

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

ADS40



ACTUALITÉ

***Dans l'Agglomération Lyonnaise...
Le nouveau tramway est arrivé !***

Directeur de la publication Rédacteur en chef

André Bailly
Ingénieur Géomètre ETP

Rédaction et administration AFT

136 bis rue de Grenelle 75700 Paris 07 SP
Tél. : 01 43 98 84 80
Fax : 01 47 53 07 10
E-mail : aftopo@club-internet.fr
Site internet :
<http://perso.club-internet.fr/aftopo>
secrétariat : tous les jours de 9 h à 12 h et de 14 h à 17 h

Publicité

Robert Chevalier

Comité de Rédaction

Jean Bourgoin
Ingénieur Général Hydrographe ER
Robert Chevalier
Géomètre-Expert DPLG
Pierre Grussenmeyer
Maître de Conférence – ENSAIS
Raymond d'Hollander
Ingénieur Général Géographe – IGN
Jacques Riffault
Directeur Commercial
Michel Sautreau
Directeur Div honoraire Cadastre
Robert Vincent
Ingénieur ECP
Dr Pascal Willis
Ingénieur en chef Géographe – IGN

Conception et maquette

Dorothée Picard

Abonnements

Evelyne Mesnis

Autre publication

L'annuaire de l'AFT

IMPRIMERIE MODERNE USHA

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

Dépot légal

1^{er} trimestre 2001 **ISSN** 0290-9057

Tirage de ce numéro : 2 500 ex

Abonnement annuel

France Europe (voir terrestre) : 480 F / 73 €
Étranger (avion, frais compris) : 500 F / 76 €
Les règlements payés par chèques payables sur une baque située hors de France doivent être majorés de 40 F / 10 €
le numéro 130 F / 20 €
Le bulletin d'adhésion est en page 64

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

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

Membre de la FIG (Fédération Internationale des Géomètres)

136 bis rue de Grenelle - 75700 Paris 07 SP - Tél. : 01 43 98 84 80 – Fax : 01 47 53 07 10

E-mail : aftopo@club-internet.fr • **Site internet** : <http://perso.club-internet.fr/aftopo>

Février 2001 • 1^{er} trimestre

Editorial 7

Info-Topo

Les informations de la profession 9

GPS

Surveillance d'affaissements miniers par trajectographie GPS, Roncourt année 2000

C. Romieu (IGN), T. Person (IGN) 18

Actualité

Dans l'Agglomération Lyonnaise...
Le nouveau tramway est arrivé !

Dominique Vinot 22

Photogrammétrie

L'ADS40 de LH Systems ou la photogrammétrie en Tout Numérique
P. Fricker, S. Walker, R. Sandau

Traduction et adaptation de LH Systems EURL France 24

Photogrammétrie



Orthophotographie cylindrique développement et application au château fort de Blandy-les-Tours

Bertrand Chazaly 27

Technologies nouvelles

FLI-MAP® Système d'imagerie géographique hélicoptère pour une nouvelle cartographie en 3 D

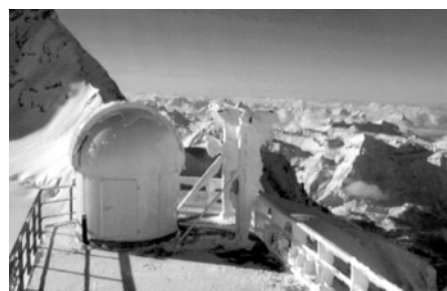
Richard Damiano, Pierre Balestrini 32

Solution informatique

Des courbes et des lignes

Claude Million 37

GPS



Extension de l'infrastructure

GPS en Suisse 44

Art et Géométrie

Sol Lewitt à Noisiel

Jean-Pierre Maillard 46

Topo-vécue

La Nouvelle Carte Michelin de Thaïlande

Stéphane HOPP 49

GSF

François Bodin 53

Géodésie

Comment faire un traitement Géodésique des mesures GPS

André Fontaine 54

GPS

La modernisation de GPS

Claude Million 56

Actualité

- Gros succès pour la réunion organisée par l'AIVF et l'APCIG, le SPDG

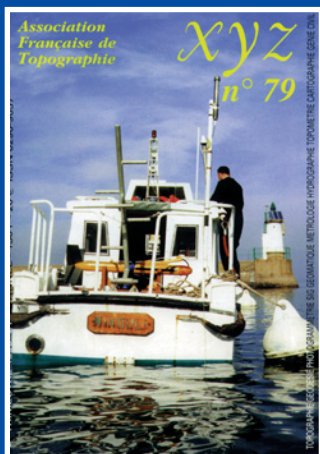
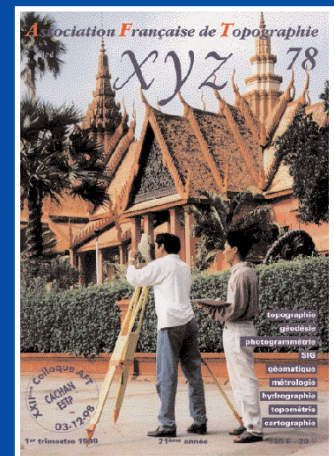
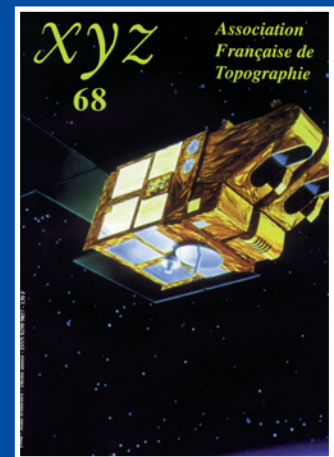
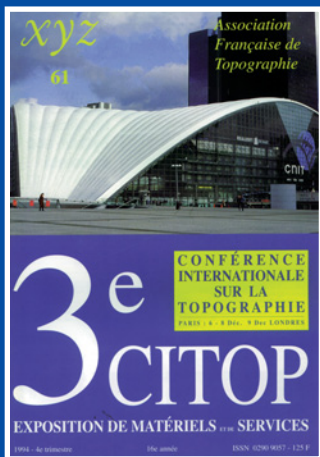
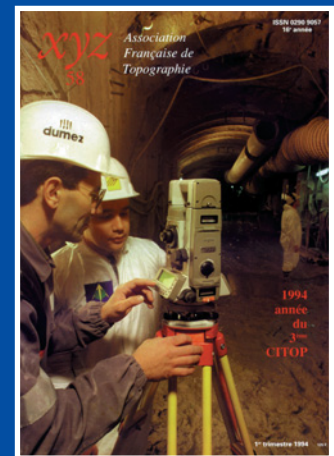
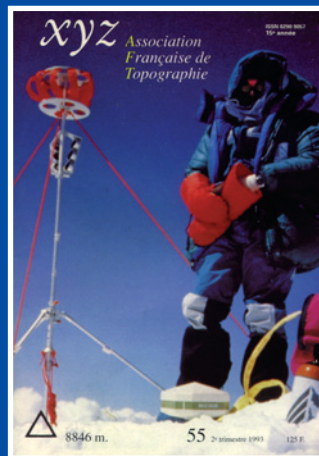
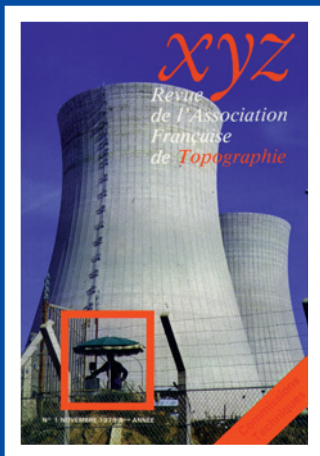
- Risque et Génie Civil 59

Les livres

..... 60

Pour la recherche de nos annonceurs consulter la page 55.

En couverture : le nouveau tramway de Lyon.



On tourne la page

An 2001,

Les dates clés incitent à de nouveaux départs. Ainsi en est-il pour le XYZ du nouveau millénaire qui mûrit au sein de l'AFT, fier de ses 85 numéros. Avant qu'il ne quitte cet habit du XX^e siècle, qui a fait notre image pendant des années, pour revêtir le costume du III millénaire, je veux dire ma gratitude à ceux qui y ont œuvré et qui en ont fait la vitrine active et colorée de notre association.

Merci à Robert Chevalier, directeur de la rédaction, qui su convaincre les meilleurs de se servir de XYZ pour transmettre leur expérience et leur savoir, et qui a établi un réseau national et international de correspondants pour que les professionnels parlent aux professionnels. Sa présence dans les réunions, les congrès et les Colloques du métier, son souci de recueillir toujours ce qui peut apporter un plus à la profession, en ont fait le pilier de cette revue maintenant bien connu du monde topographique.

Merci également à Jack Biquand pour sa mise en page, ses maquettes et sa plume qui orne souvent nos pages de sa littérature, C'est avec beaucoup de plaisir que j'ai travaillé avec eux, et J'espère bénéficier encore longtemps de leur aide et de leur présence aux côtés d'une nouvelle équipe qui se forme avec une nouvelle organisation des tâches et du travail. Nous continuerons ce que j'ai toujours poursuivi, faire connaître, décrire, défendre et relier les membres du métier, en France et dans le monde.

Il y a notre pays, il y a l'Europe, il y a la mondialisation, et notre profession est mêlée à ce mouvement impétueux qui entraîne les hommes dans un brassage jamais vu des sciences, des techniques et des idées. À nous de prendre à bras le corps ce qui nous concerne en tant que professionnels. Faisons le avec disponibilité, sérénité et clairvoyance.

C'est mon souhait pour le XYZ nouveau.

André Bailly

XYZ nouveau est arrivé

Une revue à la présentation nouvelle, où nous voulons changer de vitrine avec une nouvelle équipe. Je veux lui souhaiter bonne Chance pour ces numéros qui me verront spectateur et non plus acteur. Je veux dire à cette revue nouvelle combien l'esprit offensif lui sera nécessaire. Les articles, les informations techniques, les nouvelles, les politiques de la profession et le suivi, sont comme les poissons dans la mer : ils resteront entre eux si vous n'allez pas les chercher à l'hameçon et au filet en pleine mer, rares sont les salmonidés et les cétagés qui viennent d'eux-mêmes s'offrir à la poêle du cuisinier. On ne dira jamais assez que le contenu d'XYZ est l'affaire de tous. Il faut que chaque adhérent, chaque abonné, chaque utilisateur, chaque constructeur, soit convaincu de monter à cette tribune quand il a quelque chose à dire, quand il veut faire connaître son expérience, son savoir, sa technique, ses produits, ce qui est le but même de ces pages grandes ouvertes pour l'information et la transmission.

C'est dire aussi que toutes les bonnes volontés pour y œuvrer sont les bienvenues. Vous savez, l'AFT et XYZ n'existent que par le travail des adhérents, que par vous. La disparition de leurs activités ne troublerait guère les vagues du monde, mais la profession et ses acteurs y gagneraient-ils ? C'est la question qu'à mon avis doivent se poser les professionnels : une association et une revue technique, lieux de rencontre de toute la profession de tous les secteurs, lieux de confrontation et de brassage, en toute indépendance, aussi un lieu de mémoire et d'histoire, un lieu pour l'avenir.

C'est avec cet état d'esprit et vers ce but que notre association et XYZ sa vitrine peuvent fonctionner et progresser sur le front entier du métier, en France et dans le monde.

Je peux vous assurer que ce n'est pas sans intérêt.

Robert Chevalier

Surveillance d'affaissements m

Roncourt, année 2000

L'image ci dessous (photo1) est assez représentative des impacts en surface de zones subissant l'influence de désordres souterrains.

Le site de Roncourt (57) fait partie des secteurs d'ores et déjà identifiés par nos interlocuteurs de la DRIRE Lorraine comme subissant l'influence de l'arrêt des exploitations minières de cette région.



photo 1

L'IGN, en l'occurrence, la Division des Travaux Spéciaux du Service de Géodésie et Nivellement, a mis en place et réalise diverses prestations dont le but est de fournir des informations topométriques en surface en relation avec ces phénomènes souterrains, entre autres :

- appareils robotisés sur Joeuf et Homécourt
- contrôle par nivellement traditionnel sur divers sites
- mise en œuvre d'une nouvelle technique de nivellement par GPS.

La diversité des zones à surveiller ainsi que leur nombre et leur étendue ont motivé la demande de nos interlocuteurs de réfléchir à un procédé :

- permettant d'effectuer une surveillance régulière et aisée à mettre en œuvre
- minimisant la monumentation
- fournissant une densité de points mesurés importante
- permettant la création d'un maillage dense de la zone surveillée
- fournissant une information de précision centimétrique.

L'option retenue a été de s'appuyer sur le réseau routier en utilisant les moyens décrits plus loin, le maillage étant réalisé par la densité du réseau, étant entendu qu'il est toujours pos-

sible de le densifier en parcourant à pied les zones trop peu déterminées.

Le système utilisé :

- se compose d'une antenne GPS fixée sur le toit d'un véhicule (photo 2) roulant à une vitesse d'environ 36 km/h (soit 10 m/s), enregistrant toutes les secondes
- doit fonctionner sur toutes les voies carrossables et ouvertes à la circulation.

Le problème principal posé par ce montage est simple : la hauteur de l'antenne par rapport au véhicule est constante, par contre ce véhicule n'a pas une hauteur constante par rapport au sol.

La solution retenue consiste à associer au support d'antenne un capteur à ultrasons (photo 3) permettant à tout moment de connaître la position de cet ensemble rigide par rapport au sol.

Plus en détail, les moyens mis en œuvre à l'heure actuelle pour la partie mobile comprennent :

- un véhicule de type «utilitaire» (en l'occurrence un Jumpy)
- un récepteur et une antenne GPS de type «Géodésique» embarqués
- un capteur à ultrason
- un ordinateur pilotant le capteur



photo 2

Partie inférieure
du capteur à ultrasons



photo 3

iniers par trajectographie GPS

C. Romieu (IGN), T. Person (IGN)

- un Data-Logger associé au capteur
- un système d'alimentation pour l'ensemble des instruments

La partie fixe associée au segment mobile comprend 2 (ou 3) récepteurs répartis uniformément sur la zone et déterminés au préalable. En termes de personnel, il est nécessaire actuellement de disposer d'un chauffeur et d'un opérateur.

À l'issue d'une série d'observations, les traitements initiaux s'organisent de la manière suivante:

- détermination des points fixes à partir de points du RBF en mode statique
- calcul de la position de l'antenne en mode «trajectographie» à partir de chacun des points
- test sur le RMS puis pondération
- intégration de la hauteur d'antenne fournie par le capteur à ultrasons

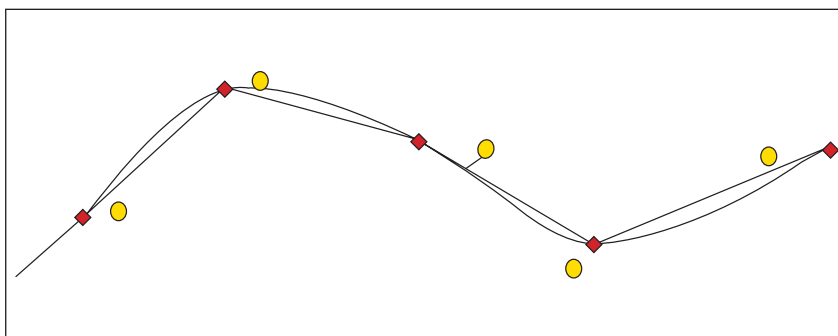
Le système tel qu'il vient d'être décrit permet d'obtenir une information utile pour bon nombre de configurations. Néanmoins, certaines questions se posent et en particulier :

- qu'en est-il de la «superposabilité» des trajectoires successives ?
- que comparer entre opérations ?

Le graphique ci contre explicite cette notion de superposabilité : il présente 3 trajectoires successives dans un plan (X, Z) et montre les différences entre les 3 passages. Un deuxième problème posé est relatif à la définition de ce que l'on doit comparer entre opérations sachant que chacune des lignes représentant une trajectoire est composée de points non identiques à chaque intervention.

Il est donc nécessaire d'effectuer des traitements complémentaires qui consistent en :

- une définition d'un objet «trajectoire» constitué d'une succession de segments en 3D
- pour chaque point de la deuxième mesure, recherche du point «virtuel» le plus proche, en planimétrie, sur la première trajectoire



- calcul de la différence de hauteur entre le point mesuré opération N et le point virtuel correspondant opération «0» ou «N-1».

Le schéma suivant explicite succinctement le problème posé lors de la comparaison de deux trajectoires.

Les premiers résultats obtenus à l'issue de tests réalisés sur l'esplanade du château de Vincennes et sur le site «réel» de Roncourt peuvent être résumés de la façon suivante :

- distances entre trajectoires : 80 % des points sont à mieux que 20 cm de la trajectoire initiale. Ces 80 %

deviennent 90 % si le chauffeur dispose d'une ligne matérialisée au sol à laquelle se référer.

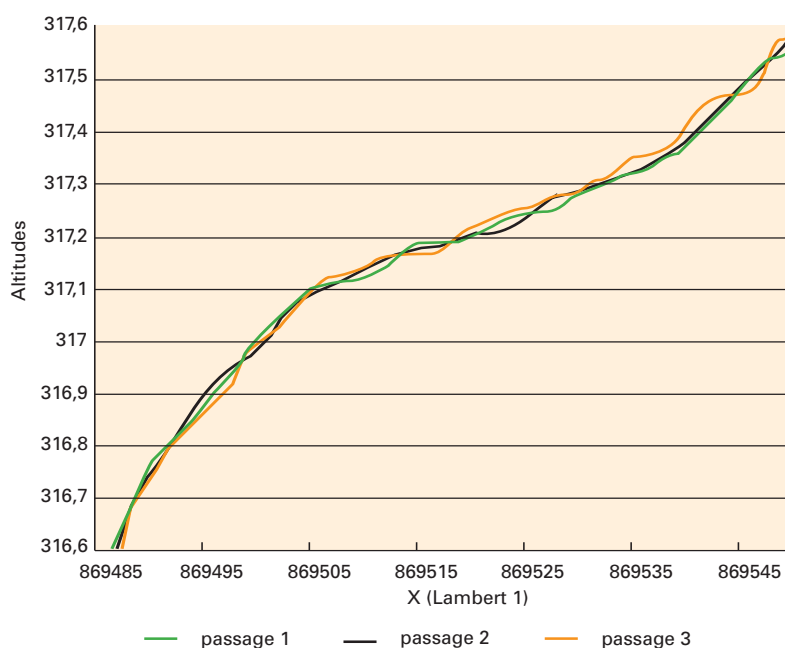
- dénivelées D, distance entre 2 trajectoires, (écart type des dénivelées obtenues en comparant les trajectoires) :

$D < 1\text{ m} : \sigma = 30 \text{ à } 35\text{ mm}$

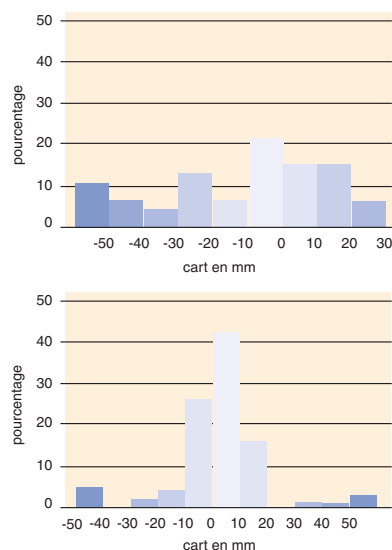
$D < 0.2\text{ m} : \sigma = 20\text{ mm}$

$D < 0.1\text{ m} : \sigma = 18\text{ mm}$

Ces valeurs générales sont à moduler selon les diverses configurations rencontrées. Par exemple, une estimation des variations des résultats a été faite relativement à la présence de masques de type arbres.



Les deux graphiques suivants présentent cette variation pour des points où $D < 0.2$ m



Les écarts types associés sont respectivement 4.2 cm et 1.5 cm pour les zones «arborées» (et en courbe) et les zones très dégagées. Néanmoins, ces chiffres sont à considérer avec précaution, l'échantillon utilisé restant somme toute assez limité.

Les problèmes actuellement identifiés, et pour lesquels différentes solutions sont à l'étude, se révèlent très divers :

- masques dans les milieux urbains ou arborés
- passage sur la même trajectoire lors des différentes interventions
- synchronisation capteur / GPS
- dérive de l'horloge PC
- réflectivité différentielle du sol
- amélioration des outils de calculs GPS

On peut d'ores et déjà tirer les conclusions suivantes au vu de ce qui a été réalisé :

- Outil performant :
au niveau technique : mieux que 2 cm en z
d'un point de vue économique : jusqu'à plusieurs dizaines de km/jour à deux personnes
- Utilisation très performante si le parcours est dégagé, peu sinueux et facilement répétable. Il est probable que, pour de telles conditions, la précision des résultats soit améliorée et approche le centimètre à un σ .

Les expériences réalisées montrent également que dans des zones à

conditions difficiles, la multiplication des passages amène une amélioration sensible en termes de précision. Néanmoins, les problèmes de masques ont des effets très importants en termes de dégradation de la précision des résultats finaux.

D'autres voies sont également à l'étude, toujours en vue de disposer d'informations fiables et les plus précises possibles. Entre autres :
utilisation de plusieurs antennes/capteurs
détermination de l'influence des phénomènes de roulis tangage du véhicule
minimisation, voire élimination, des multi-trajets
utilisation de logiciels scientifiques pour les traitements des observations.

Toutes ces améliorations possibles nous laissent espérer l'obtention de résultats proches du centimètre pour des conditions moins favorables que celles rencontrées jusqu'à présent, permettant ainsi d'utiliser un processus relativement aisé à mettre en œuvre sur des secteurs de plus grande ampleur qu'actuellement. ●

Dans l'Agglomération

Le nouveau



La rédaction d'XYZ exprime ses remerciements au Syndicat Mixte des Transports pour le Rhône et l'Agglomération Lyonnaise -SYTRAL-, ainsi qu'à la Société Lyonnaise des Transports en Commun, -SLTC-, pour leur accueil, ainsi que pour les informations et la documentation qu'ils ont aimablement mis à notre disposition en vue de la rédaction de cet article.

Dans un précédent article de XYZ, nous vous avons signalé les travaux relatifs aux deux lignes nouvelles de tramway, en cours de construction dans l'agglomération lyonnaise.

Depuis le 2 janvier de cette année, ces lignes sont servies. La deuxième agglomération de France rejoint le groupe des villes et métropoles qui ont choisi un mode de transport en commun plus respectueux de l'environnement.

Avec beaucoup d'autres usagers, nous les avons empruntées dès le premier jour, et nous avons tenu à vous en faire part. Entre temps, les actualités nationales vous en ont montré des images.

Le projet est devenu une réalité quotidienne

Après 50 mois de travaux, et alors que la dernière ligne ancienne était supprimée en janvier 1956, le tram est de



Croisement de rames sur des aires engazonnées.



Intérieur d'une rame: lumière et harmonie de couleur

Lyonnaise... tramway est arrivé !

Dominique Vinot

LE TRAMWAY C'EST...

- 2 lignes,
- 18,7 kilomètres de voies,
- 39 stations, 39 rames...
- 4 communes sont traversées, Bron, Lyon, Saint-Priest et Villeurbanne.
- 7 stations de tramway réparties sur l'ensemble des deux lignes sont connectées avec une station de métro.
- 1 centre de maintenance employant 170 personnes
- Le chantier a mobilisé 300 entreprises, 2500 personnes y ont travaillé...



Les rames CITADIS TGA d'ALSTOM. Design original et plancher bas intégral. Images du futur.

retour, il est là...

Réalisé dans un site urbain très dense et dans des délais très courts, il a imposé une méthode privilégiant organisation, coordination et concertation.

Rappelons que les deux lignes partent toutes les deux de Perrache et desservent les principaux pôles économiques, commerciaux et universitaires du Grand Lyon.

Le choix des tracés s'inscrit dans une logique de développement équilibré et solidaire de l'agglomération.

La ligne 1 rejoint le campus de La Doua, en desservant le centre de la Lyon, et notamment le quartier de la Part-Dieu. Pour vous qui voulez vous rendre à l'Agence IGN de Lyon, cette ligne vous y conduit...descendez à la station Condorcet.

La ligne 2 se dirige vers Bron et Saint-Priest, elle s'arrête actuellement à la Porte des Alpes, après avoir desservi les Universités ; une extension vers Saint-Priest sur une longueur de 5 km. pour 5 stations est prévue, avec une mise en service en 2003.

Dans une récente communication de presse au début de ce mois, la SLTC, exploitant du réseau, faisait le point sur le premier mois de fonctionnement.

Les points essentiels sont l'amélioration des vitesses et temps de parcours des lignes, l'expérience croissante des personnels conducteurs, les progrès en matière de signalisation routière.

Il reste des progrès à faire en matière de signalisation ferroviaire - feux liés aux aiguillages- et d'information des voyageurs.

Pour nous le tramway est bien entré dans les moeurs.

Dès le premier jour, l'image que donnaient les passagers de tous ages était remarquable. Et les enfants n'étaient pas les derniers séduits.

Et les topographes dans tout cela me direz-vous... Rassurez- vous, ils étaient là, du début à la fin. Que ce soit pour les déplacements de réseaux, les implantations de voies, théodolites et niveaux ont exécuté un ballet permanent comme savent le faire tous les techniciens de notre métier. Ils vous en parleront peut-être un jour prochain en évoquant également l'application du G.P.S pour le suivi des rames.

Alors, si vous traversez Lyon en voiture, pensez que vous allez partager un espace urbain réaménagé, avec ce moyen de transport moderne respectueux de l'environnement. Et si l'occasion s'en présente, garez votre voiture et... offrez vous un petit trajet en tramway. ●

L'ADS40 de LH Systems ou la photogrammétrie en Tout Numérique

*P. Fricker, S. Walker, R. Sandau / Traduction
et adaptation de LH Systems EURL France*

Le nouveau Senseur Numérique Aéroporté ADS40 de LH Systems a été présenté au XIX^e Congrès à Amsterdam en juillet 2000. Il y a eu foule sur le stand de LH Systems pour découvrir la nouveauté. LH Systems a participé à de nombreuses communications techniques et a répondu aux questions légitimes des professionnels. Plusieurs systèmes ont déjà été vendus, dont deux au Japon. LH Systems tient à souligner que le projet ADS40 a été développé en commun avec le Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (Centre Aérospatial Allemand - DLR).

L'ADS40 (Fig.1) est vraiment très différent de la caméra film RC30 bien connue de LH Systems. Le concept de balayage avec trois barrettes sur lequel repose ce nouveau

produit a été expliqué dans de nombreuses publications au cours des deux dernières années. C'est le Dr. Otto Hofmann qui l'a exposé dans les années 70 ; puis DLR l'a mis en

œuvre avec succès dans un certain nombre de systèmes d'imagerie tant spatiaux qu'aéroportés.

On a disposé sur le plan focal (Fig.2) trois barrettes linéaires CCD permettant de capturer l'information panchromatique dans les vues avant, nadirale et arrière de l'avion. Il a été démontré que ces trois vues fournissent des informations suffisantes pour permettre un processus complet de restitution photogrammétrique. Pour être plus précis sur la solution mise en œuvre avec l'ADS40, chaque senseur panchromatique est composé en fait de deux rangées linéaires de capteurs CCD de 12 000 cellules chacune, décalées d'un demi-pixel (μm 3,25). Sur le plan focal, on a aussi disposé quatre rangées supplémentaires de 12 000 cellules chacune pour acquérir l'information multispectrale.



Fig. 1. La livrée rouge et gris attrayante de l'ADS40 souligne le long logement de l'objectif ainsi que les poignées robustes pour soulever l'unité dans et hors de l'avion.

Des filtres dans les bandes spectrales panchromatiques

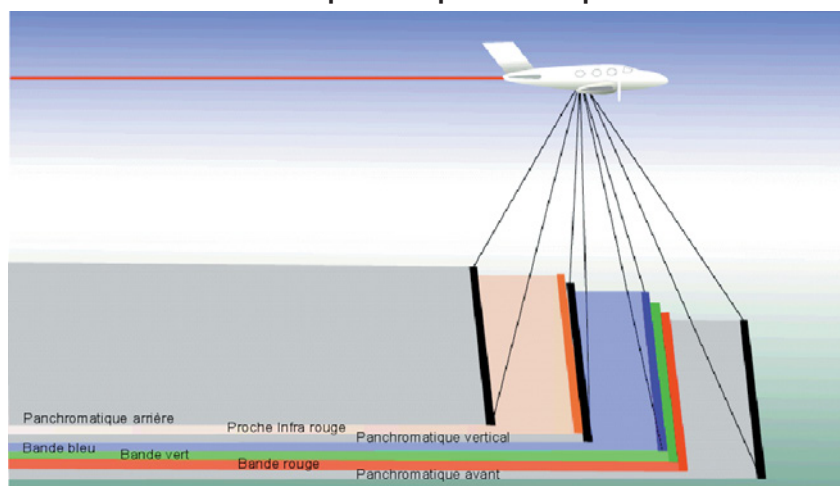


Fig. 2. La disposition du plan focal de l'ADS40 fournit trois barrettes panchromatiques et quatre multispectrales.

Les filtres de l'ADS40 fournissent les sensibilités suivantes pour ces bandes multispectrales:

Bande		λ (µm)
Panchromatique	(trapézoïdale)	465 - 680 (at (= 50%)
Rouge	(rectangulaire)	610 - 660
Vert	(rectangulaire)	535 - 585
Bleu	(rectangulaire)	430 - 490
Proche infra-rouge	(rectangulaire)	835 - 885

LH Systems peut affirmer que les bandes multispectrales et les 24 000 pixels des bandes panchromatiques permettront à l'ADS40 de combiner pour la première fois la précision de la photogrammétrie aux larges possibilités de la télédétection.

L'ADS40 prend pleinement en compte le côté photogrammétrique avec ses grandes barrettes linéaires et son objectif de très haute qualité pourvu d'un champ visuel transversal de 64° (FoV) fournissant une trace de balayage au sol et l'assurance d'une surface couverte adéquate. Les facteurs limitatifs de ce type de senseur sont liés au temps de lecture des barrettes qui est sur l'ADS40 de 800 hertz et à la vitesse de l'avion par rapport au sol. À une vitesse normale de vol de 200 nœuds (370 km/h), la dimension de l'échantillon au sol (GSD) est de 15 centimètres. Le large balayage au sol permet d'assimiler le résultat de la trace au sol captée par l'ADS40 au film de la caméra classique en étant de plus compatible avec les nouveaux systèmes LIDAR à hautes performances.

Le résultat d'un tel dispositif de balayage à barrettes donne un aspect familier confus, car les empreintes au sol des barrettes ne sont pas parallèles les unes aux autres, ceci étant dû aux mouvements de l'avion. Pour parler selon la terminologie utilisée avec les satellites comme l'a fait LH Systems dans ses communications à Amsterdam, les données brutes ou de Niveau "0" peuvent être rectifiées en utilisant les données de position et d'attitude de l'avion (Fig.3) que délivre la version spéciale du système de Positionnement et d'Enregistrement des Attitudes d'Applanix Corporation.

Le même processus permet de gérer toutes les anomalies de la progression des bandes qui sont provoquées par les variations dues à la marche en

avant de l'avion ; il n'y a nullement besoin de compensation de filé dans le sens traditionnel du terme en traitant correctement les lignes de balayage réellement obtenues. Si les données résultantes du niveau "1" sont visualisables en monoscopie et en stéréoscopie par l'œil humain et par logiciel, l'aérottriangulation est aussi possible en utilisant une variante du logiciel ORIMA de LH Systems. Bien que les données du niveau "1" soient employées pour initialiser le processus, les résultats de l'aérottriangulation peuvent être de même appliqués aux données images du niveau "0" en perdant un minimum d'information lors du rééchantillonnage. Ensuite, on peut communiquer ces données aux différents processus photogrammétriques numériques classiques, tels que la restitution ou la génération de MNT, la génération d'orthophotos et de mosaïques par traitement d'image (données de niveau "2").

Le carénage de l'ADS40 protège les composants complexes de la caméra

entourant le plan focal. L'électronique sophistiquée délivre à l'ordinateur embarqué des données comprimées de tous les canaux. L'unité de mesure inertielle de la position (IMU) est montée très rigidement sur le plan focal. L'objectif de l'ADS40 se trouve au-dessous du plan focal ; il est d'une toute nouvelle conception caractérisée par ses propriétés télécentriques. Les composants multiples de cet objectif sont rectifiés et disposés de telle façon que les rayons émergeant vont intersecter perpendiculairement le plan focal tout en assurant une performance optimale des filtres. Comme la dernière génération des objectifs de la caméra film RC30, l'objectif de l'ADS40 donne des performances semblables d'environ 150 lp/mm même à ouverture maximum de f/4. En outre, un dispositif ingénieux trichroïde divise la lumière incidente en ses trois composantes, rouge, vert et bleu, à l'aide des miroirs semi-réfléchissants dichroïques mis en cascade de sorte qu'aucune énergie ne soit perdue. Cette technique permet d'éliminer dans le spectre visible les problèmes d'enregistrement caractéristiques des solutions à barrettes où les couleurs composites peuvent avoir des franges de couleur à un instant donné. D'autres systèmes et composants pleins d'innovation font en sorte que les performances de l'ADS40 sont nominales en cas de variation température et de pression.

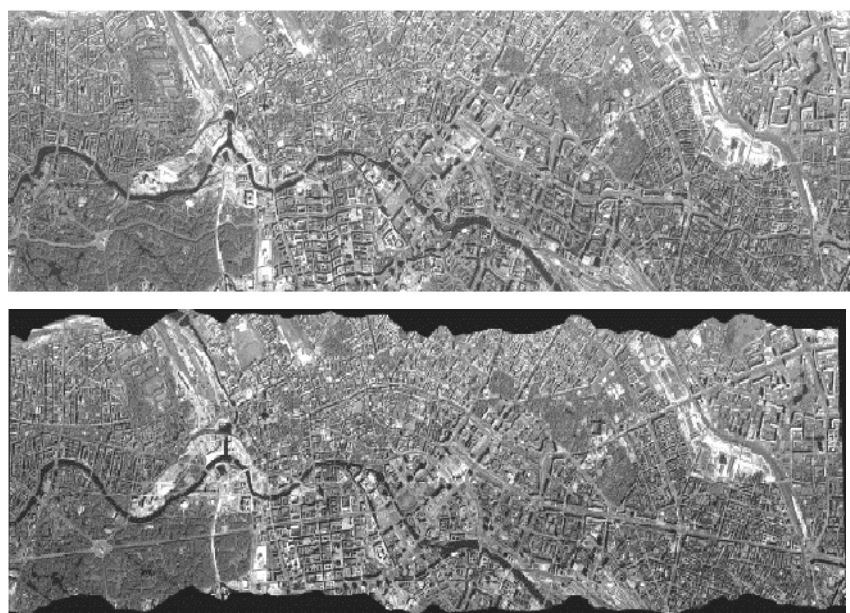
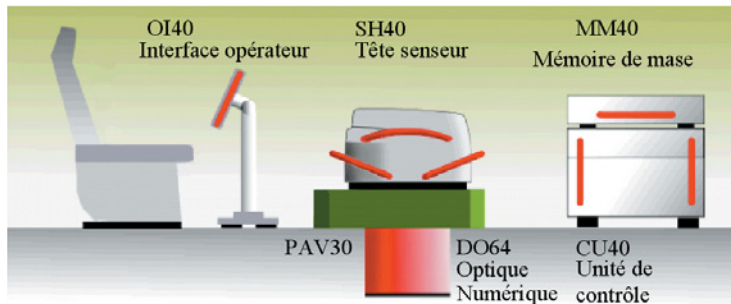


Fig. 3. Génération de Données du Niveau '1' à partir du Niveau '0' en utilisant les données issues du Système de Positionnement et d'Orientation Applanix: cette image de Berlin montre clairement la justesse du processus de rectification.



IMU Intégré dans la tête de capteur SH40
 GPS Intégré dans l'unité de contrôle CU40
 FCMS Système de Gestion de Contrôle du Vol (logiciel)
 POS Ordinateur intégré dans CU40 pour Position et Attitude
 PAV30 Pas délivré en standard

Fig. 4. Les composants système de l'ADS40.

Si l'ADS40 attire l'œil, son contenu n'en fait pas moins partie d'un système complexe (fig. 4). L'ordinateur de bord monté sur rack inclut des mémoires de masse extractibles aux performances très élevées, totalement indispensables puisque l'ADS40 génère environ 100 gigaoctets de données par heure de vol ! Les composants du système comprennent également un nouvel écran tactile pour exécuter les opérations de contrôle durant le vol, un logiciel spécial écrit pour l'ADS40 appelé Système de Gestion et Contrôle du Vol et du capteur, dérivé dans une certaine mesure du produit existant ASCOT de LH Systems pour la caméra-film. La communauté photogrammétrique attendait des capteurs numériques à hautes performances depuis plusieurs années. On a vite compris les avantages énormes d'un flux tout numérique sans processus de film chimique ou de scanner.

Comparaison des flux de type film et numérique

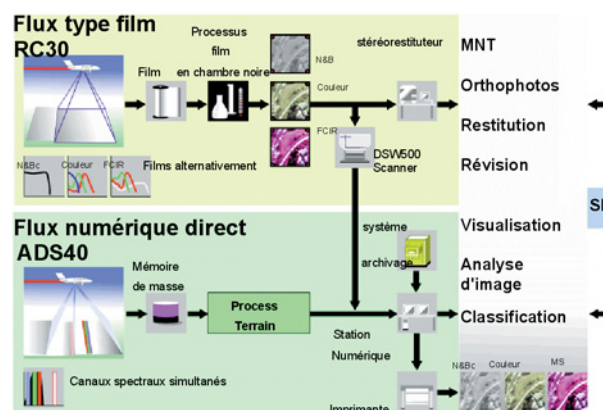
Mais il y a des conséquences plus subtiles. Premièrement, la mise en œuvre d'un processus d'archivage est obligatoire. Il n'y a aucune « possibilité de retour » au film original dans le cas où un processus numérique s'exécuterait mal. Par conséquent une approche systématique et moderne du stockage avec catalogue des terrabytes de données et des metadata ne peut être évitée. Deuxièmement, la géométrie délivrée par le balayage de barrettes n'est pas très bien connue de tous,

sinon par les utilisateurs de SPOT, et on doit faire l'effort d'assimiler certains concepts. De plus, il y a déplacement du relief. Par exemple, à l'extérieur du centre de chaque bande mais dans le cas du capteur nadir, il n'y en a aucun le long de la bande; dans le cas des capteurs avant et arrière, le déplacement est constant pour un objet de taille donnée et ne change pas avec sa position dans la bande. Il n'y a pas de parallaxe dans le sens traditionnel du terme, en relation avec la base et la distance principale: les angles stéréo entre les trois vues panchromatiques sont fonction de la distance principale et de la disposition du plan focal - ils ne peuvent être changés par la planification de projet. En imagerie de type film, avec 60% de recouvrement avant, on obtient 60% du terrain apparaissant dans trois images - chevauchement triple - tandis qu'avec l'imagerie numérique de type trois barrettes, chaque point apparaît dans trois images. Cela signifie que l'on peut jouer sur la gestion des trois images lors des phases d'aérotriangulation et de génération de MNT, ce qui ajoute

de la robustesse tout en exigeant plus puissance de calcul.

Mais si le succès de l'ADS40 semble assuré, avec les clients possesseurs de RC20/30 qui montrent déjà un vif intérêt dans le monde entier et sont prêts dans certains cas à passer commande de suite, les niveaux des ventes dépendra de plusieurs facteurs. On se doit d'aborder par exemple le positionnement de ce nouveau produit. En effet, LH Systems désire poursuivre ses ventes de caméras film RC30 à des niveaux significatifs encore durant quelques années à venir. Un des points critiques repose aussi sur la promotion des mérites de l'ADS40 en télédétection, LH Systems devant pénétrer un marché qui lui est peu familier. Autre point, les concurrents de LH Systems mettront-ils en application des algorithmes dans leur logiciel pour exploiter les données de l'ADS40 ? Cela se produira certainement, car toutes les parties concernées en tireront un avantage certain; LH Systems a facilité et facilitera le processus en faisant circuler librement l'InfoKit disponible contenant les informations et outils requis pour s'en servir.

En l'an 2000 apparaît donc une nouvelle ère. Le doyen des fournisseurs de caméra-film a présenté son capteur Numérique à Hautes Performances, dédié tant à la photogrammétrie de précision qu'à l'acquisition de données multispectrales. L'intérêt pour un flux Tout Numérique complet est clair, de même que l'intérêt manifeste porté à ce nouveau produit. Les défis que doit relever LH Systems consistent désormais dans la livraison et le soutien actif de l'ADS40 avec la même compétence qui a accompagné les caméras-film pendant tant d'années. ●



Orthophotographie cylindrique développement et application au château fort de Blandy-les-Tours

Bertrand Chazaly (ing. ENSAIS)
Topographie et Patrimoine Culturel

LES LIMITES DU REDRESSEMENT PLAN

Géométriquement parlant, une photographie est une perspective conique. Le relief et la perspective de l'objet photographié sont les causes de déformations qui empêchent la superposition de la photo à un plan. Pour permettre cette superposition, on a mis au point des moyens mécaniques (redresseur, orthoprojecteur) puis numériques (logiciels de redressement) pour corriger les déformations, et produire ce qu'on appelle une orthophotographie (ou photocarte, photoplan). Que ce soit une vue aérienne ou l'élévation d'une façade, le principe est toujours de choisir une surface de projection plane (le plan XY ou le plan de la façade) dans laquelle on veut que l'objet soit représenté. Les logiciels de redressement ont tous été développés dans ce sens. Si ce choix est évident, l'exploitation des résultats auxquels il aboutit est limitée dans le cas d'un objet de révolution. C'est le problème qu'ont posé les tours du château de Blandy-les-Tours. Propriété du Conseil Général de Seine-et-Marne, ce château est actuellement l'un des édifices seigneuriaux les mieux préservés d'Ile-de-France. Dans le cadre des opérations de fouille et de restauration, et en prélude à la mise en valeur du monument, la Direction des Archives et du Patrimoine de Seine-

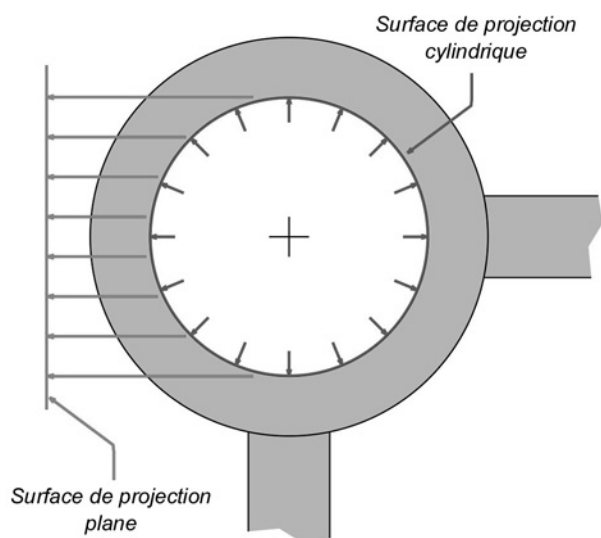


et-Marne m'a demandé des documents qui permettent d'analyser globalement la structure et la géométrie de l'élévation intérieure de 3 des 6 tours, ce qu'une orthophoto classique ne pouvait pas fournir. J'ai utilisé la méthode de redressement cylindrique, méthode inédite que j'ai mis au point en janvier 2000 pour l'étude de la tour augustéenne du site de Laudun, et que j'ai appliqué pour la première fois sur un monument de cette importance.



1. PRINCIPE

L'idée est d'utiliser une surface de projection qui ne soit pas plane mais cylindrique, surface axée sur la tour et qui est ensuite 'déroulée' sur un plan. Le problème est bien sûr qu'il n'existe pas aujourd'hui de logiciels permettant ce type de traitement. C'est une approche inédite, qui a nécessité la recherche puis la mise en œuvre d'une nouvelle méthode, et la programmation de nouvelles procédures de redressement.



1.1. Détermination d'un cylindre de projection

Le redressement des prises de vues réalisées sur une tour implique la détermination d'un cylindre de projection, dont l'enveloppe soit la plus proche de la surface réelle de la tour. Pour cela, il est nécessaire de mesurer puis d'analyser la géométrie réelle de cette surface.

Outre les données nécessaires à la construction de l'orthophoto, cette analyse nous apporte des informations utiles sur la géométrie du monument.

a. Mesure d'un MNS

La connaissance précise de l'enveloppe réelle de la tour passe par la mesure d'un modèle numérique de surface (MNS). C'est la mesure d'un nuage de points tridimensionnel, assez dense pour rendre compte de la géométrie de cette tour et des déformations locales de sa surface.

Cette mesure est réalisée de façon précise et rapide grâce à l'utilisation d'une station totale (théodolite électronique avec distancemètre incorporé) permettant un pointé laser sans réflecteur.

b. Calcul du cylindre par compensation (détermination de l'axe et du rayon)

Ce cylindre parfait est défini par un axe vertical passant par un point C de coordonnées (X_c, Y_c) et par un rayon R. Déterminer ce cylindre pour n points mesurés $(M_i)_{i=1 \text{ à } n}$, c'est rechercher les valeurs de (X_c, Y_c, R) telles que les

écarts entre les distances horizontales CM_i et le rayon R soient globalement les plus petits possibles.

Les valeurs (X_c, Y_c, R) sont calculées par approximations successives, en appliquant la méthode des moindres carrés.

d. Analyse de la surface de la tour

Le cylindre de projection connu, il est maintenant possible de calculer l'écart entre sa surface et l'enveloppe réelle de la tour (chaque point mesuré). Ce diagnostic permet de repérer les mesures fausses, d'affiner le calcul de ce cylindre théorique et d'en valider l'utilisation comme surface de projection. Il permet aussi de fournir une cartographie représentative de l'état de la surface étudiée. Il est en effet possible d'interpoler et d'utiliser un modèle numé-



rique de ces écarts afin de visualiser les déformations géométriques dues aux irrégularités de la surface réelle (bosses, déformations autour des fissures...).

1.2. Pour chaque cliché : calcul des paramètres de prise de vue

La mise en correspondance des coordonnées terrain et des coordonnées photo de points d'appui, permet le calcul par compensation des paramètres de prise de vue (position de l'appareil, focal, angles de prise de vue).

- mesure de points d'appui sur la tour (ciblettes).
- prises de vues et numérisation des clichés.
- Mesure des coordonnées pixel des ciblettes.
- calcul des paramètres par la méthode des faisceaux (procédure mise au point sous StarOffice).

1.3. Pour chaque cliché : redressement

La connaissance des paramètres permet de calculer les coordonnées photo de tout point à partir de ses coordonnées terrain. On assimile la surface réelle de la tour à celle du cylindre de projection. Au départ, l'orthophotographie est vide. Pour chaque pixel de l'orthophotographie, le redressement consiste alors à :

Transformer les coordonnées du pixel vide (passage des coordonnées cylindriques aux coordonnées rectangulaires, grâce à la connaissance du cylindre de projection)

Appliquer la transformation mathématique aux coordonnées rectangulaires : on obtient les coordonnées pixel du point dans la photo brute (grâce à la connaissance des paramètres de prise de vue)

Mesurer la couleur du pixel brut (valeur Rouge, Vert, Bleu) et l'appliquer au pixel vide.

Pixel par pixel, on construit ainsi l'orthophoto cylindrique correspondant à la portion de la tour couverte par le cliché.

Le cas échéant, une procédure supplémentaire permet d'aller chercher dans le MNS l'écart à la surface de projection, afin de corriger les coordonnées terrain de chaque pixel vide avant transformation mathématique. Ceci permet de prendre en compte le MNS lors du redressement.

1.4. Assemblage des orthophotos

L'assemblage de tous les clichés redressés aboutit à la couverture complète de la surface de la tour. Pour l'habillage cartographique, il est possible de placer un quadrillage dont l'abscisse correspond à un angle (gisement depuis l'axe de la tour), et l'ordonnée à l'altitude.

2. AVANTAGES

Cette méthode permet de fournir un photoplan qui colle franchement à la surface de ce type d'objet, fournissant un rendu pierre à pierre régulier. Un seul document permet d'étudier l'empierrement ou la disposition des différents

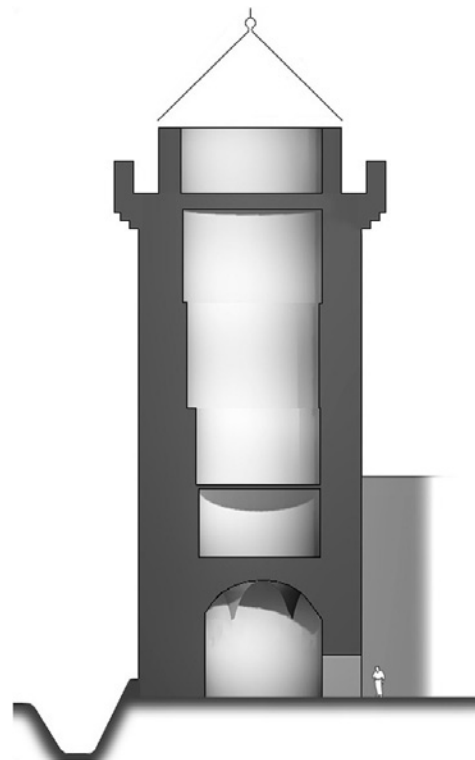
éléments architecturaux sur l'ensemble du monument. Il est alors possible d'en déduire une méthode de construction de la tour. L'orthophoto cylindrique est dans ce cas un véritable document d'étude.

Le passage des coordonnées cylindriques aux coordonnées rectangulaires est une simple transformation géométrique. A partir de l'orthophoto cylindrique, il est possible de choisir une direction de projection et de générer automatiquement une orthophoto plane.

L'orthophoto peut servir de texture à la modélisation 3D de la tour. Elle peut contribuer à la production d'un rendu hyperréaliste de l'objet.

3. UN EXEMPLE : LE DONJON

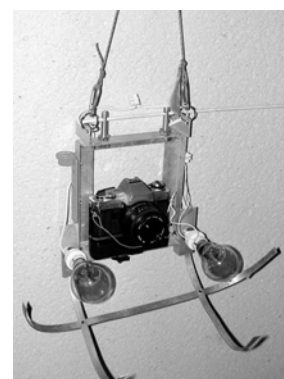
Le donjon est la plus haute des 3 tours qu'on m'a demandé de topographier. Ses 35 mètres sont divisés en 6 niveaux desservis par un escalier à vis. Seuls les planchers des premier, deuxième et dernier niveaux sont présents, ce qui a particulièrement compliqué la phase d'acquisition



des données.

3.1. Conditions de prise de vue

Le redressement des clichés utilise un modèle numérique du relief de la surface à cartographier. Ce modèle rend compte des variations globales de ce relief mais n'est pas assez précis pour restituer le relief de



chaque pierre. C'est pourquoi il est préférable d'assurer une prise de vue en vis à vis, pour s'affranchir des déformations dues à ce micro-relief.

Les 2 niveaux dont les planchers sont absents sont physiquement inaccessibles. Ce problème s'est posé pour les trois tours. Selon le cas, il a fallu mettre en place des moyens d'accès provisoires, économiques et respectant le monument: équipement d'escalade, appareil photo hissé le long d'un câble, ou placé au sommet d'une perche de 6m et équipé d'un dispositif de déclenchement à distance par fil.

3.2. Exploitation des cylindres de projection

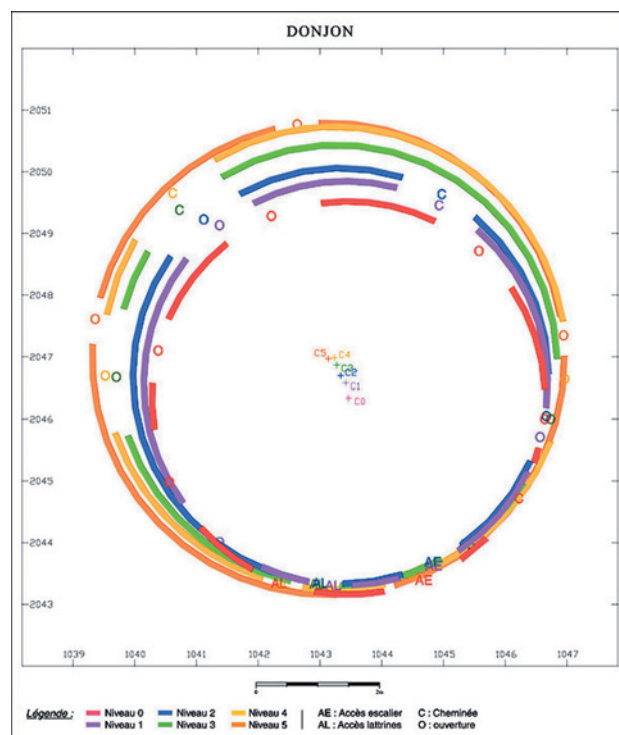
Des cibles, disposées aux ouvertures et visées depuis l'intérieur et l'extérieur, ont permis de recalcr chaque niveau dans un système de coordonnées commun à l'ensemble de chaque tour. Pour la Tour des Gardes et surtout pour le Donjon, cette opération a permis de révéler que ces niveaux n'étaient pas concentriques. Les cylindres sont plutôt tangents vers l'intérieur du château. L'enveloppe extérieure semble en revanche suivre un seul cylindre (cela reste à vérifier). Pour les premiers niveaux, les murs des deux tours seraient donc plus épais dans le secteur orienté vers l'extérieur de l'enceinte, et d'une épaisseur identique vers l'intérieur. Ceci tend à montrer la vocation défensive de ces deux tours.

3.3. Résultats

Les résultats ont été fournis sur Cdrom, sous la forme de fichiers au format Illustrator 7.0, à raison d'un fichier par niveau correspondant chacun à un document au format A2.

Chaque document contient:

l'orthophotographie déroulée du niveau, à l'échelle du



1/50ème, à la résolution de 300 dpi.

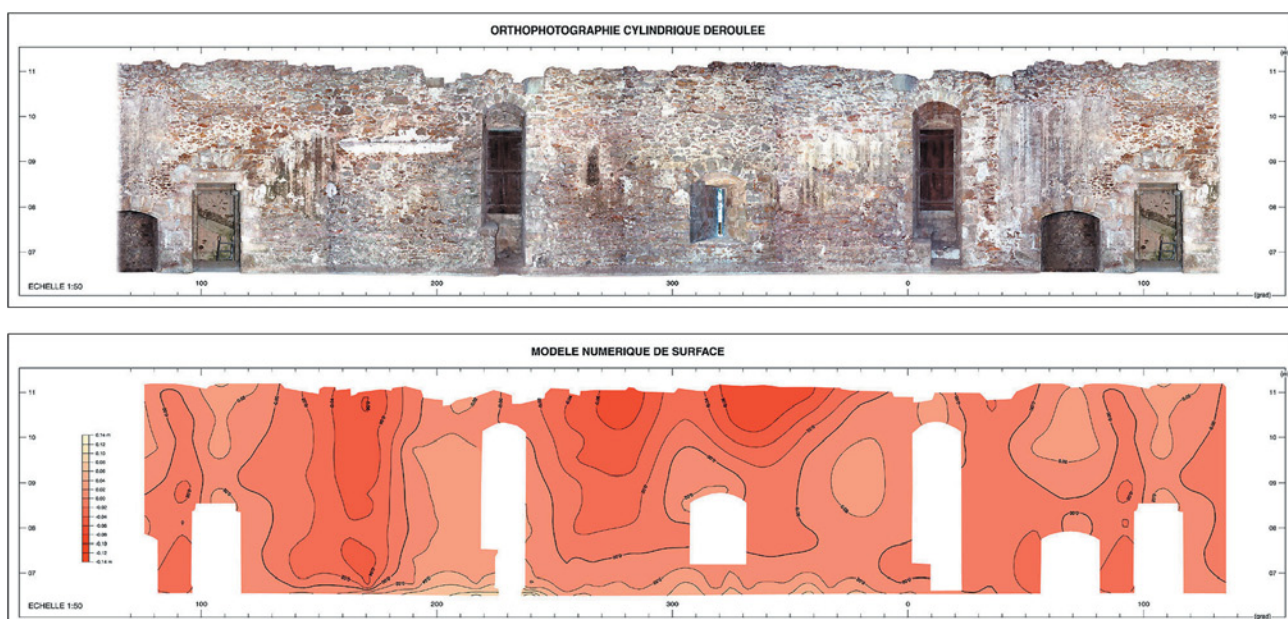
Les courbes de niveau tramées correspondant au modèle de surface du niveau.

Des informations statistiques sur le nuage de points levés.

Une vue de dessus des niveaux.

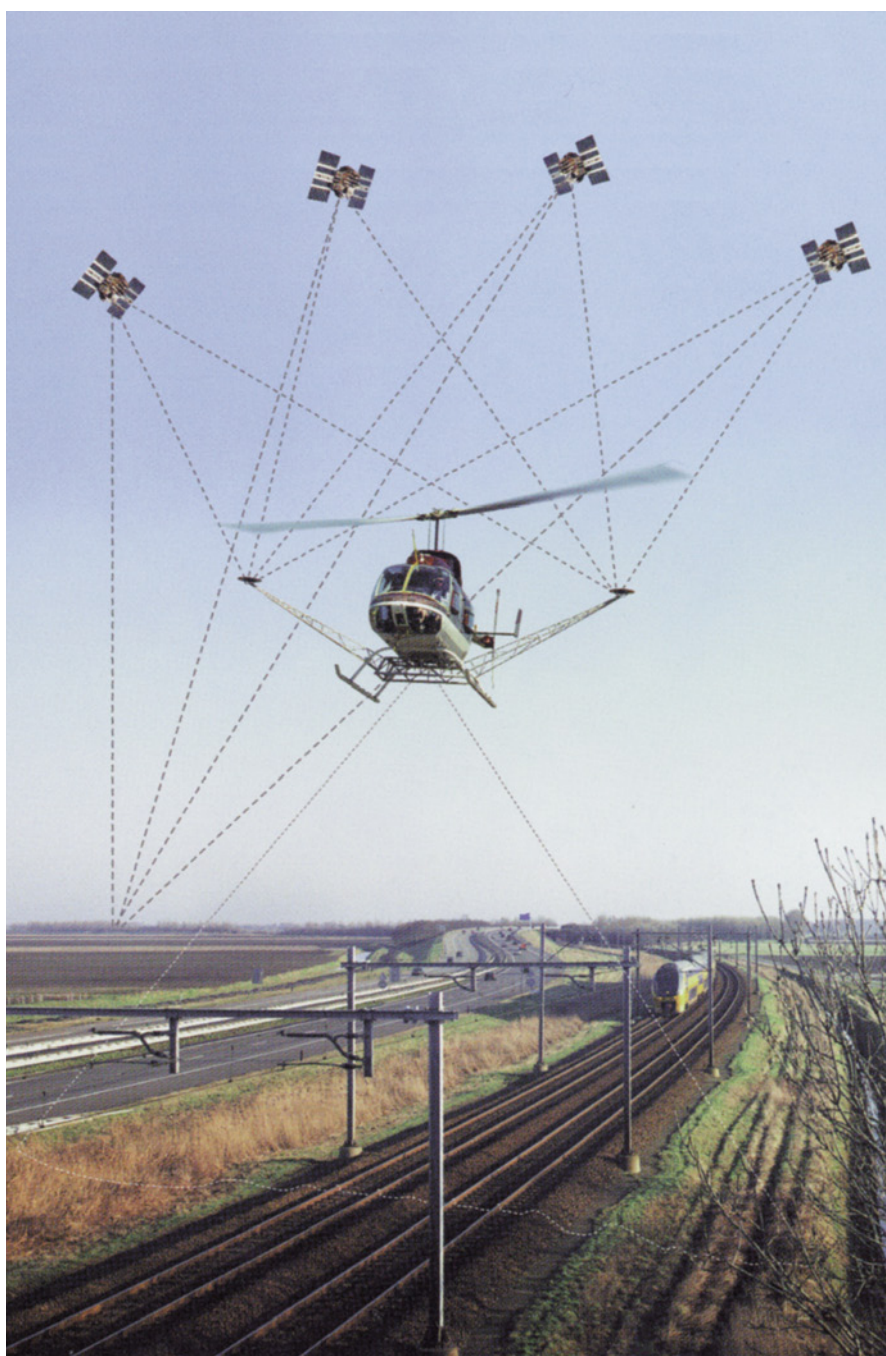
Toutes ces informations ont été classées dans des calques qui peuvent être affichés et superposés les uns aux autres. Selon les dimensions des niveaux, la taille des fichiers varie de 31 Mo à plus de 63 Mo. ●

Plus d'information : <http://www.topo-patrimoine.com>



FLI-MAP® Système d'ima héliporté pour une nouvel

La Société GEOID spécialisée, depuis 15 ans, en topographie, positionnement par satellite et cartographie propose, en partenariat avec la Société FUGRO-INPARK, le système FLI-MAP®, une solution alternative et compacte dans le relevé topographique de corridor. Ce système d'imagerie géographique 3 D héliporté réunit à la fois la précision du GPS cinématique et l'intégration de nouvelles techniques numériques telles que la télémétrie laser, la mesure de comportement par centrale inertielle compacte, l'imagerie vidéo et des logiciels spécialisés. La précision, la rapidité d'interprétation des données et la réduction d'intervention sur le terrain font de FLI-MAP® un outil très performant et compétitif.



FLI-MAP® en opération

gerie géographique le cartographie en 3 D

Richard Damiano, Pierre Balestrini

Principaux avantages par rapport aux techniques traditionnelles

Une haute densité de points

Le système FLI-MAP® collecte 12 000 points de données x, y, z par seconde et relève plus de 100 km de couloir par jour, il permet de créer un modèle numérique de terrain de grande précision.

Une précision absolue en X, Y, Z de 5 à 8 cm / 3.5 cm en relatif

FLI-MAP® enregistre la géométrie du terrain en trois dimensions avec une grande rapidité et une très bonne précision avec le respect des détails (fils électriques aériens haute tension, équipements de chemins de fer : aiguillages, panneaux... , réseaux routiers ; bornes kilométriques, plaques, etc..)

Une diversité d'informations des données acquises

Hauteur et position de tout objet tel que panneau de signalisation, arbres, bâtiments..., nature de terrain...

Le relevé par hélicoptère permet :

- l'acquisition de données même dans les zones difficiles d'accès telles que :
 - forêts tropicales (enregistrement des données sous la «canopée»)
 - routes à grande circulation
- de travailler par temps couvert puisqu'il peut voler sous les nuages.

Rapidité des mesures et traitement des données

Dans l'exemple du relevé suivant :
Longueur : 30 km
Largeur de la bande d'étude : 300 m

Echelle de la cartographie : 1/1000

La solution par le système FLI-MAP® fournira des résultats après 6 semaines environ, alors que les solutions de levé terrestre comme l'ortho-photo-plan avec la mise en œuvre des moyens standards en ressources humaines, nécessiteraient au minimum 12 semaines, voire plus suivant les conditions météorologiques.

Utilisation des images vidéo numérisées

Devant et au dessous de l'hélicoptère, les deux caméras numériques enregistrent les images du terrain sur toute la largeur du corridor. Ces images peuvent être géoréférencées et orthorectifiées.

Aspects techniques

Acquisition des données

Des récepteurs satellites Omnistar® sont utilisés pour collecter les corrections différentielles standards RTCM-



Le matériel embarqué dans le cockpit de l'hélicoptère

104 permettant un positionnement de l'hélicoptère avec une précision submétrique pour une navigation en temps réel (solution DGPS), l'enregistrement des données permet d'améliorer la précision du positionnement en post traitement.

Une centrale inertielle compacte mesure avec une très grande précision l'attitude de l'hélicoptère instantanément (200 fois par seconde).

Le capteur laser balaye le terrain à une fréquence de 12 000 points par seconde. FLI-MAP® enregistre également l'intensité du signal réfléchi par les surfaces balayées. Avec une ouverture de 60°, la largeur de couloir couverte est globalement égale à l'altitude de vol de l'hélicoptère.

Système d'imagerie vidéo

L'hélicoptère est équipé d'une caméra S-VHS couleur numérique haute définition, orientée vers le bas, une deuxième caméra munie d'un zoom est orientée vers l'avant de l'appareil.

Afin de faciliter l'interprétation des images, toutes les communications pilote - opérateur et les notes vocales sont enregistrées.

Le Temps Universel (TU) précis est enregistré sur chaque trame vidéo, ce qui permet l'intégration complète de toutes les données numériques laser.

Des traitements d'images, de photogrammétrie (image écran), et d'alimentation de bases SIG en images sont aussi possibles.

Traitement des données

Les données provenant des récepteurs GPS et de la centrale inertielle font l'objet d'un post traitement destiné à



générer des déplacements vectoriels précis entre toutes les bornes de référence et l'hélicoptère.

Le logiciel de traitement spécialisé FLIP7 dispose d'algorithmes de filtrage et de fonctions CAO, offrant ainsi à l'opérateur des fonctionnalités supplémentaires servant à extraire des informations précieuses à partir des données de FLI-MAP®.

A partir de là, les données peuvent être gérées (en fonction du type et de la position), analysées visuellement, filtrées, extraites ou exportées vers des logiciels SIG ou CAO.

Résultats obtenus

- Divers ensembles de données XYZ
- Profils transversaux et/ou longitudinaux
- Courbes de niveaux et/ou MNT
- Images vidéo numériques
- Base de données SIG
- Inventaires d'objets
- Classification d'intensité
- Importation exportation CAO / SIG

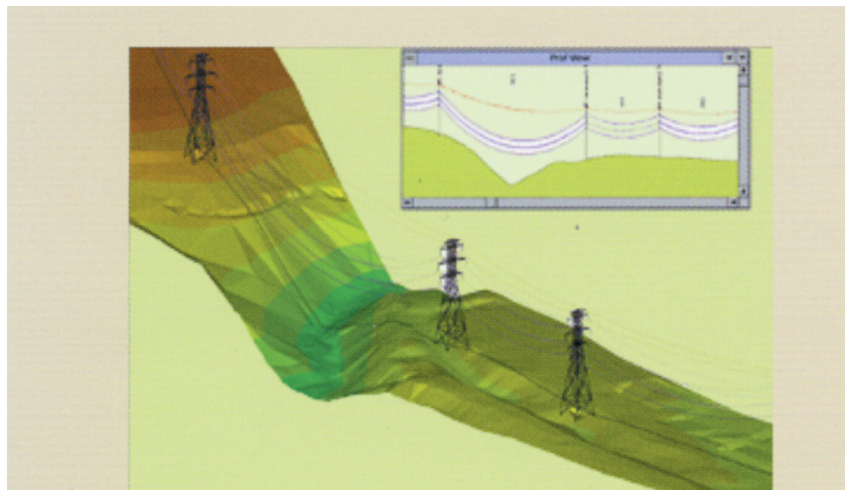
Débouchés et



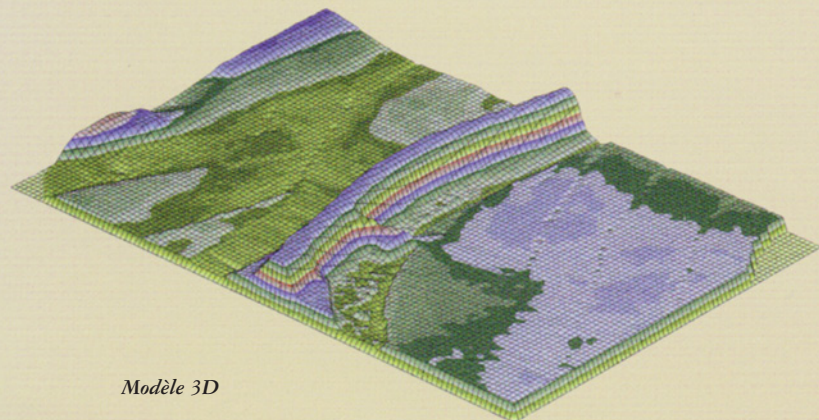
applications du système fli-map®

• Electricité

Mesure de surface et de terrain, tra-



MNT - Modèle Numérique de Terrain



Modèle 3D

cés de fils et de câbles blindés, position et hauteur des structures, etc ...

• Chemins de fer

Inventaires de biens et mesures tech-

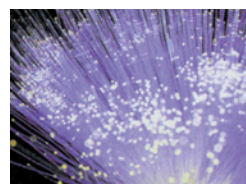


niques (dégagements, déclivités, profondeurs de ballast, conditions de drainage ...)



• Pipelines

Planification des corridors de futurs pipelines, analyse de l'état des pipelines déjà en place, etc.



• Gestion des eaux

Profils MNT ou transversaux pour localiser les zones à problèmes en cas de crues, informations sur le niveau des eaux (digues, barrages)

• Transport / Ponts et Chaussées

Relevé de l'état des routes et planification de la construction de routes et de ponts, ...

• Télécommunication & Fibres optiques

Planification et relevé de réseaux à fibres optiques.



Références

FLI-MAP® a été développé en 1995 et durant les cinq années il a été utilisé avec succès dans plus de 120 projets dans de nombreux pays.

Depuis l'Europe les projets suivants ont été réalisés :

En Hollande

- 1000 km de lignes électriques haute tension ont été levés. Le projet a été réalisé en 4 jours et demi et après 4 semaines de traitements, les coordonnées XYZ de presque 4000 poteaux et le profil en long ont été délivrés.
- 600 km de levé de digue, le but était d'obtenir un MNT à haute densité de points (plus de 9 points par m²), avec une grande précision, pour la

réalisation de digues de protection contre les inondations.

- Un MNT de 3x5 km a été fourni à la ville de Nijmegen, pour le développement d'une zone de nouvelles habitations.

En Afrique du Sud

Le système FLI-MAP® a été utilisé pour le levé de 3646 km de voies ferrées pour Spoornet (Compagnie Sud Africaine de chemin de fer). Cette opération était la plus importante, jamais réalisé avec un système laser altimétrique dans le monde à ce jour, le propos était de définir tous les avantages d'un trajet et d'utiliser les images vidéo pour repérer ces avantages.

Au Portugal

Un total de 700 km a été levé. Le projet était divisé en plusieurs petites missions dans divers domaines tels que ; nouvelles routes, lignes électriques, et lignes électriques existantes.

En Allemagne

105 km de corridor ont été levés pour établir un MNT pour le réseau ferroviaire afin de déterminer la meilleure route pour le train grande vitesse entre Francfort et Mannheim.

En Ecosse

En août, il a été réalisé un levé de 2700 km pour faire l'inventaire et la maintenance d'une voie ferrée.

En Malaisie

Le levé de l'autoroute entre Kuala Lumpur et l'aéroport.

En Polynésie française

Un levé pour l'implantation de nouvelles routes, en zones très boisées (forêt tropicale). ●

Des courbes et des lignes

Claude Million

On est passé très rapidement des moyens de dessin traditionnels aux moyens informatiques sans bien nous arrêter sur les progrès successifs réalisés, et sans en avoir bien conscience. On voudrait montrer que certains de ces progrès ne sont que de vieux trucs de tracé des ateliers ou des bureaux d'études mis au goût informatique et qui, en se généralisant, ont pris une importance et un intérêt qu'on ne pouvait, a priori, sous leur forme initiale, imaginer.

Une fois ce premier objectif atteint on voudrait démystifier ces méthodes qui sont devenues tellement courantes que même les informaticiens qui créent les logiciels du commerce ne savent plus très bien ce qu'ils font, tellement tout est devenu standard et machinal, «encapsulé», comme cela se dit, dans des logiciels pour lesquels le cœur actif est inaccessible, pour des raisons commerciales, même et surtout aux professionnels. Enfin, on voudrait permettre au lecteur de «tripoter» ces méthodes pour se faire une opinion fondée.

Le sujet restant, par lui-même, tellement vaste, on se contentera de parler du tracé automatique des courbes quelconques.

On a limité au maximum les développements mathématiques en les renvoyant à des annexes qui, si elles ne peuvent pas être publiées faute de place, pourront être trouvées sur le site de l'AFT ou sur celui de l'auteur, ou à l'AFT, ou chez l'auteur.

On a du renoncer à donner une bibliographie quelconque tellement le sujet a donné lieu à une profusion de publications pas toujours très claires ou même franchement absconses [1].

Le problème à résoudre

Il s'agit, généralement, de faire passer une courbe régulière sur un certain nombre de points. Dans certains cas cela est relativement facile, par trois points quelconques on peut faire passer un cercle et un seul, c'est-à-dire que toute personne, à qui seront donnés ces trois points, y ferait passer le même cercle, et c'est exactement le but poursuivi : que cette courbe soit la même sur le chantier et au bureau, et quelle que soit l'échelle de report et la précision attendue, le millimètre ou le mètre. Toutes les courbes connues (ellipses, paraboles, hyperboles, anses de panier etc..) étaient, dans le passé, décomposées en arcs de cercles, par de savants tracés, dont des catalogues ont été publiés, pour essentiellement être tracées sur les chantiers. Sur le terrain il était possible, plus que sur un coffrage de chantier de construction, d'implanter, à l'horizontale, une courbe algébrique connue, qui ne soit pas décomposée en cercles. Mais, en dehors de ces figures, ou bien relativement simples, ou symétriques, ou répondant à une logique pas trop complexe, il restait le cas des courbes vraiment quelconques passant par un nombre de points également quelconque.

Il n'était pas question de décomposer tout ensemble de points par paquets de trois et d'y faire passer des cercles, un problème fondamental surgissait alors : celui des raccordements des cercles entre eux, en leur donnant une tangente commune, mais encore fallait-il définir laquelle ?... En outre, si on fixe la tangente à un cercle en un premier point, on n'a plus besoin que d'un



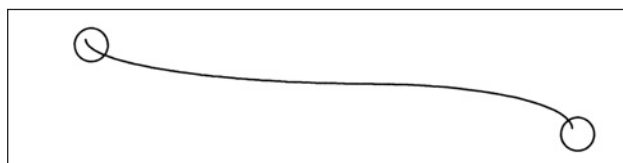
seul autre point pour le définir. Il semble donc que ce problème de continuité soit facile à résoudre prenons les trois premiers points et faisons passer un cercle, traçons sa tangente au troisième point, nous pouvons définir un cercle passant par le quatrième point et ainsi de suite jusqu'au dernier point. On laissera le lecteur faire lui-même sa figure. Il remarquera que le tracé n'est pas satisfaisant à l'œil, il paraît trop raide ; en outre, si on refait le même tracé en partant du dernier point pour revenir au premier on n'obtient pas le même, ce qui est, définitivement rédhibitoire, la condition de répétabilité dans tous les cas n'étant pas satisfaite. Répéter autant de fois que l'on veut le tracé, et le faire exécuter par des personnes différentes, en obtenant chaque fois le même unique résultat, est absolument indispensable.

Les solutions anciennes

La solution ancienne la plus banale, dans les bureaux d'étude Français, était l'usage d'un instrument appelé le «pistolet», une sorte de gabarit en bois ou en plastique sur lequel on pouvait trouver toutes les courbures possibles pour autant qu'on en ait un assez grand nombre, et les faire passer par les points connus en assurant la continuité des tangentes, en tout point. Cette solution n'apportait rien pour le chantier qui était obligé de relever des cotes graphiques et devait raccorder les points trop discontinus, à l'œil, sur place. Pour les chantiers à implanter, des solutions anciennes, mais déjà très modernes (XVIII-XIX^e siècles), consistaient à trouver une courbe algébrique qui satisfasse la première condition de passer par tous les points, plus la condition de continuité, tout en laissant au tracé de la courbe un aspect agréable et souple, mathématiquement toutes les solutions proposées visaient à éviter d'avoir à résoudre un système linéaire complet, on utilisait des polynômes orthogonaux avec lesquels les systèmes à résoudre deviennent diagonaux, la solution est donc immédiate. On notera que ces solutions ne pouvaient pas être appliquées au bureaux d'études et demandaient des moyens de calcul importants, et pouvaient laisser les problèmes de contraintes aux limites non résolus. Elles ont été largement exploitées dès que l'informatique a permis d'en aborder les calculs, au demeurant assez simples, mais fastidieux à entreprendre et à réaliser à la main.

Des moyens plus raffinés que le pistolet étaient alors (1950-1960) en usage dans les bureaux d'études anglosaxons, et sur tous les chantiers de construction navale : On utilisait une lame tenue par deux poids de dessin en fonte dont les fentes recevaient les extrémités de la lame flexible qui étaient déformée pour passer par les points choisis.

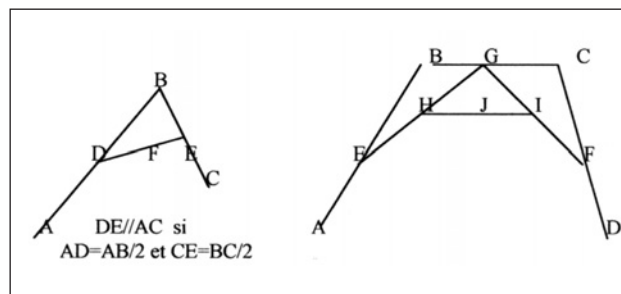
La courbe dessinait, souvent, un S, et, pour cela, s'appelait S/line (courbe en S). Des années plus tard, on a vu apparaître des courbes dessinées par ordinateur qui s'ap-



pelaient des splines. De là à penser que la barre de fraction «/» s'était transformée en «p» il n'y avait qu'un pas... d'autant que les splines pouvaient être d'un degré quelconque, mais qu'on s'arrêtait, prudemment, au degré trois, on verra plus loin pourquoi, et qu'alors la spline devenait un arc de cubique, exactement comme la courbe en S des Anglais. En effet, on démontre facilement que la déformée de la lame flexible contrainte par deux moments fléchissants à ses extrémités est soit une parabole carrée (moments de sens opposés) soit une cubique (moments égaux de même sens). Ce même appareil de tracé, sous une taille beaucoup plus grande évidemment, était en usage dans les chantiers anglais de construction navale pour tracer régulièrement les couples des bateaux, il était, paraît-il, utilisé en France sous le nom de tracé à la latte. Car tout ce qui était recherché dans cette opération était : la régularité et la reproductibilité du tracé, en passant par les mêmes points. Les premières courbes tracées par ordinateur ne visaient rien d'autre, avec, en plus, la numérisation du tracé pour l'introduire dans des machines à commande numérique.

Ce procédé de la lame flexible avait des développements inattendus, on utilisait, couramment, un câble de bicyclette pour régulariser le tracé théorique à pente constante, des routes de montagne, fait au compas à ouverture constante le long de courbes de niveau équidistantes. Ce procédé était amélioré en gainant le câble de caoutchouc, pour qu'après déformation il reste stable. On ne peut décrire tous les procédés de dessin découlant de ce principe, tant ils étaient nombreux. Alors, lorsque les splines cubiques sont sorties des ordinateurs au début de la CAO, nombre de dessinateurs se sont gratté la tête pour savoir, en dehors de l'avantage d'avoir des courbes calculées de formulation connue, où était la nouveauté !

Dans les bureaux d'études on rencontrait aussi un problème pour raccorder deux droites par un cercle si les distances des points de tangence au sommet n'étaient pas équidistantes on ne pouvait pas tracer un cercle pour les raccorder. On divisait les deux tangentes en parties proportionnelles puis on joignait les points homologues (1/10 sur AB avec 1/10 sur CB le point de la courbe était sur la droite joignant ces deux points au 1/10 de DE, sur la figure le point F correspond à la division 1/2) La courbe tracée par point est, dans ce cas, un arc de parabole, elle joint A à C en restant tangente à AB et BC.



On a indiqué, à côté, une méthode de raccordement de A et D en respectant les tangentes AB et DC non concourantes, le point J correspond au sommet de la courbe ($t=1/2$) qui est une cubique.

Là encore, quand on vit apparaître les courbes de Bézier, beaucoup on cru reconnaître quelque chose qu'ils

avaient déjà vu ! Ce n'est pas minimiser le mérite des auteurs qui est grand, même Pierre Bézier Ingénieur de chez Renault reconnaît tout ce qu'il doit aux travaux de de Castelnau qui faisait le même travail pour Citroën, dans des conditions plus difficiles, aux Etats-Unis des recherches semblables étaient entreprises chez General Motors. Il faut dire que lorsque les machines d'usinage à commande numériques sont apparues il fallu bien alimenter leurs commandes en nombres venus des bureaux d'étude, le passage du dessin à la pièce devait se faire sans qu'un manque de définition des formes à réaliser vienne s'ajouter aux tolérances d'usinage. Il fallut bien en venir à transmettre des nombres identiques pour les mêmes pièces, interpolables à volonté, si on avait besoin de nouveaux points. Souvent une pièce était conçue par des stylistes qui réalisaient une maquette en pâte à modeler ou en résine. Pour le bureau d'étude ce modèle était découpé selon un plan de symétrie généralement longitudinal, puis en des plans parallèles à cette symétrie, chaque tranche représentait une courbe fermée qu'il fallait lisser et reproduire avec précision, puis la maquette était découpée par des plans perpendiculaires au plan de symétrie pour obtenir des «couples», ces couples devaient être définis avec la même précision. Ceci acquis, on n'était pas au bout de ses peines les espaces compris au milieu de ces mailles devaient, eux aussi, être définis mathématiquement avec la contrainte générale que tout point reçoive, numériquement, et sans l'«à peu près» du passé, la même définition sur un couple et sur une coupe longitudinale, quel que soit le «pas» de la définition de la surface. Le choix de définitions mathématiques des courbes s'imposait, la CAO était née.

Les problèmes propres à la profession

Pour revenir à la profession, il existe plusieurs sortes de problèmes qui peuvent être traités par le tracé informatique des courbes. En ne cherchant pas à être exhaustif, on citera : Le tracé des courbes de niveau interpolées au milieu de points altimétriques connus, le tracé des courbes des détails planimétriques dans le but de numériser un plan, le tracé des courbes de raccordement des voies, etc...

Pour le tracé des courbes de niveau, on s'est vite rendu compte que la fausse bonne idée qui consistait à faire passer sur $N+1$ points connus pour être à la même altitude, par tout moyen d'interpolation, une courbe de degré N , ne donnait rien qui puisse correspondre à la réalité, sauf quand celle-ci s'échappe, comme sur les terrains très plats.

On s'est vite aperçus, dans toutes les professions, qu'il était très dangereux d'élever le degré des polynômes représentatifs au-delà du troisième, sauf cas très particuliers (Les positions des satellites G P S données tous les quart d'heure par la organismes de post-traitement notamment, doivent être interpolés au degré 8 ou 12 pour conserver la précision de la détermination !). Dès lors, dans la majorité des logiciels, les courbes de niveau sont des arcs de cubiques se raccordant entre elles, en respectant les conditions de continuité.

Le cas de la numérisation des courbes sur les plans est particulièrement intéressant. On veut éviter d'avoir à stocker beaucoup de nombres pour définir une courbe naturel-

le, c'est-à-dire celle dont on ne connaît pas la définition géométrique ou analytique. La ligne à tracer est généralement définie par quelques points de passage qu'on veut relier par une courbe qui permette à différents opérateurs d'obtenir des résultats identiques et aussi précis, mais pas forcément exacts, qu'ils le désirent : Le problème est de savoir si des opérateurs différents, utilisant des logiciels différents, sur des machines différentes, obtiendraient des résultats identiques en partant de données de base identiques, c'est-à-dire les mêmes points de passage. C'est parce qu'on n'en était pas très sûr qu'on a entrepris ce travail.

Le tracé des arcs de cubiques

Faire passer un arc de cubique sur quatre points connus n'est pas très difficile : pourvu qu'on choisisse un des points comme origine des coordonnées, il suffit de résoudre trois équations linéaires à trois inconnues, on a donné des relations qui évitent de résoudre le système de relations linéaires, elles sont très rapides à programmer [Annexe I]. Si on veut que certains termes s'annulent on peut aussi choisir le centre de gravité des points connus. La courbe suivra très fidèlement les points donnés, seulement elle ne se raccordera pas à ses voisines, si elle en a, elle marquera une cassure au point commun. On peut, également appliquer la méthode d'interpolation de Legendre, en développant les polynômes de Legendre de degré trois, les résultats sont quasiment identiques, avec le même défaut, ou le même avantage si on veut marquer une discontinuité aux deux extrémités [Annexe II].

On doit bien noter que les procédés d'interpolation antérieurs à l'avènement de l'ordinateur, Legendre, Lagrange, Newton, Stirling, Gauss, visaient, surtout, à éviter d'avoir en cours de calcul, à résoudre un système linéaire un peu compliqué, c'est pourquoi ils utilisaient des polynômes orthogonaux, de plus ils négligeaient totalement les nécessités industrielles, résolues, à l'époque, par «l'art du trait», c'est-à-dire les constructions graphiques. Cette nécessité d'éviter de résoudre des systèmes linéaires n'existe, plus c'est pourquoi on a vu apparaître de nouvelles méthodes d'interpolation plus adaptées aux besoins de l'industrie et éventuellement imposant de résoudre un système linéaire de coefficients.

Si on a des courbes comportant très peu de points cette méthode est la plus sûre, car il y a une solution et une seule. Ceci peut s'appliquer à des limites de parcelles cadastrales par exemple, pour le calcul des courbes plus compliquées ce n'est pas suffisant.

On notera surtout que, pas plus que pour les courbes suivantes, il n'est possible de dessiner une courbe fermée avec une seule cubique. Certaines cubiques particulières peuvent définir de courbes fermées, mais justement elles sont trop particulières : Folium (qui a une définition paramétrique) et ovale de Descartes.

Le tracé des splines cubiques

Une sous-spline est une courbe découpée dans laquelle chaque segment peut être interpolé par un polynôme de degré n qui est donc $n-1$ fois continûment dérivable.



Une spline cubique est un ensemble de polynôme de degré trois qui passe par deux noeud d'interpolation consécutifs j et $j+1$ leurs dérivées premières et secondes étant continues en chaque point. Un polynôme de degré trois est parfaitement défini par les valeurs de la fonction en deux points et par leurs dérivées premières en ces deux points, au début et à la fin, car on a quatre équations pour résoudre les quatre inconnues de la cubique. On a établi un logiciel permettant de tracer ces courbes passant sur un ensemble de points qu'on a limité à 12, car il fallait bien se limiter. En outre, chaque courbe peut être interpolée en 100 points. La définition des points de passage obligé dit, parfois improprement, en français, «points de contrôle», est faite en donnant tout simplement leurs deux coordonnées x_j et $y_j = f(x_j)$, x_{j+1} et $y_{j+1} = f(x_{j+1})$. Le calcul des dérivées en ces points est extrêmement subtil [Annexe III].

On remplit deux critères le premier $f_0'' = 0$ ou toute autre valeur définie par l'utilisateur en $x(0)$ et en $x(n)$, c'est-à-dire au début et en fin de tracé. Le second critère vise à rendre minimales les sommes des courbures exactement comme pour la lame flexible c'est ce qui empêche la courbe de divaguer comme pour les autres polynômes de haut degré $\int (f''^2) dt = \text{minimal}$.

On considère que pour qu'elles soient continues en chaque noeud et pour satisfaire au second critère elles doivent respecter la relation :

$(x(j)-x(j-1)).f''(j-1) + 2.(x(j+1)-x(j-1)).f''(j) + (x(j+1)-x(j)).f''(j+1) = 6.(((f(j+1)-f(j))/(x(j+1)-x(j)))+(f(j)-f(j-1))/(x(j)-x(j-1)))$. les inconnues sont les dérivées secondes c'est-à-dire les courbures aux points de passage elles forment une matrice triangulaire assez facile à résoudre par l'algorithme de Thomas :

```

0 1 2 3 4 5 6 7....n
z x x
  x x x
    x x x
      x x x
        x x x
          x x x
            x x z

```

Sur le schéma ci-dessus les termes significatifs sont marqués par un x, tous les autres sont nuls, les lettres z qui représentent des inconnues en dehors de la matrice correspondent aux dérivées secondes de la fonction au premier et au dernier point.

Voir [annexe III] pour une explication détaillée de cette relation qui est exactement celle utilisée pour le calcul des poutres continues en résistance des matériaux.

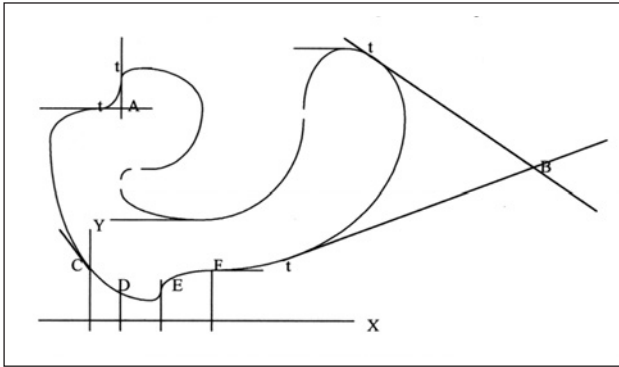
Les principaux défauts de tels tracés c'est qu'ils supposent d'abord que $x_0 < x_1 < x_2 \dots < x_n$, c'est une contrainte extrêmement pénalisante, car elle dépend du système d'axes et cela interdit, évidemment, aussi les courbes fermées ! En outre, comme on le remarquera sur la figure le pas découpe sur la courbe des arcs inégaux qui ne permettent pas de la définir uniformément, comme on le désirerait : si on suppose qu'une partie de la courbe est très étendue en Y et peu étendue en X on ne pourra pas interpoler suffisamment de points, si on admet que le pas d'interpolation est fixe sur l'ensemble des points de contrôle. Dans ce cas, il faut,

impérativement, utiliser un pas variable, fonction de l'allure de la courbe qu'on calcule, c'est possible sur les courbes peu «chahutées» en calculant sa dérivée qui est la tangente au point i de l'angle de la direction de la courbe avec l'axe des x : $f'(x(i)) = \tan(\alpha)$, pour avoir des points uniformément répartis, le long de la courbe selon un écart ds on adopte un pas variable $x(i+1) - x(i) = ds \cdot \cos(\alpha)$, si α est grand le pas réduira, mais on ne connaîtra pas exactement à l'avance le nombre n de points à interpoler, habituellement on prend un pas fixe $x(k+1) - x(k) = \text{pas}$ (k est le numéro des points fixes, i est le numéro des points à interpoler dans un intervalle de k à $k+1$). Les courbes fermées devront être tracées en plusieurs fois en imposant des conditions de continuité entre les différents tracés. C'est sur ce point qu'on peut douter que tous les logiciels du commerce soient équivalents : comment sera tronçonnée une courbe fermée, comment seront fixées les courbures sur ces raccordements ; même si des modes opératoires uniformes étaient standardisés, les différents opérateurs les respecteraient-ils ou les comprendraient-ils ?

Il est, par exemple, possible de dire que les raccordements devront se faire sur des tronçons dont la courbure est faible et fixer $f'' = 0$ en ce point. Mais tout le monde fera-t-il de même ?

Les courbes de Bezier

En dehors des raccordements routiers, et encore, on ne voit pas l'utilité des courbes de Bézier dans la profession, pas plus d'ailleurs que des courbes qui sont dérivées des courbes de Bézier, les Basic splines (B-Splines) et les N U R B S (Non Uniform Rational Basic Splines), en raison de leur définition, qui se fait par des sortes de tracés directeurs, point d'ancrage et points de direction qui n'ont aucune matérialité sur un plan topographique. Elles ont pourtant le grand mérite de donner des expressions paramétriques des courbes, c'est-à-dire que les points interpolés sont calculés en X, Y et éventuellement Z, à partir d'un paramètre indépendant des coordonnées est avec $0 < t < 1$, et d'une fonction unique pour toutes les coordonnées, on obtient des tracés plus réguliers qu'avec les splines, on peut même dire sans reproches, c'est ce qui a fait leur succès international. Si on reprend le dessin du tracé graphique qui a, sans nul doute, inspiré l'auteur de ces courbes on verra que si on note A le vecteur $\{X, Y, Z, \dots\}$ de la position du point A, on a pour tout paramètre $t \in [0, 1]$: $E = A.t + B.(1-t)$, $F = D.t + C.(1-t)$, $G = B.t + C.(1-t)$, $H = E.t + G.(1-t)$, $I = F.t + G.(1-t)$, $J = H.t + I.(1-t)$. En faisant les produits on découvre les polynômes de Bernstein. L'intérêt est d'obtenir une relation paramétrique identique pour toutes les coordonnées. Pour quatre points on obtient un arc de cubique plane ou gauche paramétré par t . Comme le dit [2] Pierre Bézier lui-même : dans une automobile toutes les courbes sont gauches ! On pourrait ajouter une liste impressionnante de produits industriels qui sont dans le même cas. On peut imaginer définir les courbes naturelles par deux points de passage et deux tangentes en ces points on pourrait ainsi utiliser des arcs de paraboles se raccordant les uns aux autres, mais c'est une mauvaise idée. Imaginons les rivages d'un lac :



Malheureusement, on ne voit pas comment les courbes de Bézier, qui sont beaucoup plus pratiques que les splines, pourraient être utilisées par les géomètres-topographes pour numériser des détails naturels. La courbe pourrait être définie en relevant ses points de tangence t et ses sommets A et B . Toutefois, s'il s'agit d'un lac ou d'un bois, si le sommet B est accessible, le sommet A ne l'est pas, en revanche on peut définir une spline en relevant quatre points courants C, D, E, F , toutefois il faudra assurer la continuité des tangentes en C et en F , pour poursuivre la courbe complètement, ce qui n'est pas très facile en pratique et est même trop souvent négligé.

Conclusions

Depuis la vulgarisation du tracé informatique des courbes par la société Américaine Adobe on s'imagine, à tort, que le problème est résolu. Or, les solutions proposées sont loin de représenter une panacée, une part importante d'appréciation est laissée à ceux qui utilisent ces courbes, encore faudrait-il qu'ils sachent exactement les conséquences de leurs décisions sur la fiabilité du dessin réalisé, et, à tout le moins, ce qu'ils dessinent ! Personnellement, on maîtrise mal les petites aides graphiques qui accompagnent un traitement de texte, notamment la direction de la concavité des courbes, qui sont apparemment des arcs de paraboles carrées (degré 2), ce n'est pas très grave pour faire quelques illustrations, que serait ce s'il s'agissait de représenter des limites de parcelles !

C'est bien là le grand problème, la numérisation des plans impose ou imposera que les courbes qui doivent passer sur n points soient définies avec le minimum de nombres, par exemple les coordonnées des n points d'une spline cubique : $2.n$ nombres qui sont les coordonnées planes de ces points, et les quatre paramètres a_0, a_1, a_2, a_3 , de définition de la courbe dans chaque intervalle, soit en tout $6.n-4$ nombres avec lesquels, n'importe qui, avec n'importe quelle machine, et n'importe quel logiciel, devrait restituer une courbe unique, définie au millimètre ou au dixième de millimètre près, si cela a de l'intérêt pour lui, ou pour son travail. Les meilleurs logiciels seront ceux qui imposeront de ne stocker que le plus petit nombre de paramètres possible, et qui reproduiront la même courbe, quel que soit l'opérateur, le logiciel, le système d'exploitation et la machine employés. Il n'empêche que la spline cubique sera toujours incapable de tracer un cercle ou une ellipse, on doit utiliser une spline «carrée» (degré 2).

On recherche une nouvelle solution au problème général déjà très ancien, de tracé des courbes naturelles, jusqu'ici on n'a trouvé que la clothoïde [3] qui puisse concurrencer une spline cubique. On doit noter qu'à l'origine 0 les deux courbes sont confondues, le tracé de la clothoïde proposé en [4] découpe des arcs égaux sur elle-même, ce qui permet de la «rectifier», c'est-à-dire de déterminer sa longueur, une donnée qu'il peut être très intéressante de connaître. ●

Références

- [1] Patrick Chenin, Michel Cosnard, Yvon Gardan, François Robert, Patrick Witomski : **Mathématiques et CAO - Méthodes de base** édité par Hermès 1985-1986
- [2] Jean Cassagne : **Un inconnu célèbre : Pierre Bézier** propos de Pierre Bézier recueillis par l'auteur in *SVM* n°69-Février 1990
- [3] José F.Zélaco : **Clothoïde unique de raccordement entre deux cercles** in *XYZ* n° 16 -1986
- [4] Claude Million : **Mieux que la clothoïde la spirale adoucie** in *XYZ* n°77 1998-4

ANNEXES

Annexe I : tracé d'une cubique passant par quatre points

Une cubique peut être, le plus généralement possible, représentée par la relation suivante: $y = a.x^3 + b.x^2 + c.x + d$.

Il faut, au minimum, quatre points connus dans leurs deux coordonnées x et y pour définir une telle courbe soit $(x_1, y_1; x_2, y_2; x_3, y_3; x_4, y_4)$ pour faciliter le calcul on pose $x_1 = y_6 = 0$ d'où on tire

$$\begin{aligned} x_2 &\leftarrow (x_2 - x_1), & y_2 &\leftarrow (y_2 - y_1) \\ x_3 &\leftarrow (x_3 - x_1), & y_3 &\leftarrow (y_3 - y_1) \\ x_4 &\leftarrow (x_4 - x_1), & y_4 &\leftarrow (y_4 - y_1) \end{aligned}$$

ce qui évite en tout premier lieu, de prendre en compte des nombres très grands, on va avoir des coefficients en x^6 , mais ce qui simplifie aussi l'équation car, alors : $y_1 = 0 = d$, ce qui réduit le nombre des inconnues (a, b, c, d) à trois.

On a alors une relation linéaire:

$$\begin{aligned} x_2^3 x_2^2 x_2 & a & y_2 \\ x_3^3 x_3^2 x_3 & b & y_3 \\ x_4^3 x_4^2 x_4 & c & y_4 \end{aligned}$$

dont la résolution est, si on le veut, directe. On pose et on calcule les paramètres suivants :

$$\begin{aligned} m &= \sum_{i=2}^4 (x_i^3)^2; p = \sum_{i=2}^4 (x_i^3) \cdot (x_i^2); q = \sum_{i=2}^4 x_i^4; \\ r &= \sum_{i=2}^4 (x_i^2)^2; s = \sum_{i=2}^4 (x_i^2) \cdot (x_i); t = \sum_{i=2}^4 x_i^2 \\ u &= \sum_{i=2}^4 y_i \cdot (x_i^3); v = \sum_{i=2}^4 (y_i \cdot (x_i^2)); w = \sum_{i=2}^4 y_i \cdot x_i; \\ q &= r \end{aligned}$$

On remarque que le déterminant de la matrice est : $\det = m.r.t + 2.p.q.s + m.s^2 + t.p^2$ et les solutions sont :

$$a = \frac{u.(r.t - s^2) + v.(q.s - p.t) + w.(p.s - q.r)}{\det}$$

$$b = \frac{u.(s.q - p.t) + v.(m - q^2) + w.(p.q - m.s)}{\det}$$

$$c = \frac{u.(p.s - r.q) + v.(p.q - m.s) + w.(m.r - p^2)}{\det}$$

il est très facile de programmer directement ces formules dont l'exécution est plus rapide qu'une résolution traditionnelle.

Annexe II : l'interpolation de Legendre

La relation d'interpolation de Legendre est la suivante: $y = y_1.L_1 + y_2.L_2 + y_3.L_3 + y_4.L_4$ Si on pose, comme précédemment : $x_1 = y_1 = 0$, en fixant l'origine des coordonnées au point 1, on aura : $y = y_2.L_2 + y_3.L_3 + y_4.L_4$ avec

$$L_i = \prod_{\substack{j=2 \\ j \neq i}}^4 \frac{x - x_j}{x_i - x_j} \text{ soit en développant :}$$

$$L_2 = \frac{x.(x - x_3).(x - x_4)}{x_2.(x_2 - x_3).(x_2 - x_4)} = \frac{x^3 - (x_3 + x_4).x^2 + x_3.x_4.x}{x_2.(x_2 - x_3).(x_2 - x_4)};$$

$$L_3 = \frac{x.(x - x_2).(x - x_4)}{x_3.(x_3 - x_2).(x_3 - x_4)} = \frac{x^3 - (x_3 + x_2).x^2 + x_2.x_4.x}{x_3.(x_2 - x_3).(x_2 - x_4)};$$

$$L_4 = \frac{x.(x - x_3).(x - x_2)}{x_4.(x_4 - x_3).(x_4 - x_2)} = \frac{x^3 - (x_3 + x_2).x^2 + x_3.x_2.x}{x_4.(x_2 - x_3).(x_2 - x_4)};$$

Annexe III : splines cubiques

La fonction spline cubique est définie par les relations: $s_j(x) = a_0 + a_1.(x - x_j) + a_2 + a_1.(x - x_j)^2 + a_3 + a_1.(x - x_j)^3$

$$s'_j(x_j) = s'_{j-1}(x_j) ; s''_j(x_j) = s''_{j-1}(x_j)$$

Les constantes a sont fixées par les valeurs de la fonction en J et $j+1$ et par leurs dérivées premières en ces deux points.

En développant les relations on a:

$$s_j(x_j) = (a_0 - a_1.x_j + a_2.x_j^2 - a_3.x_j^3) + (a_1 - a_2.2.x_j + a_3.x_j^2). \\ (x - x_j) + (a_2 + a_3.x_j).(x - x_j)^2 + a_3.(x - x_j)^3$$

Et pour les dérivées

$$s'_j(x_j) = (a_1 - 2.a_2.x_j - 3.a_3.x_j^2) + 2.(a_2 + a_3.x_j).(x - x_j) + 3.a_3.(x - x_j)^2$$

$s''_j(x) = (-2.a_2 + 3.a_3.x_j) + 6.a_2.(x - x_j)$ Il devient évident que

$$a_0 = f(x_j) ; a_1 = f'(x_j) ; a_3 = s''_j(x_j) / 6$$

On doit noter que les dérivées secondes à l'origine et à l'extrémité du tracé sont "libres".

• On peut poser : $s''(x_0) = 0$, $s''(x_n) = 0$, on dit alors que la courbe a des conditions aux limites "naturelles".

• On encore peut poser : $s''(x_0) = \alpha$, $s''(x_n) = \beta$, on dit alors que la courbe a des conditions aux limites "naturelles".

• On peut poser : $s''(x_0) = \alpha$, $s''(x_n) = \alpha$, on dit alors que la courbe a des conditions aux limites "naturelles".

Extension de l'infrastr

Le GPS Trimble et le logiciel de Station de référence virtuelle (VRS) ont été choisis pour offrir fiabilité et haute précision aux utilisateurs du GPS.

Le groupe Trimble (NASDAQ: TRMB) a annoncé qu'il fournirait des stations de référence GPS ainsi que leur logiciel d'exploitation en vue de l'extension du réseau GPS suisse, lequel propose des services DGPS (GPS différentiel) et cinématiques en temps réel (RTK) sur l'ensemble du territoire. La supervision et l'exploitation de l'infrastructure du service seront assurées par une agence gouvernementale (Office fédéral) suisse. Les utilisateurs du GPS seront en mesure de profiter des services ainsi offerts sur l'ensemble du territoire suisse dans les domaines de la topographie, de la construction, de la navigation, des Systèmes d'Information Géographique (S.I.G.), de l'agriculture et de l'exploitation forestière.

L'extension du réseau GPS suisse fait suite à d'autres succès de Trimble en matière de projets d'infrastructure, tels que le réseau des phares et balises (General Lighthouse Authority Network) le long des côtes de la Grande-Bretagne, le réseau RTK pour l'accès au tunnel sous la Manche ou le projet d'extension de l'aéroport international de Zurich.

A propos d'AGNES

Le réseau GPS AGNES (Automatisches GPS-Netz Schweiz, réseau GPS automatique de la Suisse) consiste actuellement en 10 stations de référence GPS Trimble, neuf d'entre elles étant situées en Suisse et une dans l'ouest de l'Autriche. L'installation de 14 stations de référence Trimble 4700 en



fonctionnement continu (Continuously Operating Reference Station, CORS) a démarré en octobre 2000 et devrait être achevée pour la fin de l'année. La mise en place de sept stations supplémentaires est prévue pour 2001.

AGNES utilise un logiciel de réseau GPS permettant la création de Stations de référence virtuelles (Virtual Reference Stations, VRS). Le logiciel relie les stations de référence GPS et permet un positionnement

centimétrique sans recourir à l'établissement d'une station de référence locale. Les utilisateurs peuvent obtenir la précision RTK à longue portée sur de plus grandes distances par l'intermédiaire de communications sans fil sur le terrain. Le logiciel VRS a été développé par TerraSat, une filiale de Spectra Precision. Trimble a fait l'acquisition de Spectra Precision en juillet 2000.

Le logiciel VRS consiste en un réseau de capteurs GPS Trimble en commu-



Structure GPS en Suisse



nication avec un centre de contrôle afin de déterminer des corrections GPS applicables sur une vaste zone. Ces corrections sont transmises par l'intermédiaire de moyens de communication sans fil (radios ou téléphones cellulaires) aux utilisateurs sur le terrain dans les limites de la zone du réseau. De plus, les utilisateurs peuvent récupérer sur Internet les données brutes GPS enregistrées par le centre de contrôle en vue d'un post-traitement. Il s'agit là d'une illustration éclatante de l'étendue des bénéfices et des synergies auxquels les clients de Trimble et Spectra Precision peuvent désormais s'attendre.

La technologie VRS surmonte les

limitations antérieures par un GPS de haute précision. Le système réduit significativement les erreurs systématiques dans les données de la station de référence pour accroître la fiabilité et la plage de fonctionnement. Cela permet à un utilisateur d'augmenter la distance séparant le capteur mobile des stations de référence physiques tout en améliorant les temps d'initialisation en mouvement (on-the-fly, OTF). Traditionnellement, pour des applications GPS précises (la topographie, la construction, l'agriculture de précision et les systèmes d'information géographiques (SIG) de haute précision), les capteurs mobiles nécessitaient la présence d'une station de référence

dans un rayon de 10 kilomètres afin de garantir une précision de niveau centimétrique. Avec le système VRS, les utilisateurs se trouvant dans la zone des stations de référence peuvent travailler en toute sécurité à des distances plus importantes sans risque de dégradation de la précision.

Outre la précision de niveau centimétrique offerte en temps réel par le VRS, le système propose les services GPS supplémentaires suivants :

Service de positionnement suisse (Swipos)-NAV

Il s'agit d'un service en temps réel fournissant des données DGPS transmises par le biais de téléphones mobiles GSM. Ce service propose deux niveaux de précision : 1 à 2 mètres et 2 à 5 mètres. Les applications principales comprennent la navigation, l'agriculture et la gestion d'actifs ainsi que les activités de sport et de loisirs.

Swipos - SIG/GEO

Il s'agit d'un service destiné au post-traitement avec des données DGPS disponibles via Internet. Ce service permet d'atteindre une précision inférieure au mètre, au niveau décimétrique ou centimétrique, selon l'équipement et les techniques employés. Les applications les plus courantes de ce service comprennent la saisie de données pour des applications SIG de haute précision, la

Les photos utilisées dans cet article sont disponibles sous forme digitale mais aussi en tant que photos traditionnelles.

Envoyez SVP votre demande à Madame Honkala,
Spectra Precision GmbH

mhonkala@spectraprecision.de

Tel. +49 6151 708 213
Fax. +49 6151 708 232

Vous pouvez nous contacter localement:

Trimble Navigation France S.A.
Parc D'Affaire la Bretèche
Avenue Saint Vincent
35760 Rennes Saint-Grégoire

T: 02 23 25 01 50
F: 02 23 25 22 97
www.trimble.com

Spectra Precision S.A.
Z.A. de Courtaboeuf
Parc Hightec VI
9, avenue du Canada, Les Ulis
91966 Courtaboeuf

T: 01 69 18 63 30
F: 01 69 18 63 27
www.spectraprecision.com

Sol Lewitt à Noisiel

Jean-Pierre Maillard

Après l'Axe de la Terre de Piotr Kowalski, présenté dans le n° 85 d'X,Y,Z il est proposé de s'intéresser au Wall drawing n° 649 de Sol LeWitt qui orne les murs du Grand Théâtre de la Ferme du Buisson, la Scène nationale de Marne-la-Vallée situé au cœur de l'agglomération nouvelle du Val Maubuée. Il s'agit de l'une des trois réalisations objet de commandes publiques produites par le peintre américain en France, les deux autres se trouvant respectivement au musée de Picardie à Amiens (Wall drawing n° 711) et au château d'Oiron dans les Deux-Sèvres.

Mais revenons à Noisiel dont le patrimoine s'enorgueillit des réalisations de la famille Menier. D'abord la chocolaterie développée autour du moulin sur la Marne, chef d'œuvre de l'architecture industrielle du XIX^e siècle aujourd'hui siège des sociétés Nestlé France. Ensuite on remarque sa cité ouvrière témoignage de l'urbanisme paternaliste d'alors et la Ferme du Buisson, immense corps de bâtiments à

l'époque au centre des deux mille hectares de terres desservie par un embranchement ferré qui souligne également la réussite des Menier dans le domaine agricole.

Aujourd'hui reconvertie, la Ferme du Buisson accueille des salles d'exposition, deux salles de cinéma, un restaurant et le grand Théâtre, haut en couleurs, Sol LeWitt oblige. Trois murs du grand hall d'entrée sur quatre reçoivent l'intervention plas-

tique d'un des maîtres de l'abstraction géométrique.

L'œuvre peinte ne s'impose pas en entrant, le public étant appelé par l'escalier principal de la salle de spectacle. Il faut regarder à gauche, à droite et se retourner pour percevoir, divisée en huit panneaux, l'ambiance colorée créée par l'artiste. Le spectateur ne prend la mesure du rendu qu'à la sortie. Ainsi le Wall drawing s'offre à lui comme un cadeau, un supplément culturel gracieux, au deux sens du terme. S'il est géomètre, il découvrira des parallélépipèdes tronqués, des pyramides à multiples bases, des losanges ajustés les uns aux autres, voire des volumes hexagonaux. S'il ne l'est pas, il s'en sera sensible aux couleurs satinées de chaque entité géométrique savamment juxtaposée l'une à l'autre quand bien même le vert et l'orange s'opposent.

Les uns y verront les planches graphiques d'un livre de mathématiques, les autres une palette originale subtilement camaïeu très personnelle. Pour accrocher plus enco-



Photos : Yvette Velay

Noisiel la Ferme du Buisson Mur de Sol Lewitt "le salon".



Noisiel la Ferme du Buisson Mur de Sol Lewitt "l'accueil".

re l'attention, Sol LeWitt a trouvé des complémentarités de couleurs primaires et secondaires qui ont pour effet d'introduire une illusion d'optique. Ainsi ce qui est parfaitement parallèle peut apparaître voilé conduisant la réalité physique dans la sensibilité esthétique.

La technique du lavis laisse la texture du mur visible tout en donnant à la surface du Wall drawing une profondeur en particulier sous les couleurs les plus denses. On peut ainsi constater que Sol LeWitt passe d'une forme plane à une forme dimensionnelle aplanie sans référence à la perspective révélant son plaisir du volume.

Sol LeWitt est né à Hartford dans le Connecticut en 1928. Il vit et travaille tantôt à Chester aux Etats-Unis, tantôt à Spolete en Italie. Il est peintre, puis sculpteur et de nouveau dessinateur et peintre et s'inscrit dans le mouvement de l'Art minimal. Il pense que l'œuvre d'art doit être entièrement conçue et formée par la pensée avant son exécution. Ce faisant il a été un des initia-

teurs de l'Art conceptuel notamment en utilisant des combinaisons développées à partir d'un module de base (progression, permutation, rotation, inversion, etc...) ou de suites qu'elles soient mathématiques, géométriques voire celle de Fibonacci. Faut-il rappeler que ce dernier, mathématicien pisan du XII^{ème} siècle s'est distingué par la conception de la suite des nombres dont chacun est la somme des deux précédents (0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, ...)

Ainsi, fort de cette réflexion numérique, son travail de sculpteur le conduit à produire la série des «Incomplete open cubes» qui présente cent vingt deux mutations possibles de la forme cubique de base.

En dessin, c'est la série des «Isometric figure drawing» qui manifeste sa poétique des polyèdres en tout genre.

Enfin et surtout, entre 1968 et 2000 c'est près de huit cent Walls drawing, tel celui de Marne-la-Vallée, qui font sa notoriété. Depuis longtemps, il préfère travailler directe-

ment sur les murs plutôt que d'y accrocher des œuvres. Ses séjours italiens ont certainement affiné son goût pour la fresque, notamment la contemplation des œuvres des maîtres florentins que sont Giotto et Fra Angelico.

Les formes et couleurs qu'il crée constituent un langage, une partition puisqu'ils lui font dire : «Je pense aux Walls drawing comme à des portées de musique qui peuvent être jouées par un nombre indéfini de gens». D'aucuns renchérissent en soulignant l'analogie entre une musique sérielle et la méthode de Sol LeWitt pendant que d'autres y voient l'expression d'un monde de l'idée pure.

Pour sa part, moins abstrait, Sol LeWitt se tourne vers une autre dimension au delà du scientifique et du certain en déclarant «Les artistes conceptuels sont des mystiques plus que des rationalistes. Ils parviennent à des conclusions que la logique ne peut atteindre».

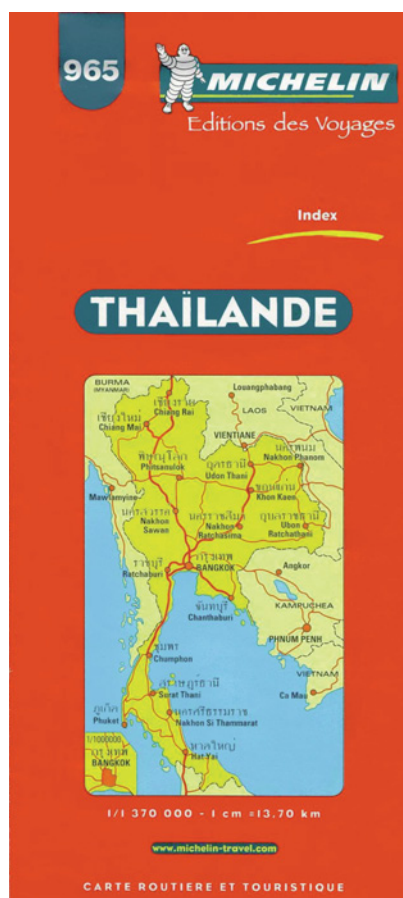
Ah la Géométrie, vois où tu-nous conduit ! ●



Noisiel la Ferme du Buisson Mur de Sol Lewitt "le guichet".

La Nouvelle Carte Michelin de Thaïlande

Stéphane HOPP,
Ingénieur ENSAIS



Le service militaire a du bon : preuve en est quand on a la chance de pouvoir partir en coopération en entreprise (anciennement : volontaire au service national) – ce qui veut dire : «effectuer une mission hors de France pour une entreprise française pendant 16 mois».
Cependant, les places sont chères et les nombreuses lettres de motivation ne trouvent pas toujours réponse.

Enfin, une seule réponse positive m'est parvenue en février 1998, pour un entretien à Paris chez Michelin, Editions des Voyages : c'est là que j'ai appris que le projet était en Thaïlande. Moi qui dans le train pour Paris, pensais à l'implantation d'un circuit d'essais de pneumatiques aux USA ou à l'aménagement de futures plantations d'hévéa en Afrique ou Amérique du sud..., j'ai été on ne peut plus surpris d'apprendre que je travaillerai sur la carte Michelin de la Thaïlande !

Finissant la dernière année d'études avec le passage du diplôme en octobre 1998, j'ai eu une semaine pour déménager de Strasbourg

vers Paris, où j'allais travailler pendant 3 mois aux bureaux de Michelin Editions des Voyages : c'est là que se font tous les produits cartographiques et touristiques du Bibendum.

J'y ai appris comment on faisait une carte Michelin, surtout au niveau de la collecte des informations, du levé proprement dit jusqu'à la toponymie et l'orographie. 100 ans de cartographie font que chaque carte ou guide Michelin est le résultat d'un travail de groupe, où chaque étape est clairement définie, faisant penser non pas à une chaîne de production, mais à un suivi du projet par une équipe quasiment du début à la fin. Elaborer un mode opératoire approprié, testé sur le terrain dans le département de l'Eure, définir les logiciels que nous utiliserions entre Bangkok et Paris, comment nous communiquerions... tels ont été nos principales «occupations» pendant 3 mois aux Editions des Voyages.

Après une dernière visite médicale regroupant les futurs coopérants, quelques jours avant le départ, j'ai enfin pris l'avion pour Bangkok le 8 février 1999.



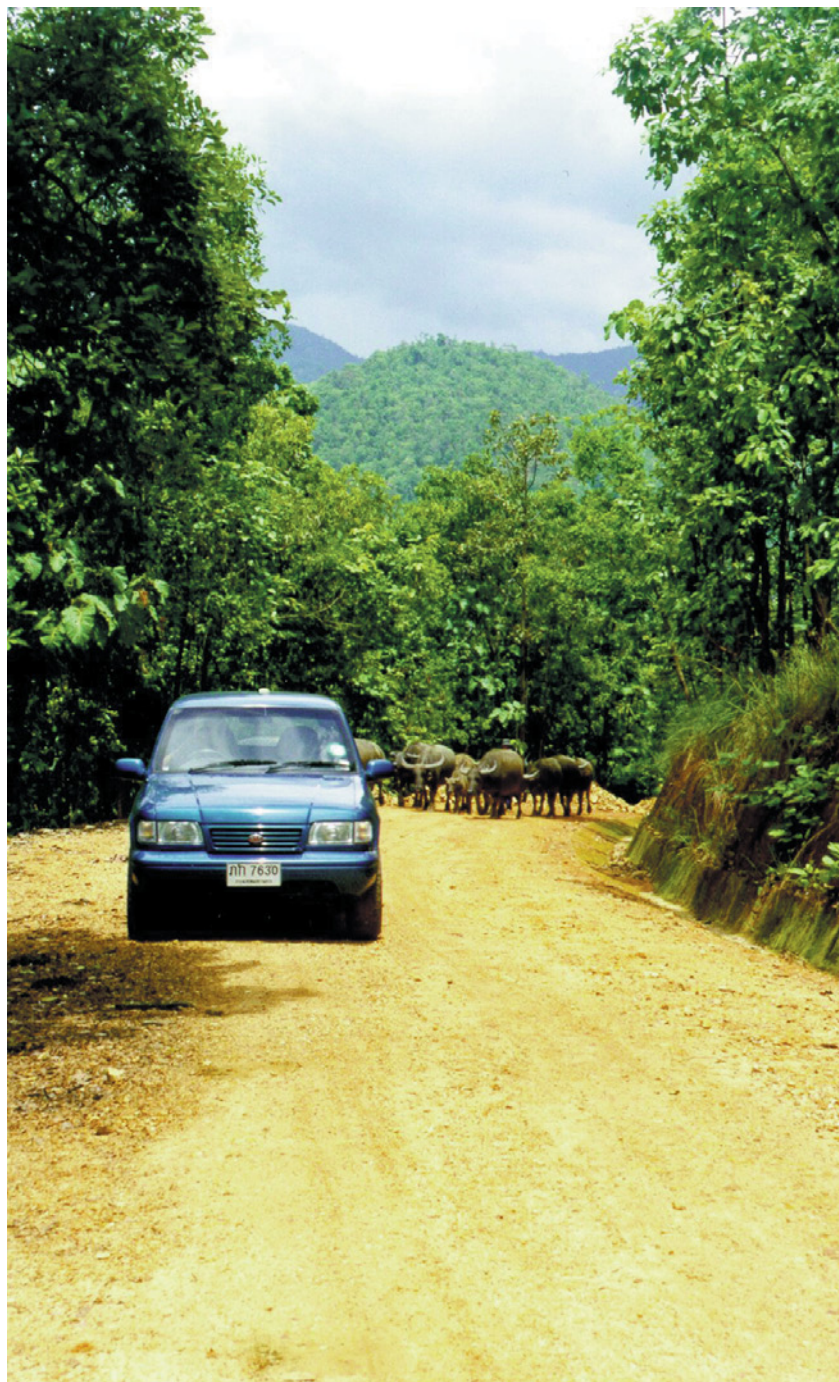
Carte Michelin 965

Avec ses gratte-ciels, dont les rez-de-chaussée baignent dans l'effervescence des échoppes de nouilles, des motos et flux de piétons, Bangkok est une ville gigantesque de 8 millions d'habitants, engluée de bouchons, de téléphones portables, d'odeurs gastronomiques et de soleil.

J'allais passer la moitié des 16 mois à venir au 16^e étage d'une de ces tours, avec mon collaborateur thaï Teera, et l'autre moitié, à sillonner les routes du pays pour fournir les informations aux cartographes de Paris : au total presque 50000 km de routes et 9 plans de ville. Notre première « tournée » a eu lieu dans la plaine centrale, vers Phitsanulok : j'ai très vite compris ce que certains m'avaient dit auparavant : « Une carte en Thaïlande!? Bon courage, vous allez vous amuser ». Premièrement, les Thaïs n'utilisent quasiment jamais de carte; quand ils ont perdu leur chemin, ils demandent à un habitant du coin, au prochain carrefour : cela donne l'occasion de faire une pause et de discuter un brin (c'est un reflet de la mentalité thaïe: sabaay, sanouk). Deuxièmement, toutes les cartes du pays existantes présentaient les mêmes erreurs, les mêmes lacunes de mise à jour. C'est là que l'esprit de la cartographie Michelin nous a sauvé pour ainsi dire: étant destinée aux automobilistes, l'information est prise sur le terrain, par des documentalistes en voiture (une route en latérite ou en asphalte?



Fig. 2. Marché de Bangkok



Dans les montagnes du nord, près de Chiang Mai (noter l'antenne magnétique sur le toit)

Difficile à dire avec une image Spot - qui de plus coûte très chère!). Après à peine deux jours, j'étais intérieurement très fier de savoir que nous dépasserions à coup sûr nos futurs concurrents, et ceci qu'en ne faisant l'effort de se rendre sur le terrain et d'ouvrir les yeux. J'ai découvert par là même que les pauses dans l'épicerie / échoppe du village avaient quelque chose d'agréablement décalé. Après 250 km d'asphalte, d'air conditionné, de lunettes de soleil à consigner l'état des routes, leur lar-

geur, les carrefours, les curiosités touristiques, à surveiller que le GPS enregistre bien un point tous les 200 mètres, la pause repas ou de l'après-midi nous ramenait la vie thaïlandaise normale (deux bonhommes avec leur voiture de Bangkok, arrivés aux confins du nord avec un GPS, pour faire une carte qu'on ne trouvera jamais dans ce village, était-ce bien normal? Autre image du décalage énorme entre Bangkok et la province) : pas d'air conditionné, de téléphone portable, pas de bouchons, ni

de bruit comme dans la capitale. Suivant l'état d'isolement du village, c'était des routes asphaltées ou en terre, des voitures pick-up, des motoculteurs ou des buffles qu'on voyait autour de nous... mais toujours de quoi manger frais et toujours du Coca (là, le concept d'isolement n'existe pas).

Chaque soir, à l'hôtel, les 500 km de données trajectographiques collectées avec un Geoexplorer de Trimble (et son antenne magnétique sur le toit de la voiture) ont été rapatriés sur un laptop, pour être traités avec Mapinfo une fois de retour à Bangkok.

Le produit final est une carte à l'échelle du 1 : 1 400 000: la précision requise sur les données d'entrées - i.e. les trajectoires - n'a donc pas besoin d'être métrique, loin de là! (100 m terrain correspondent à 0.01 mm sur le papier).

Le GPS en mode navigation se prête parfaitement à ce genre de mission, où la quantité de données est importante, où le temps imparti reste limité et où l'information à acquérir dépasse largement le cadre des coordonnées. Couplé à un SIG sommaire, le levé par GPS permet de mettre en valeur la composante thématique des données : les trajectoires GPS ($\sigma = 100$ mètres, - GPS utilisé en mode navigation - l'AS a été enlevé 2 mois après la fin de notre levé...) sont mises en relation avec la toponymie des lieux traversés (villes, villages, parcs historiques, parcs naturels, fleuves etc...), avec les détails de revêtement des routes, leur largeur etc.... En moyenne, une semaine de tournée entraîne une semaine et demie de bureau.

Parmi les aspects très intéressants de cette mission (assez inhabituels pour le topographe que je suis), je citerai par exemple certains travaux qui viennent compléter le levé :

- Se relevant de la crise asiatique, la Thaïlande construit bon nombre de routes, élargit les routes existantes \Rightarrow le « Department of Highway » gère les travaux sur l'ensemble du réseau et son rapport annuel nous aide à suivre l'évolution des travaux routiers rencontrés au cours du levé (chaque carte Michelin mentionne la

mise en service future de telle ou telle autoroute par exemple). Ainsi un document tabulaire exclusivement en langue thaïe doit être intégré dans le flot de données qui aboutit à la carte.

- Les limites et noms des parcs nationaux (81 en Thaïlande, par comparaison: 38 en France, les deux pays ayant quasiment la même superficie) sont issues de cartes du Royal Forest Department, à d'autres échelles que notre échelle de travail. Aussi bien à Paris qu'à Bangkok, nous avons fait correspondre ces cartes avec notre système de projection, recenser l'ensemble des parcs et traduire la toponymie.

- Un dernier exemple est celui de l'index en double toponymie. L'ensemble des toponymes de la carte (exceptés les villages) se retrouvent dans l'index. La liste en thaï et anglais est saisie par un professionnel à Bangkok, puis envoyée aux Editions des Voyages, où elle est classée par ordre(s) alphabétique(s), par rubrique, où chaque toponyme est « lié » au carroyage (et à la page, dans le cas de l'atlas). Cette liste de plus de 2000 mots est aussi celle qui sert aux cartographes qui placent les toponymes sur la carte.

L'équipe Thaïlande à Paris récupère des fichiers Mapinfo annotés. La mise en page est faite à ce moment-là, combinant la cartographie proprement dite avec l'index, la légende, la page de couverture et autres textes. Le dessin final de la carte est effectuée avec DRY.

Seul ce puissant logiciel de cartographie est en mesure de gérer les index, la mise en page, les systèmes de projection, les fonds rasters, le dessin vecteur et les objets textes. DRY est un logiciel de cartographie qui permet d'avoir un excellent rendu sur le papier.

Finalement, j'ai envoyé plus d'une vingtaine de tournées de 5 jours (en moyenne) vers Paris, 48000 km de route au total: cela peut représenter une grande quantité de données, mais qui ne vaut rien sans toute la thématique analysée et sélectionnée (exemples cités ci-dessus) qui fait la richesse des cartes Michelin.

La Thaïlande n'est pas une destination touristique de prédilection par



Fig. 4. Ciel bas sur les rizières de l'Isaan, pendant la mousson

hasard: les temples et parcs historiques, les plages, l'omniprésence de l'eau dans les rizières, les massifs montagneux sont à couper le souffle, pour les européens évidemment, pour les thaïs aussi. Bien sûr, au cours de ces tournées de levé, j'ai pu voir nombre de ces sites, et même m'y arrêter. Lors d'une visite de David Desbuisson (Topo 98 de l'ENSAIS lui aussi), alors en coopération à 2 heures de vol d'ici, au Bangla Desh, nous sommes montés vers le plateau de l'Isaan (i.e. le Nord-Est de la Thaïlande), en direction du Laos et avons pu voir le fameux Mékhong plein de légendes avec le Laos de l'autre côté.

Quelques mois plus tard, avec un autre ensaïssien Dev Saint-Auguste (GC 98), qui en Malaisie à ce moment-là, est venu me rejoindre à Bangkok par le train depuis Terengganu (22 heures de train en 3ème classe!). Ensemble, nous avons fait les « Routes khmères » (Highway nr. 226 et nr. 24), parsemées de temples khmers datant des 10-12ème siècles ap. JC, tous orientés vers l'est : le soleil levant signifie à juste titre l'Eveil. Le Phrasat Hin Phanom Rung et le temple de Phimai comptent parmi les mieux conservés. Même dans ces moments d'admiration - pas besoin d'être archéologue ou historien pour tomber sous le charme - on n'oublie pas sa formation et on aimerait tant travailler pour l'UNESCO, faire le levé de tous ces sites, à les intégrer dans un SIG s'étendant sur toute la région etc...

Si toutes les régions de Thaïlande ne sont pas aussi intéressantes, le travail n'a pas pu être répétitif ou ennuyeux pour autant : les 9 plans de ville ont demandé une toute autre approche du problème : plus de GPS à 100 mètres de précision, mais des photos aériennes fournies par le RTSD (Royal Thai Survey Department) ont servi de base à l'élaboration de ces plans. Ici aussi, le terrain reste une étape indispensable : un nom de rue, l'emplacement précis de tel temple ou du centre d'information touristique, le nom de tel hôtel ne se lisent pas sur une prise de vue aérienne. Le cas de Bangkok a bien sûr demandé plus de travail, où le rythme frénétique engendre des travaux d'infrastructures sans répit : expressways surélevés, métro, train aérien, échangeurs autoroutiers, ponts, nouvelles routes etc...

Après 15 mois - sans retour en France - de collecte d'information, et le travail fait à Paris par «l'équipe Thaïlande», la carte Michelin 965 de Thaïlande et l'atlas routier et touristique «Thailand» ont finalement vu le jour au 3ème trimestre de 2000. Le «coup du sort» de venir travailler ici a finalement bien aiguillé ma vie : j'écris cet article dans mon appartement, situé à deux pas de la station Ari (c'est où? C'est page 27, carreau HT), et travaille actuellement dans le domaine des SIG pour une autre société française à Bangkok.

Il y a 2 ans et demi, quiconque m'aurait dit que j'allais vivre en Thaïlande, je ne l'aurais pas cru, car cela ne m'était jamais venu à l'idée. Le fait est que la vie a un côté beaucoup plus léger ici, que le sourire et la bonne humeur sont deux expressions omniprésentes. Merci la 965. En vente dans toutes les librairies... ●



Bas relief du temple de Phimai

Merci pour votre aide.....

**Amis lecteurs,
le bureau de l'association Géomètres
Sans Frontières profite de la préparation
de l'assemblée générale ordinaire pour
vous rappeler les principes généraux qui
guident les actions de G.S.F. et pour
lancer l'appel de cotisation 2001...**

Rappels généraux

L'association se défend d'intervenir s'il y a risque de concurrence avec des bureaux, cabinets ou organismes qui travaillent dans le cadre de contrats rémunérés; elle essaie de prendre toutes garanties lorsqu'une intervention lui est demandée pour éviter de faire bénévolement ce qui dépend du secteur concurrentiel et n'intervient donc qu'auprès d'organismes eux-mêmes bénévoles ou sans caractère lucratif.

Tous les volontaires des missions G.S.F. sont intégralement bénévoles et ne perçoivent aucune rémunération; lorsque les missions risquent d'être trop longues et pénalisantes pour l'emploi du volontaire, l'association peut parfois, dans la limite de ses maigres moyens, remettre une indemnité.

L'association prend en charge le trajet aller-retour depuis Paris, les taxes d'aéroport et les assurances rapatriement ou annulation, éventuellement quelques faux frais sur place lorsque l'accueil n'est pas très bien assuré par nos correspondants locaux (taxi).

Le logement, la nourriture et les déplacements sur place sont assurés par nos correspondants demandeurs.

Les frais de passeport, vaccination, traitement anti paludéen restent à la charge des volontaires.

Lorsque cela est le cas, l'association prend en charge les surcoûts éventuels de transport de matériel ou de reproduction de documents (pour les enseignants en particulier).

Objectifs actuels

A l'occasion des deux dernières assemblées générales, il a été décidé de porter l'effort de l'association vers la formation et l'enseignement, sans pour autant répondre systématiquement par la négative à toutes les demandes d'intervention qui nous seraient adressées; les choix s'effectuent en fonction des disponibilités financières.

Aussi pour pouvoir répondre aux demandes avons-nous décidé en assemblée générale de conserver un fichier de tous les adhérents et volontaires potentiels avec leurs spécialités et même s'ils ne participent pas financièrement au fonctionnement par leur cotisation; nous pensons plus particulièrement aux étudiants et aux jeunes professionnels. Enfin compte tenu de nos ressources actuellement limitées aux adhésions et à quelques dons, nous avons cessé de participer à divers salons (forum d'Agén et autres) pour ne pas décevoir ceux qui attendaient une aide que nous ne pourrions assurer financièrement.



L'envoyé GSF Monsieur Hyvert prépare la mission en cours avec Monsieur Bab lors du séjour parisien de ce dernier.

Mission Bénin

Dans le droit fil de ces diverses décisions nos efforts portent en ce moment sur la mise en route d'un cycle supérieur d'enseignement de la topographie au Bénin, ouvert à tous les étudiants d'Afrique de l'Ouest.

Il nous faut trouver encore un volontaire pour assurer les derniers cours et travaux pratiques de topographie générale auprès d'élèves qui proviennent de DEUG maths et n'ont pas de connaissances en topographie.

Les premiers cours sont actuellement assurés par des étudiants de troisième année de l'ESGT et la personne que nous recherchons est un professionnel pratiquant la topographie sans nécessairement qu'il soit diplômé d'une école d'ingénieurs.

Date de réalisation : entre avril et fin juin 2001

Situation : au lycée privé Saint-Luc de COTONOU

Logement et couvert : par le lycée Saint-Luc.

Le bureau de l'association espère que son appel ne restera pas sans écho. ●

François Bodin, président

Adhésions 2001

Enfin n'oubliez pas de renouveler votre adhésion pour l'année en cours, seules vos cotisations permettent la réalisation des missions, l'intégralité du temps passé par les membres du bureau étant évidemment bénévole et gracieux... Merci d'avance au nom de ceux que vous nous permettrez d'aider.

Rappel :

Membre adhérent :	300 francs
Etudiant :	100 francs
Bienfaiteur :	500 francs

Comment faire un traitement Géodésique des mesures GPS

André Fontaine

Lettre adressée à C. Million suite à ses articles : "Les états d'âmes de M. Lambda" XYZ n°81 et "Les avatars du référentiel de géodésie" XYZ n°84. Epilogue.

Cher M Million

Je puis m'adresser à vous avec cette en-tête puisque dans votre dernière lettre vous avez «enlevé le très haut», en laissant tomber votre fausse barbe de Monsieur Lambda. Dans cette lettre, j'ai aussi appris grâce à vos patientes recherches que nous n'étions pas les seuls à avoir compris certains désagréments apportés par les coordonnées géométriques ; merci et donc continuons le combat. Je voudrais d'abord souligner un point essentiel sur lequel on a, pour ainsi dire, trompé les utilisateurs : il est très facile de faire de la géodésie avec le GPS ; ensuite, je répondrai à votre question sur les assemblées qui ont pris les décisions.

Traitement géodésique des mesures GPS

Ce problème ne présente pas la moindre difficulté, car ce qui fonde la géodésie ce n'est pas la nature des mesures de terrain qui de tout temps ont été géométriques (quoi de plus géométrique qu'une mesure de distance ou d'angle), mais la méthode de calcul particulière mise au point par les savants du 18^e siècle qui ont jugé normal de lui donner un nom nouveau « géodésie », puisque ce n'était plus de la géométrie.

Chacun le sait : la géodésie consiste à reporter sur un ellipsoïde les mesures de terrain ramenées au géoïde ; les angles mesurés au théodolite autour de la verticale vraie sont reportés sans correction en angles autour de la verticale géodésique, les distances mesurées au sol ou dans l'atmosphère sont, avant d'être reportées, corrigées et ramenées à ce qu'elles seraient si elles avaient été mesurées sur le géoïde. Pour les mesures GPS, on fait de même : on calcule, à partir d'elles, les valeurs de grandeurs sur le géoïde.

Je m'en excuse, je vais donner les équations qui résolvent le problème pour bien montrer leur simplicité mathématique. Elles n'ont rien de très original, on les trouve dans tous les traités de géodésie sous l'appellation de formules de la géodésie tridimensionnelle.

Soit un point de départ P de longitude et latitude géodésiques (M_0 , L_0) et soit la mesure en « GPS relatif » des écarts de coordonnées (ΔX , ΔY , ΔZ) avec le point suivant Q, on va calculer les coordonnées géodésiques de ce dernier.

Sachant que le produit scalaire de deux vecteurs et le module de leur produit vectoriel sont égaux au produit de leurs modules multiplié pour le premier par le cosinus de leur angle et pour le deuxième par le sinus, les formules sont particulièrement simples sous forme vectorielle. Dans les paragraphes suivants, on donnera aussi les expressions développées ; les vecteurs seront en italique minuscule et les scalaires en standard majuscule ou minuscule.

On définit les vecteurs :

q (ΔX , ΔY , ΔZ),

k (0, 0, 1) porté par l'axe du monde

v (v_1 , v_2 , v_3) porté par la verticale géodésique

$v_1 = \cos M_0 \cos L_0$

$v_2 = \sin M_0 \cos L_0$

$v_3 = \sin L_0$

On a naturellement $|k| = 1$ et $|v| = 1$

On calcule dans les coordonnées de vecteurs du plan horizontal

• e (e_1 , e_2 , e_3) suivant la direction de l'Est

$e = k \wedge v$

$e_1 = -v_2 = -\sin M_0 \cos L_0$

$e_2 = v_1 = \cos M_0 \cos L_0$

$e_3 = 0$

• r (r_1 , r_2 , r_3) perpendiculaire à la direction de Q

$r = q \wedge v$

$r_1 = v_3 \Delta Y - v_2 \Delta Z$

$r_2 = v_1 \Delta Z - v_3 \Delta X$

$r_3 = v_2 \Delta X - v_1 \Delta Y$

On voit facilement que

$D = |q|$

$\text{tg } A = -|e \wedge r| / (e \cdot r)$

$\text{tg } S = q \cdot v / |q \wedge v|$

$D^2 = \Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2$

$\text{tg } A = -r_3 / (v_1 r_2 - v_2 r_1)$

$\text{tg } S = (v_1 \Delta X + v_2 \Delta Y + v_3 \Delta Z) / (r_1^2 + r_2^2 + r_3^2)^{1/2}$

D	distance rectiligne des deux points
A	azimut géodésique du point suivant
S	site du point suivant

On est donc revenu aux trois mesures données par un théodolite avec géodimètre incorporé ; le géomètre n'a plus qu'à appliquer les corrections dont il est coutumier. On remarque qu'on obtient directement l'azimut géodésique du point suivant au lieu de l'angle avec une direction de référence, il n'y a plus la fameuse inconnue G_0 d'orientation du tour d'horizon. Pour la distance, il s'agit de la distance rectiligne et non de la longueur de l'arc suivi par les ondes électromagnétiques, la correction consiste à passer de la corde à l'arc de cercle, puis, à partir des alti-

tudes, à calculer comme d'habitude la longueur à l'horizontale et enfin au niveau zéro.

Ce processus est très bien adapté au problème que se pose, par exemple, le port autonome de Dunkerque, car, en même temps qu'il donne les coordonnées géodésiques du bateau sondeur, il n'y a plus de difficulté pour intégrer les travaux antérieurs ; en effet, même si ces derniers sont de précision inférieure, ils sont de même nature et le passage d'un réseau géodésique à un autre est une opération justifiée et facile. Comme vous le remarquez dans votre lettre, les utilisateurs devront dans la plupart de leurs chantiers revenir à la géodésie.

Le pouvoir des mots

Vous vous posez la question de l'attitude des représentants des géomètres-topographes au moment des décisions. A mon avis, ils sont excusables de ne pas avoir vu le changement de nature du référentiel, car les représentants de l'État ont été tout aussi aveugles, alors qu'ils auraient dû être les plus compétents en cette matière. Après coup, je crois que la question intéressante est surtout de comprendre pourquoi une vérité scientifique aussi simple (en plus révélée par l'emploi de la hauteur du géoïde au dessus de l'ellipsoïde, grandeur inutile dans le calcul des coordonnées géodésiques) a été niée par les spécialistes.

J'y voit surtout l'effet des habitudes et du vocabulaire. Pendant plus de deux siècles, le calcul des coordonnées à la surface de la Terre a été décomposé en deux parties : l'élaboration de réseaux géodésiques de référence et l'interpolation au sein de ces réseaux par des méthodes strictement géométriques. Les réseaux géodésiques devaient être les plus précis possibles et d'une densité telle que l'interpolation puisse s'effectuer localement en supposant le géoïde comme plan. Il en est résulté que ceux qui avaient la charge des réseaux ont pris le nom de géodésiens tandis que les autres se sont appelés des géomètres. Vocabulaire parfaitement justifié, les uns faisant de la géodésie et les autres de la géométrie.

Mais peu à peu les premiers se sont considérés comme des savants à la recherche d'une précision de plus en plus grande pour laquelle l'État mettait à leur disposition les moyens appropriés. La précision est devenue leur marque distinctive et en même temps celle de la géodésie. Aussi quand sont apparus des moyens nouveaux très précis, ils n'ont jamais douté qu'ils continuaient à être des géodésiens tandis que ceux qui employaient les mêmes moyens avec

moins de précautions, restaient des géomètres. On le voit très bien dans l'article « L'impact en géodésie des systèmes de radionavigation par satellites GPS et GLONASS » (XYZ n°84), où Pascal Willis distingue les applications précises, qualifiées de géodésiques et dévolues aux géodésiens, des applications standards laissées aux utilisateurs.

Dans ces conditions, affirmer que la méthode employée pour le calcul du réseau de base est de la simple géométrie est un crime de lèse-majesté pour des géodésiens qui se voient dépossédés de l'auréole de savants portés par leurs prédécesseurs. Un réflexe psychologique profondément humain et une absence de réflexion sur la méthode géodésique, qu'ils pratiquaient depuis toujours, comme Monsieur Jourdain la prose, sont, à mon avis, l'explication de leur aveuglement. Sans compter que ceux qui ont tenté de leur ouvrir les yeux avaient un âge tel qu'on pouvait facilement les considérer comme des conservateurs rétrogrades nostalgiques d'une jeunesse révolue ou, plus brutalement dit, comme des «vieux cons», chacun préférant ne pas entendre le message «d'un qui balance entre deux âges : l'âge ne fait rien à l'affaire».

Comme on ne peut pas parler de deux entités différentes avec un seul mot, il me semble que la première urgence est de se mettre d'accord sur un vocabulaire qui recouvre correctement les concepts. C'est l'objet de mes résolutions à la Section de Géodésie de l'UNFGG. Pour les coordonnées du réseau de base actuel, je propose de les qualifier de «géométriques» mais sans être fermé à tout autre adjectif. Le plus difficile est en fait de préserver la susceptibilité des géodésiens et de trouver un nouveau mot qui les distingue des géomètres tout en disant qu'ils font de la géométrie. J'ai pensé à «géométristes», puisqu'ils sont pour ainsi dire attachés à la pratique d'une géométrie ultra-précise. Toute autre proposition de mots plus parlants serait la bienvenue ; il faut un adjectif pour les coordonnées et un nom qui heurte le moins possible les géodésiens.

Il y a aussi la solution que je propose depuis maintes années : que les géodésiens continuent à faire de la géodésie et calculent les coordonnées géodésiques du nouveau réseau de base à partir des mesures GPS, en plus de leurs coordonnées géométriques. Je pense, en effet, que ces deux types de coordonnées sont indispensables pour couvrir toutes les applications modernes de l'information géographique.

Je vous prie de croire, mon cher Million, à toute mon amicale reconnaissance pour votre engagement sur le chemin d'une vérité scientifique qui, on ne sait trop pourquoi, est parsemé d'épines. ●

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

REPERTOIRE DES ANNONCEURS - N° 86

TRIMBLE/SPECTRA	1 ^{er} couv.	ENSG	20	NAV SAT	58
ORTECH	2 ^e couv.	GEOID	34	NIKON	2
GÉO MEDIA	3 ^e couv.	GEOIMAGE	63	MICAD	31
TOPO CENTER	4 ^e couv.	GEO MEDITERRANEE	48	PENTAX	21
AERIAL	42	HEWLETT PACKARD	encart	REIS STOLZEL	36
AEROSCAN	57	HITACHI	43	SOPPEC	6
ECOLE CHEZ SOI	52	LEICA	8	TPTECH	4

La modernisation de G.P.S.

Claude Million

Il arrive, de temps en temps, qu'on soit amené à parler de la modernisation de GPS en termes de prospective, et que les prévisions données soient aussitôt démenties par des actes politiques, tels que l'oubli, dans les budgets, de financer les actions prévues à cette fin. Il arrive aussi que les calendriers s'accélèrent pour des raisons en apparence inconnue.

Bref, tout cela fait désordre, même quand on apprend brusquement, le 02 Mai dernier (2000) à 04 h TUC, que l'accès sélectif (S.A) a été supprimé par une décision du Président des Etats-Unis, alors que cette décision qui n'était attendue que dans deux ans, au plus tôt, avait des chances d'être repoussées indéfiniment aux calendes grecques.

Rappelons que l'accès sélectif (S.A) introduisait une erreur volontaire de 25 m, en plus de l'indécision normale, sur les mesures des pseudo-distances par le code G P S, due aux erreurs introduites par une mauvaise connaissance de l'atmosphère (ionosphère et troposphère), aux horloges (récepteur et satellite), au «bruit» du récepteur, et aux multi-trajets accidentels. Cette erreur sur les pseudo-distances, avec une dilution de la précision horizontale (H D O P) de 2, et pour une probabilité de présence de 95%, donnait un cercle d'imprécision volontaire de 100 mètres.

Sa suppression, dans les mêmes conditions, réduit le bilan à une indécision comprise dans un cercle de 10 ou 20 mètres, pour un point isolé, selon qu'on veille ou non se couvrir d'éventuels déboires. Ceci ouvre des possibilités considérables pour les usagers les plus courants. Il se trouve que pour les usages «professionnels» cela n'est pas suffisant. Disons déjà que le poste le plus important de ce nouveau bilan vient d'une connaissance insuffisante de l'ionosphère, ce qui fait que sur un vecteur de points suffisamment voisins cette erreur s'annulerait presque, ramenant le cercle d'indécision sur le vecteur D G P S entre 2 et 5 mètres, ce qui commence à éveiller l'intérêt des professionnels, surtout qu'en lissant le code par la phase¹, on peut alors atteindre 0,10 à 0,20m en quelques minutes, avec deux appareils portatifs dont le coût total ne dépasserait pas 10 000FF.

Toutefois cette mesure d'importance ne vise pas à avantager les campeurs ou les randonneurs, pas plus que les topographes aux échelles moyennes. Elle fait partie d'un plus vaste programme de modernisation de G P S en direction des usagers civils essentiellement pour la navigation aérienne. Mais, comme cela s'est déjà produit dans le passé, la communauté des topographes et des géodésiens va en profiter, probablement pas en termes de précision, mais dans un allègement du prix et du poids des appareils, menant à une plus grande diffu-

sion du procédé.

Que s'est-il passé ?

Comme on l'a remarqué plus haut, la modernisation de G P S, faisait l'objet de déclarations d'intentions, rarement suivies de financements appropriés notamment en faveur du Ministère des Transports des Etats-Unis (D o T), quant aux militaires leurs soucis dus à la réduction globale des crédits de la Défense leur interdisait tout acte de générosité en direction des civils. Seulement, les systèmes civils d'aide à la navigation aérienne autres que G P S commençaient à vieillir ce qui imposait leur remplacement qui, même à terme, coûtera beaucoup plus cher que la modernisation de G P S pour le rendre assez précis pour, non seulement l'aide à la navigation qui est pratiquement acquise sans frais, mais aussi pour l'aide à l'atterrissage des avions. Or ceci intéresse non seulement les civils mais aussi les avions d'armes.

Aux Etats-Unis la navigation côtière de précision était assurée par les émissions de corrections différentielles D G P S des garde-côtes, cette mesure pourrait être étendue à l'ensemble du territoire. Quand on sait que la France suit avec quelques années de retard, on peut espérer que l'ensemble du territoire pourra, un jour, bénéficier d'un service étendu, lui aussi, à l'ensemble du territoire Français.

Les modernisations attendues

Mais l'essentiel des modernisations attendues, avec, cette fois-ci, de très grandes chances de réalisation, réside dans un ensemble de mesures qu'on a déjà évoqué dans ces lignes, mais qui peuvent être sérieusement considérées comme très probables :

1 - La mise en place d'un signal «civil» sur L2, ce qui permettra, en formant une combinaison linéaire des observations de code sur L1 et sur L2, aux usagers civil de cor-

riger les erreurs dues à une mauvaise connaissance de l'ionosphère éliminant l'erreur correspondante qui ne laisserait qu'une indécision de 6 à 11 m dans le bilan de la détermination du point isolé, indécision qui pourrait, d'ailleurs, être réduite de moitié en utilisant des éphémérides précises.

2 - La mise en place d'un troisième signal civil dit L5 qui permettra de déterminer plus facilement, et plus rapidement, avec des moyens moins coûteux, les ambiguïtés entières de la phase de la porteuse², ce qui améliorera, au moins, d'un facteur 10 la précision attendue sur les distances satellites-récepteur. Ce dernier signal sera composé de deux émissions l'une en phase (I) qui restera pure, l'autre en quadrature (Q) qui portera le code et les messages :

Précision, Santé, horloge et éphémérides, corrections ionosphériques et paramètres de corrections de l'horloge du satellite en temps T U C, Almanach du satellite, message.

Ce qui fait que pour utiliser la phase pure on n'aura nul besoin d'éliminer le code et les messages comme on est obligé de le faire, par multiplication, sur les autres longueurs d'onde L1 et L2. Le résultat sera un signal très puissant, pouvant, éventuellement, traverser les feuillages des arbres.

Globalement, l'objectif visé par l'installation de ce signal sur les satellites de l'avenir, est de faciliter les opérations de Cinématique en Temps Réel (R T K) sous les arbres.

3 - La mise en place de stations de poursuite plus nombreuses ce qui améliorera la précision des éphémérides radiodiffusées, ce qui nous renvoie en 1° pour l'amélioration à attendre des éphémérides précises.

Il faut dire que la situation actuelle n'était guère brillante, puisque les éphémérides radiodiffusées étaient les moins précises de toutes celles disponibles, tout en étant, il faut tout de même le souligner, les plus fiables de toutes.

Le calendrier de réalisation

Le calendrier de réalisation de ces améliorations suit de très près le calendrier de lancement de Galileo, à un point tel qu'on est en droit de s'interroger pour savoir si ce n'est pas ce projet Européen qui a bousculé une décision politique, mais surtout financière, qui était très attendue, mais qui tardait à être prise parce que d'autres priorités s'imposaient. On peut de même s'autoriser à penser que la modernisation de G P S entraînera inévitablement la mise en place de Galileo suivant le calendrier prévu, et même, peut-être, plus vite. Il est évident, d'après les publications Américaines, que les craintes sont que l'Europe ne leur refasse, pour G P S, le «coup d'Airbus», en tout cas ce sont, au moins, et même si on n'y croit pas, des arguments avancés pour obtenir des crédits de modernisation. Du côté Européen on n'est pas en reste, les craintes sont que le marché mondial de GPS soit définitivement Américain et ne laisse que des miettes à l'Europe. Si cet état d'esprit subsiste les deux programmes avanceront de concert pour, comme on dit en matière de football, se «marquer», et ne concéder aucun avantage à son concurrent.

Comme par le passé, notre profession en verra, de ce simple fait auquel elle ne participe pas, ou si peu, toute sa vie technique et sociale modifiée. ●

Références

1) C. Million **Traitement des mesures G P S monofréquences pour la trajectographie** in XYZ n°71 1997-2.

2) C. Million **GPS quel avenir ?** in X Y Z n°75 1998-2

ION GPS 97 B.FORSELL et al : **Résolution des ambiguïtés de phase dans GNSS2** cité dans X Y Z n°74 1998-1

ION GPS 98 U.VOLLATH et al : **Analyse de la technique de résolution des ambiguïtés sur trois porteuses pour la radiolocalisation en G NSS2** cité dans X Y Z n°79 1999-2