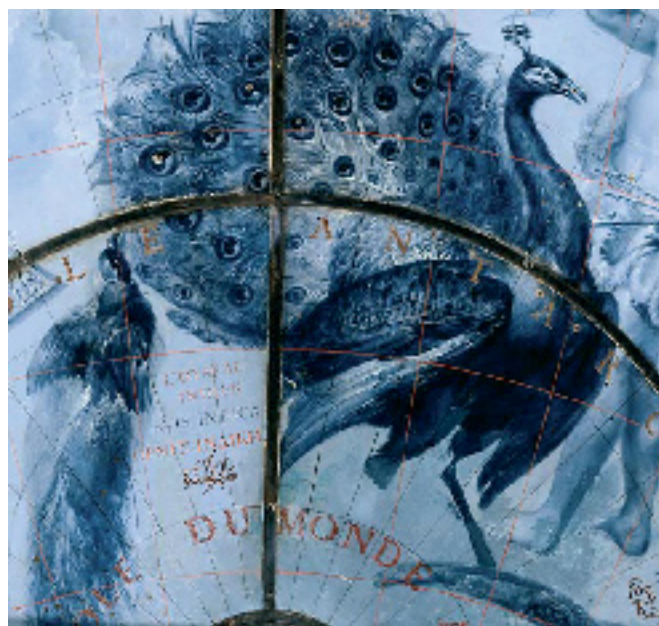
## Le terme du voyage ? Un écrin pour chef-d'œuvre

Depuis leur création en 1683 jusqu'à cette installation dans le hall des globes de la BnF, ces gigantesques sphères n'ont cessé d'être déplacées, démontées, mises en caisses, cachées, réparées, remontées. Peu visibles, finalement, au cours du XX<sup>e</sup> siècle, ils sont aujourd'hui définitivement installés au sein du hall des globes, un espace d'exposition permanent en libre accès, grâce à un partenariat avec l'Observatoire de l'Espace du CNES, et au mécénat de "Natexis Banques Populaires" (Patrimoines d'hier, trésors d'aujourd'hui). Ces globes sont les plus grandes pièces des collections cartographiques de la Bibliothèque Nationale de France.

Ce voyage des globes de Coronelli s'achève avec l'ouverture au public d'un nouveau lieu d'exposition à leur mesure. L'objectif de cet espace permanent est d'installer les globes en majesté tout en les inscrivant dans la connaissance d'aujourd'hui.

Cet espace d'approfondissement aborde, par des textes, des documents audiovisuels et multimédias, l'histoire des globes, leur fabrication, leur restauration, la représentation du ciel et de la Terre, les enjeux de la cartographie. Une salle de projection propose une programmation audiovisuelle régulière et peut accueillir des conférences et animations diverses évolutives.

L'architecte Jean-Jacques Bravo, pionnier de la scénographie d'exposition, complice de Jacques Lichnerowicz, fort d'une première expérience au Centre Georges Pompidou à travers de grandes expositions (Paris-Berlin et Paris-Paris), puis à la Cité des Sciences et, plus récemment, à la Cité de la Musique avec l'exposition Jimmy Hendrix, a été choisi pour l'aménagement du Hall des globes. L'architecte a pris le parti d'une scénographie épurée. Les deux globes, légèrement décalés, posés sur une moquette cerise reposent dans un écrin théâtral ceinturé d'un rideau de velours rouge, le plafond en noir, l'ensemble évoquant l'infini, la Voie Lactée.



Détail du globe céleste de Coronelli : l'oiseau indien

## Autour de la Terre et du Ciel, en orbite circulaire

Le Hall des globes ne sera pas un sarcophage pour les sphères de Marly, mais un lieu d'animations, de pédagogie voire de spectacle. Il aura vocation à susciter des réflexions autour du domaine de l'espace, diffusant les connaissances liées au domaine spatial, grâce au partenariat avec l'Observatoire de l'Espace du CNES.

L'observation globale et répétitive de la Terre depuis l'espace a renouvelé les représentations cartographiques de la planète, il s'agit de faire partager au public la vision contemporaine du monde qui s'est construite à partir des missions spatiales et des découvertes qu'elles ont permis.

Installés sur leur trône, ces résumés du savoir de leur époque, président en majesté les savoirs d'aujourd'hui dans leurs évolutions. Mission accomplie ! ●

## Pour aller plus loin

[www.exposition.bnf.fr/cartes](http://www.exposition.bnf.fr/cartes)

[www.bnf.fr/pages/presse/dossiers/coronelli.pdf](http://www.bnf.fr/pages/presse/dossiers/coronelli.pdf)

Le site des "globes du Roi-Soleil" prend place dans une nouvelle galerie d'expositions virtuelles qui offre un accès thématique et des pistes pédagogiques.

[www.cnes-observatoire.net](http://www.cnes-observatoire.net)

[sophie.lefevre@culture.gouv.fr](mailto:sophie.lefevre@culture.gouv.fr)

La mission de la communication du Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France (C2RMF).

[www.arte.tv/ddc](http://www.arte.tv/ddc)

"Le dessous des cartes", magazine géopolitique ARTE diffusé chaque mercredi à 22h30.

Les globes de Coronelli par Hélène Richard (voir p. 70)



# Yvaral à Aix :

■ Jean-Pierre MAILLARD

*Aix-en-Provence est dominée par la montagne Sainte-Victoire et son peintre, Paul Cézanne, les deux étant indissociablement liés. En effet l'artiste n'a eu de cesse d'admirer, sans se lasser, la hauteur rocheuse dans le paysage et, par son génie de la construction, de révéler la beauté de ses couleurs changeantes sur la toile. Comme Paul Cézanne le disait lui-même, il traite la nature par le cylindre et le cône et, en cela, il apparaît comme le premier précurseur de l'art géométrique.*

**P**lusieurs décennies plus tard, dans une sorte de prolongement spirituel, un autre créateur, Victor Vasarely ayant atteint la renommée internationale choisissait Aix-en-Provence pour fixer une fondation qui portera son nom, précisément au lieu-dit "Jas de Bouffan", là même où Paul Cézanne a vécu.

### La Fondation Vasarely

La fondation, privée et reconnue d'utilité publique, a été créée en 1976 pour promouvoir l'intégration de l'art dans l'architecture et, au-delà, l'élaboration de la "cité polychrome du bonheur" chère à Victor Vasarely. C'est pour lui une façon de répondre au douloureux constat qu'il faisait : *"Deux grandes forces régissent l'existence : la force du renouveau et celle de la conservation. Le monde va du passé au futur, l'individu du futur au passé... c'est sa tragédie"*. Il y voyait un lieu tourné vers l'avenir, les nouvelles technologies, les sciences, l'informatique... et le concevait comme un centre expérimental de recherche. L'intégration des arts plastiques dans l'architecture, la popularisation de la culture et la diffusion de la plasticité grâce à la production en série d'œuvres d'art se voulaient un acte de générosité envers la communauté. Son approche pluridisciplinaire de la construction le portait à la conviction que la conception d'un bâtiment et celle de son décor doivent être concomitantes. Par ce moyen il pensait sortir les habitants de la grisaille en leur offrant

de la couleur par l'intégration plastique. Il résume sa profession de foi comme suit : *"la beauté plastique de la cité (est) un facteur aussi indispensable de la santé de l'homme que l'oxygène, les vitamines ou l'amour"*.

A ce moment-là Aix-en-Provence était en pleine expansion et le bâtiment projeté a pu s'inscrire dans le développement urbain d'alors, en phase avec la préoccupation de Victor Vasarely, préoccupation qu'il définissait comme un "techno art social". Dans cet esprit il confiait la charge de la réalisation aux architectes des Monuments historiques Jean Sonnier et Dominique Ronsseray. En prise directe avec leur temps sur l'indication de l'artiste ils ont retenu l'hexagone comme module de base et eu recours à la préfabrication de tous les éléments de la structure modulaire en béton. Les travaux de construction débutent en 1973 par l'implantation des seize premiers hexagones de 14 m de largeur entre côtés opposés. Le bâtiment n'appartient à aucun courant architectural même si l'intégration du design technologique le date à coup sûr. Sur toute sa hauteur la façade est

traitée comme une sculpture lumineuse cinématique monumentale par une alternance binaire de cercles et de carrés noirs et blancs. L'animation des murs rideaux par le jeu optique préfigure celle que le visiteur découvrira une fois les portes franchies. Au rez-de-chaussée sept alvéoles, d'une hauteur de 11 m, sont réservées aux quarante-deux intégrations architectoniques du maître. Dans cet espace, le visiteur se déplace dans un univers saturé de couleurs et l'impression du déplacement des formes qui les contiennent. La visite continue à l'étage qui accueille le Centre d'art optique consacré aux recherches d'Yvaral.

### Instabilité

Au premier étage on découvre l'œuvre maîtresse d'Yvaral dénommée *Instabilité*, créée en 1962, qui est le développement d'une structure moirée. Il s'agit d'un relief réalisé en fils vinyliques noir et blanc. Une forme polyédrique de base est inscrite en profondeur sur les réseaux échelonnés. Le déplacement du spectateur provoque des recouvrements successifs qui modifient ou détruisent l'image perçue. Ainsi il n'y a plus une seule œuvre à regarder, mais autant d'œuvres que de points de vue.

*Instabilité* intègre la lumière, le mouvement et la mise en relation des différentes surfaces et matériaux. En les superposant, Yvaral a bien obtenu une



© J-P Maillard

# "Ostinato rigore"<sup>(1)</sup>

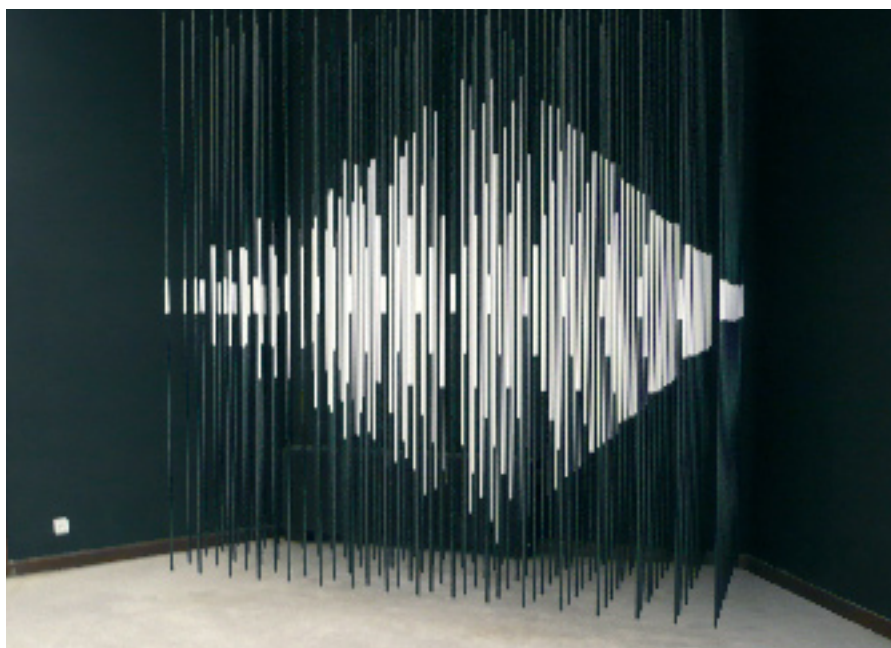
image changeante, aux vibrations rapides et aux effets spectaculaires. L'envie de bouger conduit à la dynamique du regard et ce dernier n'est plus seulement receveur, il devient acteur.

## Yvaral

Jean-Pierre Vasarely, fils de Victor Vasarely et de Klara Spinner, également peintre, est né en 1934 à Paris.

Pour se différencier de la notoriété de son père, il a choisi très tôt un pseudonyme, Yves Aral, une anagramme de son patronyme pour garder de cette façon sa filiation, nom qu'il cristallise rapidement en Yvaral. Il a suivi des études à l'Ecole des arts appliqués de Paris où il se spécialise en publicité et graphisme. Dès 1954 il entreprend des recherches sur l'activation optique par une analyse systématique du fonctionnement de la perception visuelle. A partir de 1959, il réalise, dans les traces de son père, les premières accélérations optiques en noir et blanc jusqu'à exploiter l'effet moiré en superposant des fils vinyliques sur trame et des réseaux de même couleur échelonnés en profondeur comme dans la réalisation "Instabilité". Entre-temps, en 1960 il cofonde le Centre de recherche d'art visuel (GRAV). La prise de position du groupe composé de neuf artistes est catégorique : *"Nous aimerions simplement retirer de notre vocabulaire le mot art en tout ce qu'il représente actuellement. Nous préférons considérer le phénomène artistique en tant qu'expérience strictement visuelle située sur le plan d'une perception physiologique et non émotive. Nos expériences peuvent avoir encore une apparence traditionnelle – peinture, sculpture, reliefs – pourtant nous ne plaçons pas la réalité plastique dans la réalisation ou dans l'émotion mais dans la relation constante existant entre l'objet plastique et l'œil humain"*.

Il restera fidèle à son engagement jus-



© J.-P. Maillard

qu'à sa mort en 2002 avec, comme Léonard de Vinci, l'obstination de la rigueur. A titre d'exemple au sujet de ses séries "Structures cubiques" et "Horizons structurés" sa femme, Michèle Vasarely, confirme en ces termes : *"Yvaral construit avec méthode, rigueur et créativité, des collections de formes élémentaires et de couleurs précises, qui sont modulables, combinables et qu'il associe ou permute sur des schémas de répartition abstraits. Lorsqu'à partir de 1975 il utilise des images numérisées (visages, paysages, monuments) c'est comme schéma de répartition de ses modules élémentaires combinables ou de ses gammes de couleur étalonnées ; Yvaral ne cherche pas, à travers ses portraits digitalisés, à exprimer une personnalité ou un caractère, ni même à rendre hommage au personnage représenté. (In fine)... Yvaral choisit de décliner le portrait de La Joconde puis le visage de Marilyn Monroe, aisément identifiables par le grand public parce que puisés dans la conscience collective."*

La plus remarquable de ses intégrations architecturales reste la façade de l'im-

meuble de la station de radio RTL qu'il a traitée en 1971 en collaboration avec son père. De même c'est le logotype Renault qui restera la plus connue de ses créations graphiques publicitaires. Yvaral a également participé à la création des décors et des effets spéciaux du film "La prisonnière" de H.-G. Clouzot pour lequel il a aidé le réalisateur à reconstituer le climat de l'art cinétique de l'époque.

Après avoir constaté qu'Yvaral aura mobilisé l'essentiel de son temps de travail dans sa recherche sur la théorie des nombres au travers de la numérisation des images, manuellement puis, le moment venu, à l'aide de l'informatique, il convient de laisser la conclusion à Abraham Moses : *"c'est peut-être dans l'art géométrique et son prolongement l'art numérique que la distance entre la science et l'art est la plus faible, et que leur communauté d'attitude et d'action est la plus grande"*. ●

► Pour tout renseignement : [www.fondationvasarely.fr](http://www.fondationvasarely.fr)

(1) "Obstination de la rigueur" (Léonard de Vinci)



■ par Raymond D'HOLLANDER

Sur la terre supposée sphérique de rayon  $R$  tel que  $2R = 40\,000$  km, on considère deux points  $A$  et  $B$  situés à la même latitude  $\varphi$ , mais dont les longitudes diffèrent de  $180^\circ$ .

- 1 - Quelle est l'orthodromie  $\widehat{AB}$  (plus courte distance entre  $A$  et  $B$ ). Evaluer sa longueur  $s_0$  en fonction de  $\varphi$  et de  $R$ .
- 2 - Quelle est la loxodromie  $\widehat{AB}$  (courbe coupant les méridiens sous un angle constant). Evaluer sa longueur  $s_l$  en fonction de  $\varphi$  et de  $R$ .
- 3 - Pour quelle valeur  $\varphi_m$  de  $\varphi$  la différence  $s_l - s_0$  est-elle maximale ? Pour cette valeur de  $\varphi_m$  évaluer en km les longueurs de l'orthodromie et de la loxodromie considérées, ainsi que la différence :  $s_l - s_0$ .
- 4 - Evaluer la différence  $s_l - s_0$  pour  $\varphi = 45^\circ$ .

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

## **Olivier Reis**

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

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

## **Reinhart Stölzel**

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

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

## **Paul Newby**

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

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

***Des topographes traducteurs à votre service***

■ par Raymond D'HOLLANDER

1 - On peut écrire  $\frac{\sin x - \sin y}{\cos x + \cos y} = \frac{2 \cos \frac{x+y}{2} \sin \frac{x-y}{2}}{2 \cos \frac{x+y}{2} \cos \frac{x-y}{2}}$ , d'où : (1)  $\tan \frac{x-y}{2} = \frac{\sin x - \sin y}{\cos x + \cos y}$  cqfd

2 - En posant  $x = \frac{A+B}{2}$  et  $y = \frac{\pi - C}{2}$ , il vient :  $\tan \frac{x-y}{2} = \tan \frac{A+B+C-\pi}{4}$  En remplaçant

$\tan \frac{x-y}{2}$  par sa valeur tirée de (1) on obtient : (2)  $\tan \frac{A+B+C-\pi}{4} = \frac{\sin \frac{A+B}{2} - \cos \frac{C}{2}}{\cos \frac{A+B}{2} + \sin \frac{C}{2}}$  cqfd

3 - En remplaçant dans la formule (2) :  $A+B+C=\pi$  par sa valeur  $\pi$ ,  $\sin \frac{A+B}{2}$  et  $\cos \frac{A+B}{2}$  par leurs valeurs données par les formules de Delambre, en multipliant haut et bas

par  $\cos \frac{C}{2}$ , on a : (3)  $\tan \frac{\pi}{4} = \frac{\cos \frac{a}{2} \cos \frac{b}{2} \cos \frac{c}{2}}{\cos \frac{a+b}{2} + \cos \frac{c}{2}} \times \cot \frac{C}{2}$  Effectuons haut et bas la somme et la

différence des cosinus  $\tan \frac{\pi}{4} = \frac{2 \sin \frac{a+b+c}{4} \sin \frac{a-b+c}{4}}{2 \cos \frac{a+b+c}{4} \cos \frac{a-b+c}{4}} \times \cot \frac{C}{2}$  En remplaçant  $\cot \frac{C}{2}$  par sa valeur tirée

de la 3<sup>e</sup> formule de Borda :  $\cot \frac{C}{2} = \frac{\sin p \sin(p-c)}{\sin(p-a) \sin(p-b)}$ , et en posant  $a+b+c = 2p$ , il vient :

(4)  $\tan \frac{\pi}{4} = \frac{\sin \frac{p-a}{2} \sin \frac{p-b}{2}}{\cos \frac{p-a}{2} \cos \frac{p-b}{2}} \times \frac{\sin p \sin(p-c)}{\sin(p-a) \sin(p-b)}$  Transformons sous le radical les sinus en fonction des sinus et cosinus des angles moitiés :

$\left\{ \frac{\sin \frac{p}{2} \cos \frac{p}{2} \sin \frac{p-c}{2} \cos \frac{p-c}{2}}{\sin \frac{p-a}{2} \cos \frac{p-a}{2} \sin \frac{p-b}{2} \cos \frac{p-b}{2}} \right\}$  En remplaçant cette valeur du radical dans (4) et en effectuant, il vient : (5)  $\tan \frac{\pi}{4} = \sqrt{\tan \frac{p}{2} \tan \frac{p-a}{2} \tan \frac{p-b}{2} \tan \frac{p-c}{2}}$  cqfd

En désignant maintenant les longueurs des côtés par  $a, b, c$ , exprimés en km, les valeurs précédentes de  $a, b, c, p$  radians deviennent  $\frac{a}{R}, \frac{b}{R}, \frac{c}{R}, \frac{p}{R}$  et la formule (5) s'écrit :

$\tan \frac{\pi}{4} = \sqrt{\tan \frac{p}{2R} \tan \frac{p-a}{2R} \tan \frac{p-b}{2R} \tan \frac{p-c}{2R}}$  On sait que  $\tan 12^\circ \approx 12 + \frac{12^3}{3}$ . En se limitant aux termes

de 1<sup>er</sup> ordre on a : (6)  $\frac{\pi}{4} = \sqrt{\frac{p}{2R} \frac{p-a}{2R} \frac{p-b}{2R} \frac{p-c}{2R}}$  Les quantités  $\frac{p}{2R}, \frac{p-a}{2R}, \dots$  sont du 1<sup>er</sup> ordre

de petitesse, leur produit est du 4<sup>e</sup> ordre de petitesse et leur racine carrée du 2<sup>e</sup> ordre de petitesse, cqfd. On tire aisément de la formule (6) : (7)  $\pi = \frac{1}{R^2} \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)}$

5 - La quantité  $\sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)}$  n'est autre que l'aire du triangle rectiligne de côtés  $a, b, c$  désigné par  $T'$  d'où :  $\pi = \frac{T'}{R^2}$  cqfd.

6 - Si  $a = b = c = 31,83$  km  $2p = 95,49$  km,  $p = 47,745$  km,  $R = 6366$  km

$p-a = p-b = p-c = 15,915$  km. On a donc d'après la formule (7) :

$\pi = \frac{47,745 \times 15,915^3}{6366^2}$  et en décimilligons :  $\pi_{dm} = \frac{47,745 \times 2 \times 10^3}{\pi}$  On trouve  $\pi = 6,89$  dmgon.



# Chassé-croisé frisquet... Du nord au sud et du sud au nord

■ François BODIN

*Lorsqu'il y a deux ans le responsable de la mission archéologique des Terres Australes et Antarctiques Françaises avait demandé à GSF une liste de topographes susceptibles de participer à une de leur mission, nous leur avons transmis une vingtaine de curriculum vitae de volontaires. Cette année-là la mission n'eut pas de suite. Utilisant directement cette liste, Paul Courbon, membre actif de l'association et bien connu des lecteurs de la revue, a été choisi pour participer en tant que topographe à la mission de l'hiver 2006-2007, chargée d'étudier l'occupation humaine de ces îles et d'en préserver les vestiges les plus significatifs.*

**A**près un mois passé à Crozet, le programme conduisait la mission à Kerguelen, dans la Baie de l'Observatoire où elle devait étudier et fouiller un site occupé en 1874 par les Britanniques pour observer le passage de Vénus devant le soleil, puis de 1901 à 1903 par une expédition scientifique allemande et enfin en 1912 par deux Français qui voulaient y introduire l'élevage du mouton. Un archéologue allemand et une archéologue australienne complétaient l'équipe des quatre Français. Dans la relation de sa mission Paul nous fait part de ses moments forts : *"Emotion de dégager les fondations d'une maison recouvertes par la terre et l'herbe et d'en reconstituer la charpente à partir des quelques pièces intactes retrouvées. Emotion de retrouver des objets anciens, des bouteilles de schnaps encore pleines et d'imaginer la*



Les pierres de passage (transit stones), d'un poids de 400 kg, elles reposaient sur une dalle en béton et étaient orientées rigoureusement est-ouest pour que l'axe de la lunette posée dessus puisse faire des observations du passage de la lune au méridien. C'était la méthode employée en 1874 pour déterminer la position astronomique.



Paul au travail pendant l'été austral.

*vie de ceux qui nous avaient précédés, plus d'un siècle auparavant, dans des conditions plus dures qu'aujourd'hui". C'est un parcours inverse qu'effectue Elysé Randriamalazarivo, arrivé en France fin mars pour y effectuer son travail de fin d'étude sur le thème du foncier, activité appelée à un très grand essor dans son pays dans les années à venir, la sécurisation foncière devenant une priorité. Grâce aux amis et membres de GSF il pourra découvrir les méthodes et matériels utilisés ici, approcher l'orthophotographie qui sert de base à l'établissement de fond de plan dans les provinces malgaches qui ne disposent pas de cartographie et rencontrer des acteurs français participant à ces vastes opérations de base, qui ne sont pas sans rappeler, en version XXI<sup>e</sup> siècle, ce que Napoléon décréta au début du XIX<sup>e</sup> en dotant notre pays de son système cadastral... ●*



L'art de mesurer sans pénétrer par effraction...