

# xvz

Éditée par l'  
Association  
Française de  
Topographie  
**n°97**

## HISTOIRE

Les routes royales  
et leurs bornes milliaires



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

**GÉODÉSIE :**  
Transformation  
dans le Système  
R.G.F 93 de la  
base de données  
géographiques  
de la Ville de Nice  
p. 56

**ADS40 Leica : une caméra  
numérique en pleine maturité**

## Directeur de la publication

André Bailly  
Ingénieur Géomètre ETP

## Directeur adjoint de la publication

Emmanuel Natchitz  
Enseignant Chercheur ESTP

## Rédaction et administration XYZ

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

## Rédacteur en chef

Emmanuel Natchitz

## Comité de Rédaction

Pierre Grussenmeyer  
Maître de Conférences - ENSAIS  
Bertrand Ravez  
Responsable de service Topographique  
Bouygues TP

## Responsable du site internet

Tania Neusch

## Conseil d'orientation scientifique

Jean Bourgoin  
Ingénieur Général Hydrographe ER  
Robert Chevalier  
Géomètre-Expert DPLG  
Suzanne Débarbat  
Astronome Observatoire de Paris  
Raymond d'Hollander  
Ingénieur Général Géographe - IGN  
Jacques Riffault  
Directeur Commercial  
Robert Vincent  
Ingénieur ECP  
Dr Pascal Willis  
Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées.

## Publicité

Robert Chevalier

## 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<sup>er</sup> trimestre 2003 ISSN 0290-9057  
N° CPPAP : 0903 G 80866

## Tirage de ce numéro : 2 500 ex

## Abonnement annuel

France CEE : 73 €  
Étranger (avion, frais compris) : 76 €  
Les règlements payés par chèques  
payables sur une banque située hors de  
France doivent être majorés de 10 €  
le numéro : 20 €

Le bulletin d'adhésion est en p. 85

Membre du SPCS Syndicat de la Presse  
Culturelle et Scientifique

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

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

Membre de la FIG (Fédération Internationale des Géomètres) 

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

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

## ■ Editorial ..... 5

## ■ Info-Topo

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

## ■ Manifestation

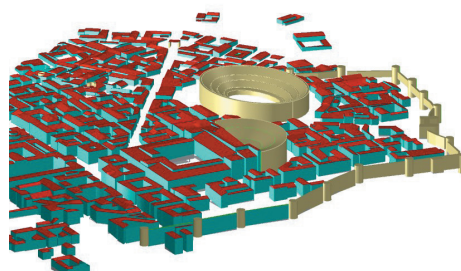
> Les Journées de la Topographie 2003 ..... 25

> Intergeo®, rendez-vous automnal  
des topographes de tous horizons ..... 26

> La Conférence annuelle MENSI  
les 14 et 15 octobre 2003 ..... 29

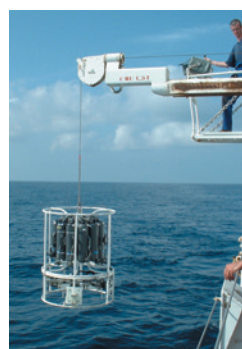
## ■ Photogrammétrie

> ADS40 Leica :  
une caméra numérique en pleine maturité  
Nathalie PISOT et Sylvain GEVREY ..... 32



## ■ Techniques nouvelles

> Modèles et méthodologies de saisie  
pour maquettes numériques 3D  
Mathieu KOEHL ..... 37



## ■ Géodésie

> L'Institut Français  
de Navigation :  
50 année d'avancées  
spectaculaires  
des géosciences  
au service des  
navigateurs  
Jean BOURGOIN .. 47

> Transformation dans le Système R.G.F 93  
de la base de données géographiques  
de la Ville de Nice  
Ludovic ANDRES ..... 56



## ■ Histoire

> Les routes royales et leurs bornes milliaires  
Robert VINCENT ..... 65

## ■ Topo vécue

> La Chine s'éveille  
Paul COURBON ..... 75

## ■ GSF

> L'eau doit bien couler...  
François BODIN ..... 77

## ■ Art et Géométrie



> André Maigne : La fontaine des Agials  
Jean-Pierre MAILLARD ..... 78

## ■ Livres ..... 80

## ■ 4 x 4

> NISSAN X-TRAIL : La fine fleur du 4x4  
Robert CHEVALIER ..... 83

Pour la recherche de nos annonceurs  
consulter la page 81.

## Topographie ou Géomatique ?

*L'AFT a pour vocation de promouvoir les techniques de la topographie. Depuis sa création notre association a suivi l'évolution des méthodes de positionnement dans l'espace en créant un trait d'union entre les producteurs et les utilisateurs des sciences géographiques.*

*Ce lien se fait évidemment par notre revue XYZ mais aussi par toutes les publications qui sont régulièrement éditées par l'AFT.*

*D'aucuns pensent que le terme de topographie devient de plus en plus synonyme de techniques anciennes. La modernisation de nos métiers, l'introduction de nouveaux systèmes de mesures, des procédés de calculs de plus en plus informatisés et le développement croissant des représentations numériques en 3D rendent il ce terme désuet ?*

*La modernisation des sciences géographiques conduit à remplacer ce « vieux » terme par celui plus moderne de Géomatique.*

*Peux-t-on vraiment parler de révolution par ce simple changement d'appellation ?*

*La réponse n'est pas si facile à trouver. Effectivement les techniques modernes relèguent le plan manuel à la préhistoire de la représentation graphique. Les techniques de DAO et encore plus l'usage des SIG créaient une facilité de transmission et d'analyse de l'information. Mais est ce réellement une révolution ou simplement une évolution ?*

*A l'heure où la rentabilité est synonyme de vitesse de réaction, comment concevoir de ne pas utiliser les dernières technologies ? Pourtant même les logiciels les plus performants ne sont qu'une systématisation des procédés de calcul classique. Il est important de garder à l'esprit que l'algorithme de calculs dépend des compétences topométriques et cartographiques des programmeurs. Sans une solide formation, les concepteurs ne pourront créer qu'une boîte vide sans garantie de résultats pour l'utilisateur.*

*Un nouveau débat est lancé. Doit on faire évoluer le nom de notre association ? Le conseil de l'AFT a entamé une réflexion à ce sujet.*

*Mais utiliser un nouveau terme oblige à en connaître sa définition. Géomatique est comme tous les nouveaux mots, un terme à multiples interprétations. La définition de la GEO-graphie qui intéresse l'AFT est le positionnement dans l'espace des éléments et non l'usage fait par les sciences humaines.*

*C'est peut être un nouvel objectif pour l'AFT : proposer une définition fédératrice aux utilisateurs du terme magique de Géomatique.*

*A vous de vous prononcer !*

**Emmanuel NATCHITZ**  
Rédacteur en Chef

## ADS40 Leica : une caméra numérique en pleine maturité

### ISTAR : une société française au savoir-faire confirmé

■ Nathalie PISOT et Sylvain GEVREY

*Cet article fait suite à deux articles parus dans la revue XYZ, dans le N° 86 de février 2001 exposant le concept de l'ADS40 et dans le N° 89 relatif à l'aérottriangulation avec l'ADS40. Ce troisième volet fait le point, suite aux ventes importantes d'ADS40, sur la production assurée par les possesseurs d'ADS40 en particulier au travers de l'expérience d'ISTAR dans le traitement automatisé des données numériques.*

**D**eux sociétés ont développé une vraie complémentarité dans le domaine de l'acquisition et du traitement des données aériennes numériques, Leica Geosystems et ISTAR, en particulier autour du concept de capteur pushbroom choisi par Leica Geosystems pour sa caméra ADS40. Les deux sociétés ont validé en 2002 la compatibilité entre leurs technologies respectives et travaillent désormais de concert à dynamiser ce segment prometteur.

### La caméra ADS40 et le concept du pushbroom



Revenons brièvement sur le concept de l'ADS40 pour le différencier de la solution matricielle que d'autres constructeurs ont choisie. Leica Geosystems a adopté ce concept en 1997, après avoir exploré avec les fabricants de matrices les avancées possibles sur le plan industriel. En 2003, il n'existe toujours pas de

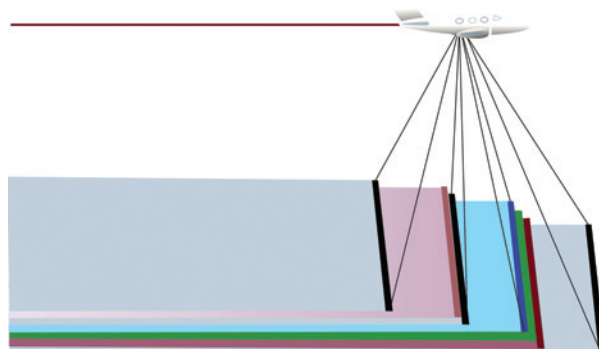
matrice supérieure à 9 000 x 9 000 pixels ; or les besoins spécifiques à la cartographie exigent au moins 10 000 à 12 000 pixels, voire plus. Si Leica Geosystems a choisi une solution qui a été validée, notamment par les plus grands opérateurs de satellites (SPOT IMAGE, Space Imaging, Digital Globe) c'est que, d'une part le concept paraissait mûr pour l'industrialisation, et que d'autre part, le DLR (Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt) associé au développement de la partie électronique et du concept, avait un savoir-faire expérimental étendu. Pour résumer, l'ADS40 peut assurer une prise de vue simultanée en panchromatique (24 000 pixels sur chacun des trois angles de visée : avant, nadir, arrière), et en infrarouge et RVB (couleur) avec 12 000 pixels. La mise en produc-

tion industrielle de l'ADS40 n'a pas été simple, mais les ingénieurs de Leica Geosystems et de DLR ont résolu tous les problèmes majeurs que d'aucuns pensaient insurmontables : stockage et vidage du flux de données, stabilisation de la caméra, trajectographie GPS et senseur inertiel couplés, calibrations géométrique et radiométrique et reconstruction d'une image métrique rectifiée compatible avec les exigences de précision de la cartographie. En un mot, ça marche. Notons que Leica Geosystems n'est pas seul à avoir appliqué ce principe de barrettes CCD à une caméra aérienne : DLR l'a mis en œuvre avec la HRSC ainsi que Starlabo Corp au Japon avec STARIMAGER (TLS - Three line Scanner). Actuellement, l'ADS40 est le seul capteur numérique commercial de ce type.

Les ventes actuelles de Leica : il apparaît une vraie coupure entre l'Europe et les autres grands pays. Douze ADS40 ont été vendues à ce jour et sont en pleine exploitation. Aux USA : EarthData (2), Delorme, DAS-Digital Aerial Solutions ; au Canada : North West Geomatics (1) ; au Japon : Pasco (3) ; en Colombie : Airforce (1) ; en Russie (2) ; en Australie (1). Cinq à six autres ADS40 doivent être livrées prochainement. L'Europe avec une ADS40 commandée par CGR (Italie) attend ou plutôt espère voir démarrer certains grands projets. Notons au passage que certaines ADS40 sont couplées à un LIDAR ALS50 Leica (Delorme USA et PASCO Japon) afin d'exploiter au mieux la complémentarité de l'image numérique, la précision altimétrique du laser et sa rentabilité (thème du colloque Pixels et Cités).

### Le traitement des données

Leica Geosystems et ISTAR n'ont pas attendu cette année pour échanger leurs vues en la matière. ISTAR possède en effet un savoir-faire reconnu et une très grande expérience dans le trai-



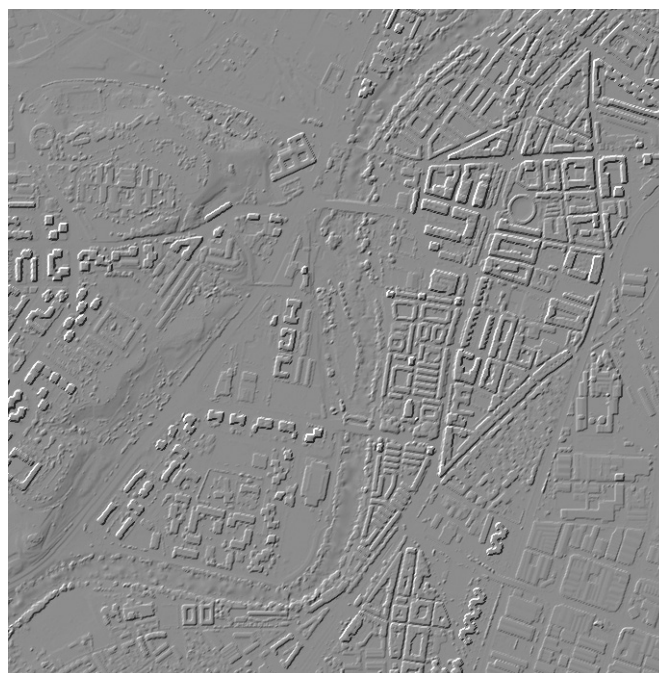
Configuration type de l'ADS40, N&B, Couleur et NIR

tement des images numériques, d'abord pour s'être concentré depuis des années sur le traitement de l'imagerie satellitale (SPOT et autres capteurs) et pour avoir été pionnier en étendant cette expertise au domaine de l'imagerie aérienne, notamment autour des capteurs pushbroom en collaboration avec le DLR, ISTAR ayant finalement conçu une chaîne de production apte à traiter tout type d'imagerie. Dans un premier temps, Leica Geosystems et ISTAR ont validé le traitement des données ADS40 : en octobre 2002, Leica Geosystems a mis à la disposition d'ISTAR une ADS40 pour tester et établir la compatibilité des flux de données avec la chaîne de calcul d'ISTAR, ainsi que pour mesurer la qualité de la géométrie et de la radiométrie. Notons aussi que Leica Geosystems a mis à disposition de l'IGN un laser aéroporté afin de valider le concept, la puissance et la précision du LIDAR Leica.

Suite au succès de ce test, ISTAR s'est employé à réaliser les développements nécessaires pour adapter sa suite logicielle aux spécificités des caméras ADS40 afin de mettre en œuvre un outil de production industriel particulièrement performant. Arrêtons nous un instant sur les points forts de ce procédé ainsi que sur ses différences avec les technologies classiques de la photogrammétrie avant de détailler les produits qui en résultent, non sans avoir rappelé, au préalable que la capture directe des images en format numérique par l'ADS40 supprime les étapes de développement des films et de leur scan, réduisant ainsi les temps et coût de traitement, mais aussi les risques d'altération de la qualité de la donnée initiale (radiométrie notamment).

L'étape d'aérotriangulation, première étape de la production proprement dite, fait appel aux données enregistrées par la centrale inertielle et le système de positionnement D-GPS embarqué lors de l'acquisition, qui permettent de connaître avec une grande précision la position et les mouvements de l'avion pour chaque ligne acquise. Ce système, ainsi que la géométrie linéaire de la caméra (acquisition selon de longues traces et non pas selon une succession de clichés) permet de réduire de façon drastique le nombre de points d'appuis nécessaire à cette étape de calibration géométrique : ainsi, moins d'une dizaine de points GPS par journée d'acquisition est nécessaire pour assurer une précision planimétrique de l'ordre du pixel en tout point du chantier.

L'étape suivante est celle de la création du modèle numérique d'élévation, qui servira à la correction géométrique des données pour le calcul des orthophotographies. Cette étape, fondamentale quant à la précision planimétrique des données finales, est réalisée de façon entièrement automatique par corrélation de couples stéréoscopiques. Cette méthode, issue des techniques développées pour le traitement d'images satellite, permet d'obtenir une information d'altitude pour chaque point du territoire, et non pas uniquement pour les points choisis par un opérateur. Dans le cadre du traitement d'images aériennes, les calculs sont faits non pas pour un couple par point, mais pour chaque couple disponible pour chaque point (on parle alors de corrélation multi-stéréo), tirant parti ainsi du recouvrement latéral choisi pour le plan de vol, mais aussi, et surtout, du taux de recouvrement longitudinal



**DSM de Valladolid (ombré)**

de 300 % spécifique au concept pushbroom et aux trois visées (avant, nadir, arrière) de l'ADS40. Au final, la densité et la précision de l'information obtenue ne sont plus proportionnelles à la ressource opérateur disponible, mais présentes et homogènes sur l'ensemble de la zone traitée, et ce en quelques dizaines d'heures de calcul par journée de vol seulement. Les résultats obtenus démontrent une précision altimétrique tout à fait comparable à celle qu'on atteint avec des acquisitions au moyen d'un LIDAR, ce qui ouvre d'intéressantes perspectives dans le domaine de l'acquisition combinée orthophotographie/modèles 3D.

Comme tout modèle issu de corrélation de données stéréoscopiques optiques, ce modèle d'élévation restitue non seulement les informations d'altitude du sol, mais aussi celles du sursol (bâtiments, ponts, végétation, etc.). Selon le type d'orthophotographie à produire, il devra donc être post-traité de façon à en extraire un modèle numérique de terrain (c'est-à-dire de l'altitude du sol uniquement, lorsqu'on cherche à produire une orthophotographie sans correction géométrique des superstructures) ou pourra être utilisé tel quel, notamment dans le cas de la production d'orthophotographies "vraies", c'est-à-dire dans lesquelles l'ensemble des superstructures doivent être redressées.

Dans les deux cas, le calcul de l'orthophotographie, dernière étape de la production, est lui aussi entièrement automatisé. Seul le mosaïquage entre traces et entre journées d'acquisition (dans le cas d'ortho "sol") ou entre journées d'acquisition uniquement (dans le cadre d'orthoimages vraies) doit être supervisé par un opérateur. Là réside un second avantage majeur du couplage ADS40/chaîne de traitement ISTAR : la possibilité de produire de façon automatique une orthophotographie "vraie" sur plusieurs centaines, voire milliers de kilomètres carrés à des coûts et en des temps raisonnables, ouvrant ainsi

■■■ la voie à de nouvelles applications en domaine urbain notamment (digitalisation des contours de bâtiments, des trottoirs, etc. en 2D, à l'aide d'un outil SIG par exemple).

L'outil de production est pleinement opérationnel depuis 1999 dans les locaux d'ISTAR à Sophia Antipolis, mais également aux Etats-Unis. Au cours de l'été 2003, ISTAR a en effet équipé son partenaire EarthData d'une unité de production particulièrement performante puisque plus de 250 000 km<sup>2</sup> ont pu être produits par EarthData depuis le mois d'août dernier, notamment dans le cadre de la couverture du Nebraska pour l'USDA, mais aussi pour l'USGS ou encore les autorités de l'Etat de Caroline du Nord, qui ont demandé la réalisation en urgence d'une couverture d'orthophotographies à 60 cm de résolution pour évaluer les dégâts causés par le passage du cyclone Isabelle en septembre dernier.

En Europe, malgré que les ventes de caméras commencent à démarrer, la demande des utilisateurs finaux est là. ISTAR a ainsi travaillé cet été avec une des caméras de son partenaire nord-américain EarthData pour honorer les premières commandes, portant toutes sur de l'orthophotographie vraie, accompagnée dans plusieurs cas de fourniture de données 3D. Ainsi ont été réalisées les couvertures des villes de Montpellier et de Belfort en France, de Valladolid en Espagne ou encore de Mohl en Belgique. En Allemagne, ce sont 500 kilomètres le long de l'Elbe qui ont été cartographiés à des fins d'études environnementales, notamment dans le cadre de la prévention des risques d'inondation dans cette région durement touchée par ce type de catastrophe naturelle au cours de l'été 2002.

En Europe encore, un fait mérite d'être souligné. Le JRC (Joint Research Centre, centre de recherche scientifique et technique de la Commission Européenne), a lancé en 2002 un appel d'offres afin de valider une solution potentielle de saisie et traitement d'images numériques. ISTAR a été sélectionné et a choisi de travailler avec l'ADS40 qui a parfaitement rempli la mission demandée. Les conclusions du JRC communiquées en novembre 2003 sont très positives quant au potentiel de la technologie numérique pour répondre aux besoins de cartographie des Etats membres, notamment dans le domaine du contrôle agricole, ainsi que pour les applications cadastrales.



Valladolid Orthophoto couleur (ISTAR)



St Remy de Provence - Infra rouge (ISTAR)

## Un système mature et polyvalent.

On voit au travers de ces divers exemples que l'ADS40 est désormais entrée en pleine phase de production, et ce, parce qu'elle répond parfaitement à des besoins précis.

Lesquels ? Ces besoins sont sans nul doute variés, mais on s'arrêtera tout d'abord sur le fait que les possesseurs d'ADS40 ont choisi ce capteur numérique pour son rendement ainsi que sur son aptitude à enregistrer des données sol avec un pixel minimum de 15 cm. Notons au passage qu'au vu des énormes demandes en cartographie à grande, moyenne et petite échelles, l'ADS40 remplit parfaitement un créneau qui n'est pas encore du ressort des satellites. Les besoins de production de cartes sont immenses, que ce soit en cartographie générale ou en cartographie de précision. Un pourcentage infime des zones émergées bénéficie d'une cartographie classique, les pays les moins riches se passant de cartes à jour, outil pourtant indispensable à leur développement. L'ADS40 est une solution puissante qui peut contribuer à résoudre une partie des problèmes, et c'est pourquoi, de nombreux pays ont budgété l'achat d'une ADS40 pour remplir les tâches de cartographie qui leur incombent et qu'ils ne peuvent manifestement plus assurer avec les caméras classiques alliées au scanner, tant le retard grossit d'année en année. Et la possibilité offerte aujourd'hui de coupler ce capteur avec des outils de production industriels renforce encore les performances et le rendement d'un tel système "tout-numérique".

Les performances radiométriques de ce capteur sont également un atout indéniable pour les utilisateurs d'ADS40. Dans le domaine de la cartographie, on continue à séparer prise de vue en noir et blanc et prise de vue en couleur. L'ADS40 permettant l'acquisition simultanée de toutes les informations, y compris le proche infrarouge, en un seul vol, en pleine résolution, sans aucun surcoût, plusieurs pays nordiques désirent

Produit	Film N&B	Film IR	ADS40
Rouge		?	X
Vert		?	X
Bleu			X
IR		X	X
Panchro	X	X	X
RVB ortho			X
IR ortho		X	X
N&B ortho	X	X	X
C.Composites			X
Classification	?	X	X
MNT	X	X	X
MNE	X	X	X

adopter l'ADS40 pour, d'une part ses capacités évidentes à la télédétection (surveillance de l'état des forêts), mais aussi parce que le codage de la radiométrie sur 12 bits permet d'obtenir des images parfaitement lisibles dans des zones de contrastes extrêmes. Seul un capteur numérique est capable de saisir des nuances sur la glace et sur des ombres denses dans la même zone.

Leica Geosystems a ainsi mené en 2002 différents vols tests dans certains pays, dont la Norvège. En effet, divers organismes nordiques s'intéressent de très près à la prise de vue numérique afin de résoudre deux problèmes majeurs: le premier, consiste à pouvoir travailler rapidement avec un calage le plus approché possible en se passant d'aérotriangulation. C'est possible avec l'ADS40 qui met en œuvre le GPS aéro de précision et l'IMU d'Applanix. Le deuxième problème consiste à travailler à grande échelle et à pouvoir identifier très sûrement des zones boisées présentant certaines caractéristiques (par exemple des maladies...), en employant des logiciels de traitement d'image classiques comme IMAGINE de ERDAS. Jusqu'ici, le choix de l'émulsion d'un film aérien est fonction du but recherché (N&B, Infrarouge...). Les possibilités de traitement en aval en sont automatiquement limitées, d'autant plus que la phase de scan appauvrit toujours l'information extractible. L'ADS40 a démontré en Norvège combien la puissance d'acquisition simultanée en mode multispectral, N&B, IR permettait de résoudre ces problèmes. Les ingénieurs et techniciens entrevoient désormais la mise en œuvre de solutions rapides et puissantes.

Revenons aux possibilités ouvertes avec ce type de caméra. Il ne faut tout simplement pas oublier le processus de restitution qui permet à l'opérateur de saisir des vecteurs, avec superposition raster/vecteur en se servant de ses yeux et d'un périphérique 3D ou de manivelles. Tout programme de restitution (PRO600 avec Microstation V8,...) écrit pour la prise de vue aérienne peut être employé avec l'imagerie de l'ADS40, l'opérateur pouvant choisir les vues stéréo qui l'arrangent, avec la base la plus adaptée à son confort, par exemple en mélangeant une vue Noir et Blanc et la couleur. Il importe aussi de mentionner que l'opérateur travaille sur des segments plus ou moins longs et qu'il n'est pas obligé de recharger le couple suivant, d'où une possibilité de continuité dans la restitution.

Leica Geosystems a fourni à toute société en ayant fait la demande, le Kit de Développement de l'ADS40 avec des jeux de données. L'imagerie ADS40 n'est pas seulement exploitable avec les logiciels Leica ou ISTAR, mais aussi avec ceux de Z/I Imaging par exemple...

## Des caméras numériques et une chaîne en pleine production.

En résumé, le couplage capteur ADS40/chaîne de traitement ISTAR permet la réalisation de produits cartographiques dont la production était jusqu'ici difficile voire impossible à envisager sur de grandes surfaces tant en terme de coûts que de délais. Il en est ainsi de l'orthophotographie vraie, si utile dans les zones urbanisées de par l'exactitude et la précision de la représentation offerte. Notons que la possibilité technique de construire un capteur équipé de barrettes couleur au nadir (en décalant légèrement le panchromatique du nadir) permet d'améliorer les résultats sur les images couleur et de rendre cette production encore plus aisée.

Les modèles numériques d'altitude, dont le rapport précision/coût est sans doute le plus intéressant à ce jour, sont également un atout indéniable apporté par cette technologie, tant par le fait qu'ils permettent de générer des orthophotographies de très grande précision, que par leur utilisation potentielle en tant que tel, dans les nombreux secteurs d'applications faisant appel aux simulations ou calcul en 3D (environnement, aéronautique, défense, communication, etc.), sans pour autant oublier le processus traditionnel de restitution

Est-ce à dire que l'ADS40 et que les outils de production ISTAR ont réponse à tout ? Bien sûr que non. Est-ce à dire qu'une technique exclut les autres ? Encore non. Soyons pragmatiques.

Une technique nouvelle recouvre une autre et ne la périmé pas. Le temps de généralisation d'une nouvelle technique est grosso modo de 10 ans. L'accélération des techniques diminue le temps de "démarrage". Certains acteurs ont investi dans la caméra aérienne film classique puis en conséquence dans le scanner. L'amortissement des outils de production répond à certains critères économiques, voire, dans le domaine de la cartographie nationale, politiques. Il en sera de même pour la caméra numérique et ses applications au quotidien. ●

## Abstract

*The two companies, Leica Geosystems and ISTAR have developed complementary airborne digital data acquisition and processing systems especially designed around the 3-line push-broom data acquisition concept promoted by the Leica ADS40. In 2002 both companies validated the compatibility between their respective technologies and together worked to develop new data processing software in the promising fields of aerial triangulation, DTM, true orthophoto generation and vector data collection. These processes have proved to be so efficient that in combination with the ADS40, it is possible to conduct data capture over large areas in a very short time and to produce data sets of very high precision. ISTAR's professional approach and organization, their powerful data processing capabilities as well as the quantity and quality of the digital data airborne sensor collected with the Leica ADS40, are proof that the digital era in airborne acquisition and production is here to stay.*

# Modèles et méthodologies de saisie pour maquettes numériques 3D

■ Mathieu KOEHL

*La production de maquettes de quartier de ville pour la gestion en trois dimensions des zones urbaines se développe de manière remarquable depuis quelques années. Ces maquettes graphiques sont plus ou moins fines et précises selon leur mode de génération et le mode d'acquisition des données géométriques initiales. Cet article présente des méthodes de saisie, qui se fondent sur la photogrammétrie numérique, puis des méthodes de construction de telles maquettes. Les exemples traités sont les bâtiments pour lesquels les données saisies initialement sont les parties constitutives des toits, mesurées à partir de photographies aériennes. Les maquettes sont construites selon plusieurs modèles exposés dans ce qui suit.*

### ■ mots clés

Maquette 3D, acquisition de données, modèles géométriques, reconstruction automatique

**D**epuis de nombreuses années, les techniques d'acquisition et les processus de traitement informatiques évoluent et les limites d'utilisation pratique de processus et d'informations 3D sont constamment repoussées. Dans la plupart des cas et spécialement dans les cas de contextes urbains, l'utilisation d'objets géolocalisés tridimensionnels évoluent cependant relativement lentement. Ceci pourrait s'expliquer par l'habitude prise par certains gestionnaires de travailler avec des méthodes de réflexion surtout fondées sur une vision 2D. Les réflexes premiers consistent alors à développer des modèles 2D en leur offrant des extensions 3D. Même si les résultats semblent satisfaisants, l'approche est incomplète et réductrice. L'opportunité de travailler avec des données 3D permet de faire évoluer considérablement les objets traités et de ce fait, l'utilisation d'un modèle 3D se justifie, voire s'impose.

Les objets gérés dans un Système d'Information Géographique (SIG) sont par définition des objets géographiques, c'est-à-dire des objets localisés qui possèdent des caractéristiques géométriques et thématiques. De ce fait, le milieu urbain qui peut être géré par l'intermédiaire d'un SIG-3D comporte des objets dont la géométrie sera représentée en 3 dimensions. La littérature abondante sur les modèles urbains 3D définit les objets réels tridimensionnels importants pour la gestion, à

savoir, les bâtiments et le terrain sous forme de Modèle Numérique de Terrain (MNT). Ils peuvent être complétés par *la végétation, les voiries et réseaux de transport, les aménagements publics et les réseaux de télécommunication.*

### Quelles sont alors les applications ayant un réel besoin en données 3D ?

Parmi la diversité des applications se retrouvent notamment :

- la planification urbaine dans laquelle les aménageurs peuvent faire des simulations et des animations en utilisant des modèles 3D montrant clairement l'impact de leurs projets,
- la téléphonie mobile pour laquelle les ingénieurs peuvent déterminer les zones de couverture du réseau avec des modèles de propagation et visualiser les résultats en les drapant sur le terrain pour identifier les obstacles aux performances du réseau,
- l'archéologie, la conservation des monuments historiques pour la reconstitution de monuments, la cartographie de sites en 3D,
- le génie civil pour la production de scènes réalistes lors de la conception de grands projets de construction,
- la stratégie militaire,
- les gestionnaires de ressources naturelles,
- les gestionnaires de collectivités territoriales, etc.

Dans ces différents contextes, la définition et la confection de modèles de maquettes 3D élaborés constituent la

base géométrique 3D fondamentale. Dans ce qui suit sont présentés les différentes approches et concepts mis en œuvre au sein de l'équipe PAGE-MAP à l'INSA de Strasbourg et utilisés pour la réalisation de telles maquettes.

Le passage de la 2D à la 3D couplé à la transformation de données statiques en données dynamiques se traduira dans l'évolution de la génération de cartes par des scènes, des animations, des mondes virtuels, de la réalité augmentée.

## Les maquettes 3D, données géométriques pour les SIG 3D urbains

### ■ Objectifs

La simulation, la visualisation de représentations 3D de modèles urbains peut être réalisée avec de nombreux moyens mis à la disposition des différents acteurs du monde de la géomatique. Ces représentations 3D peuvent être obtenues en utilisant des moteurs de DAO, des modeleurs 3D, des applications ou extensions particulières de systèmes cartographiques ou SIG, des exportations dans des "visualiseurs" 3D de type VRML ou autres.

Mais ces simulateurs utilisent le plus souvent des extensions 3D construites à partir de paramètres complétant des données 2D ou à partir de données thématiques associées aux données 2D. Ainsi peut-on obtenir à partir des modules

■ ■ ■ de base inclus dans de nombreux logiciels des élévations 3D par extrusion de polygones 2D selon une hauteur prédéfinie. Ces représentations sont très utiles dans le cas d'analyses et de visualisations pour lesquelles la précision ou la fidélité des objets 3D réels modélisés n'est pas un facteur prépondérant. Ils peuvent être générés par l'intermédiaire d'outils rapides et performants (document obtenu en export, modes de visualisation particuliers, résultats d'un traitement), la troisième dimension pouvant représenter un phénomène (attribut) quelconque et notamment la hauteur des différents bâtiments.

En utilisant ce mode de génération pour la constitution d'une maquette géométrique 3D, le résultat obtenu reste pauvre et possède des qualités géométriques parfois très insuffisantes.

Les objectifs fixés pour l'étude consistent à réaliser des maquettes 3D géométriques et topologiques dont les qualités intrinsèques sont en rapport avec les utilisations futures qui en seront faites, à savoir, leurs utilisations dans le cadre de la gestion topographique du milieu urbain et leur intégration dans des Systèmes d'Information Topographique 3D (SIT 3D).

## Remarques sur les Systèmes d'Information Topographique 3D

L'utilisation d'un SIT pour la gestion du milieu urbain peut être très avantageuse dans le cas d'une échelle moyenne et en utilisant les capacités tridimensionnelles du système. Les objets du milieu urbain choisis ont tous des caractéristiques

particulières qui font que leur 3<sup>e</sup> dimension est aussi, voire plus importante que les deux premières dimensions planimétriques. En effet, ils sont caractérisés par des hauteurs importantes (comparables aux dimensions planimétriques), des parties en surplomb, etc. Il s'agit également de constructions artificielles nécessitant une modélisation plus complexes.

Mais le principe fondamental sur lequel repose la redéfinition d'un SIT particulier est l'échelle de travail en relation directe avec la précision recherchée. Cette dernière correspond à la précision de mesure que l'on peut obtenir en mettant en œuvre les principes de la photogrammétrie aérienne.

La nature des objets, tridimensionnelle et topographique, la précision de forme obtenue par les moyens de mesures photogrammétriques efficaces permettent ainsi de définir des SIT 3D.

Concernant la définition des maquettes 3D, l'accent est donc mis sur les caractéristiques, et notamment la précision, géométriques ainsi que sur sa structuration permettant son intégration ultérieure dans un SIT 3D.

Le système de génération de maquette n'est à l'origine pas destiné à la conception, mais certaines fonctionnalités de conception le complètent très efficacement.

Le but de la mise en place d'un tel système est de fournir des outils d'aide à la modélisation, d'aide à l'acquisition des données puis d'aide à l'intégration des données.

## ■ Caractéristiques de la maquette 3D

Pour suivre et atteindre les objectifs fixés pour la réalisation des maquettes 3D, et notamment en terme de qualité géométrique, il est nécessaire de partir de données géométriques mesurées à l'aide d'outils de restitution élaborés. Les méthodes d'acquisition et de mesure de données géométriques mises en œuvre se composent d'outils et d'une instrumentation de photogrammétrie numérique très performants.

En premier lieu, nous utilisons la photogrammétrie sous sa forme aérienne en utilisant des images aériennes des différentes zones du milieu urbain restitué. Les propriétés et caractéristiques des images utilisées sont en adéquation avec la précision de positionnement géométrique souhaitée et le degré de détail restitué ou reconstruit dans la maquette finale.

En second lieu, il est à noter que la phase de restitution reste manuelle, servie par un opérateur qualifié et formé aux différentes caractéristiques et prescriptions de la structure du modèle 3D recherché. Le cahier des charges précis comportant notamment une description des modes de restitutions détaillés des cas généraux et particuliers relève d'une importance particulière pour les traitements futurs du processus d'élaboration de la maquette.

La troisième caractéristique importante se retrouve au niveau de la modélisation fidèle des toits en utilisant une classification des éléments constitutifs.

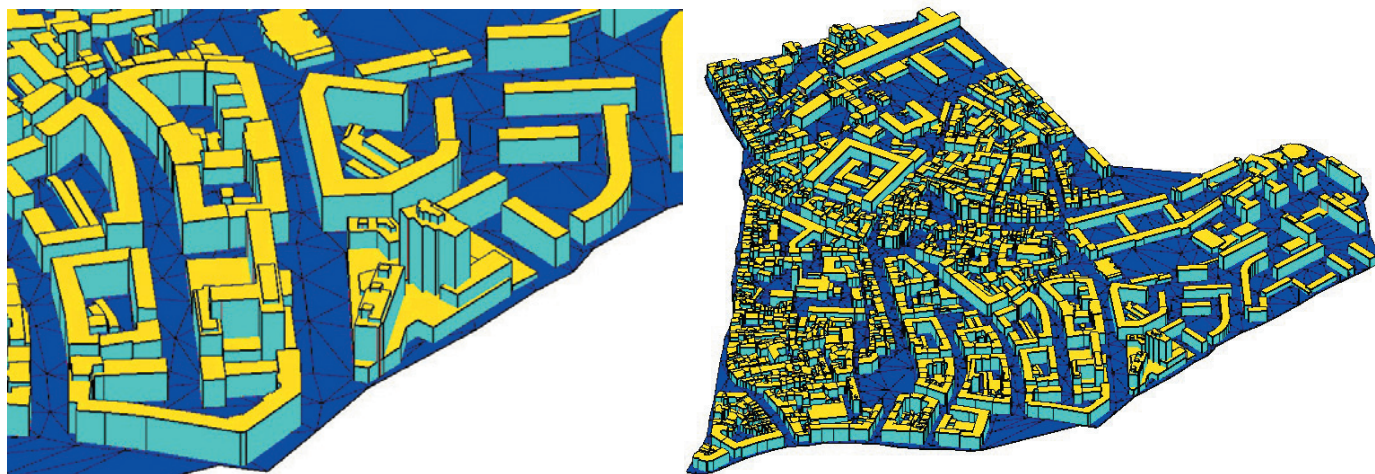


Figure 1 : Extrait de restitution d'un quartier de Strasbourg (Krutenu) pour la constitution d'un modèle de rugosité.

Une quatrième caractéristique de la maquette consiste dans le fait qu'elle sera générée automatiquement à partir de la structuration particulière évoquée précédemment. Cette reconstruction se fera selon plusieurs modèles disponibles mais se fondant sur les mêmes règles de restitution initiale.

Ainsi cette maquette sera-t-elle disponible sous la forme d'un modèle de surfaces (chaque surface indépendante) ou de solides (plusieurs surfaces formant l'enveloppe externe d'une même entité appelée solide) au sens des modèles de DAO. La dernière caractéristique importante à noter est que la maquette "repose" sur une surface de référence qui est constituée par un MNT ou à défaut une surface de niveau qualifiée de niveau origine. Pour permettre une intégration facilitée dans un SIT3D, la maquette peut être exportée en version topologique pour éviter la redondance de données géométriques. Elle est également disponible dans les versions DGN, DWG, DXF, standards de faits, compatibles avec la majorité des systèmes. Enfin, pour des parties moins standards de la maquette, dont la modélisation ne suit pas une règle prédéfinie, les outils de DAO complètent les méthodes de reconstruction et permettent d'obtenir la représentation des formes les plus complexes.

## Description des concepts utilisés

En prenant l'exemple de la modélisation d'un bâtiment, plusieurs approches différentes et solutions sont pro-

posées et utilisées pour la génération des maquettes 3D conformément aux caractéristiques définies plus haut.

### ■ Modèle et structuration de base d'un bâtiment

Dans la maquette considérée, un bâtiment sera constitué de 3 parties fondamentales, chacune étant mesurée ou reconstruite et structurée de manière particulière :

- le toit, décomposé en éléments constitutifs de base, mesuré ou reconstruit et modélisé,
  - les faces de façades verticales, reconstruites par projection et modélisées,
  - les intersections avec le MNT et les extensions des façades sous le MNT.
- Le bâtiment repose sur une surface de référence : le modèle numérique de terrain (MNT).

### ■ Éléments de structuration et de constitution du modèle de la maquette

#### Les éléments restitués

Vu le mode de saisie utilisé qui s'appuie sur la photogrammétrie aérienne, les éléments restitués sont uniquement des éléments constitutifs des toits. Ils sont mesurés fidèlement dans les trois dimensions avec une précision liée au système et aux caractéristiques des prises de vues utilisées.

Le toit du modèle de la maquette se compose ainsi de :

- Contour de toit "multipan"
- Arête faîtière (qui peut se réduire à un point, dans le cas d'un sommet de prisme, par exemple)

- Contour de chiens-assis
- Contour de toit terrasse - plat
- Trou dans toit terrasse - plat
- Contour élément sur toit

Ces éléments restitués et structurés selon les principes décrits dans ce qui suit permettent, pour la constitution de la maquette, soit de construire des éléments caractéristiques (notamment les toits), soit de reconstruire automatiquement les façades verticales.

#### Les éléments construits

Les éléments reconstruits le sont par des procédés manuels qui, même s'ils peuvent être considérés comme longs, permettent de contrôler la saisie des éléments constitutifs des toits et de vérifier si l'interprétation qui en a été faite correspond à une réalité géométrique.

En effet, dans le cas d'un bâti urbain très dense, comportant un enchevêtrement et une juxtaposition de bâtiments et donc de toits, il est souvent difficile pour un opérateur de faire la part des choses. La phase de reconstruction manuelle complémentaire permet d'affiner la restitution et demande une lecture et une interprétation plus fine des images qui permet d'assurer une reconstruction des toits au moins cohérente géométriquement. Les éléments de toit ainsi reconstruits sont :

- Facette de toit
- Toit terrasse - plat

#### Les éléments reconstruits automatiquement

A partir des éléments restitués ou reconstruits précédemment, la maquette sera définitivement générée en utilisant des processus de projection ■ ■ ■

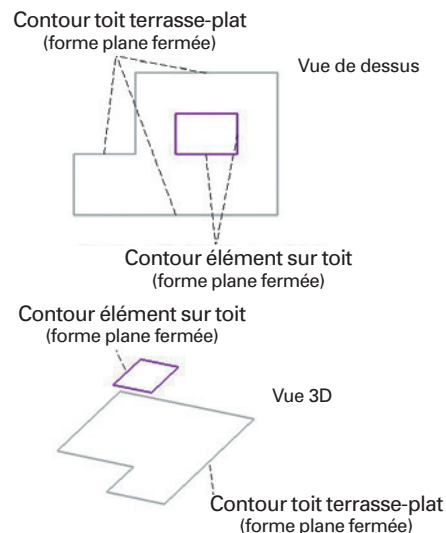
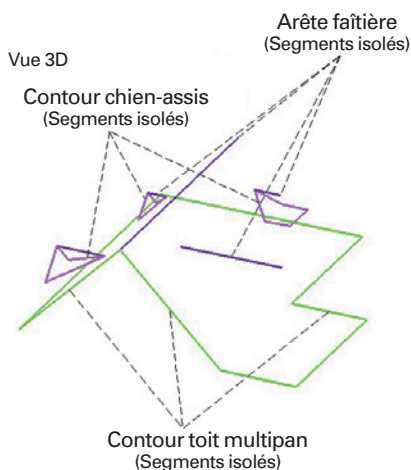
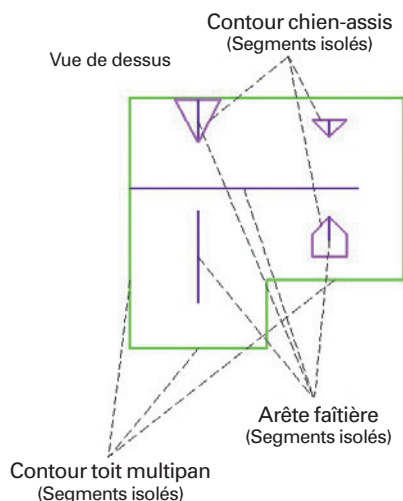


Figure 2 : Éléments restitués, constitutifs des toits

■ ■ ■ verticale faisant intervenir certains types d'éléments comme éléments à projeter et d'autres types d'éléments comme surfaces de référence. De ces processus résulte la reconstruction des façades verticales.

Dans le cas d'une projection du toit vers le MNT, cas généralement utilisé, la maquette peut comporter des variantes paramétrables, notamment pour la définition de la limite inférieure de chaque façade pour laquelle il peut s'agir de l'intersection avec le MNT, d'une arête horizontale dont le niveau est inférieur ou égal au niveau le plus bas de l'intersection de la façade avec le MNT, d'une surface horizontale dont le niveau est inférieur ou égal au niveau le plus bas de l'intersection du bâtiment avec le MNT, etc.

## ■ MNT, surface de référence

Dans le cas général, dans lequel la maquette est obtenue "de haut en bas", le concept de référence est constitué par un MNT. Mais le système reste ouvert et est paramétrable, ce qui lui confère la souplesse de pouvoir utiliser n'importe quelle surface en tant que surface de référence. On pourrait alors facilement imaginer que pour des traitements par-

ticuliers ou des simulations la maquette peut reposer sur des plates-formes artificielles, etc.

Le paramétrage permet également de définir très simplement n'importe quelle nouvelle surface comme surface de référence de projection ce qui offre la possibilité d'étendre le modèle à volonté et notamment de prédéfinir de nouveaux concepts bien identifiés dans le processus de reconstruction automatique.

## ■ Processus de génération des bâtiments de la maquette

En utilisant les concepts de base décrits précédemment, la génération des bâtiments de la maquette se résume alors en une succession de processus utilisant une hiérarchie verticale fondée sur le principe de la projection d'un élément caractéristique sur la surface de référence dont le niveau est directement inférieur. La structuration initiale permet le traitement d'un lot entier de données. Le traitement étape par étape permet de vérifier la bonne structuration des données et d'analyser la fidélité de la maquette immédiatement après sa génération.

## Les variantes en terme de modèle

La génération du modèle final du bâtiment étant un processus automatisé, le type de modèle géométrique produit peut être multiple. Nous pouvons ainsi générer des modèles de solides et plusieurs modèles de surfaces. La phase de restitution et la structuration des éléments restitués reste quasiment la même quel que soit le modèle final

sélectionné. Le modèle dont il est question dans ce qui suit concerne uniquement la partie sous les toits, c'est-à-dire les façades et les parties sous le terrain (surface) de référence de la maquette, les toits étant eux-mêmes reconstruits entièrement.

## ■ Modèle de solides

Le modèle de solides définit chaque bâtiment (partie sous le toit générée automatiquement) comme une entité unique. Dans le monde du DAO ce type d'entité unique est désigné par le concept de solide. Il s'agit en fait d'un regroupement de plusieurs entités simples (surfaces) sous une même enveloppe composant un "groupe graphique" qui peut encore être appelé "cellule" ou "bloc". Certains solides peuvent même être définis comme un regroupement de surfaces (formes) et d'arêtes de liaison (entre surfaces et définissant ainsi de nouvelles surfaces par leur contour uniquement) ce qui permet de réduire la redondance.

## Méthodologie de saisie

Lors de la saisie des éléments constitutifs des toits, il est nécessaire de regrouper les différents éléments appartenant à un même bâtiment. Ceci est réalisé en n'utilisant uniquement qu'une seule "polyligne" pour la définition du contour du bâtiment. Cette "polyligne" est une "polyligne 3D" qui suivra les changements d'altitude du contour de toit, définissant ainsi le contour supérieur de chaque façade verticale.

Ce mode de saisie est assez contraignant puisqu'il oblige l'opérateur de saisie à mesurer en un seul contour chaque toit,

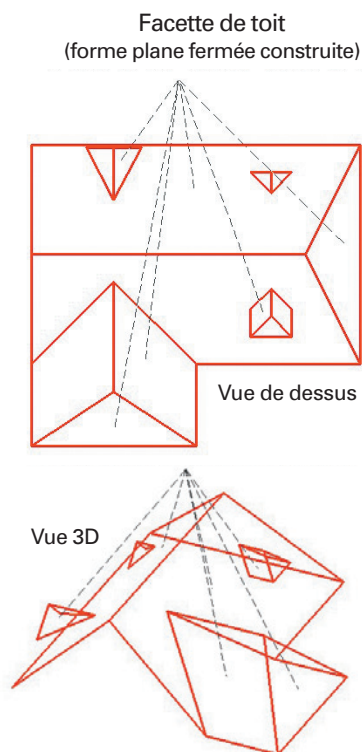


Figure 3 : Éléments reconstruits, constitutifs des toits

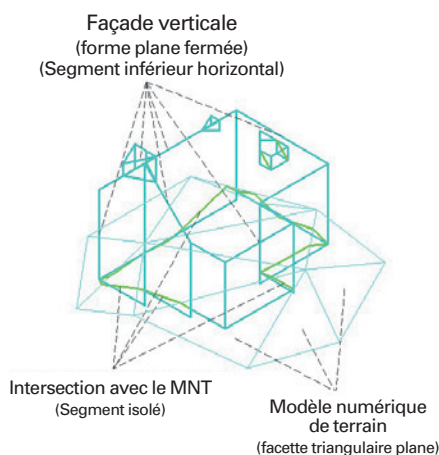
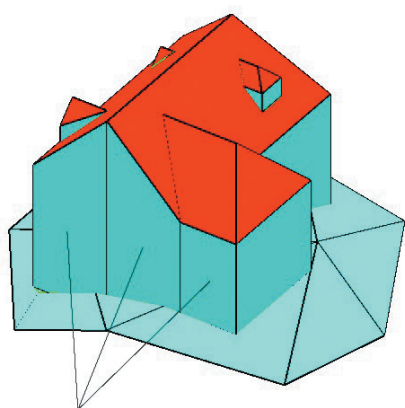
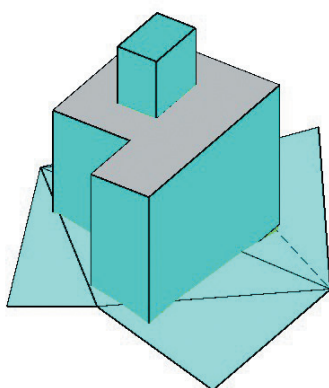


Figure 4 : Éléments reconstruits automatiquement, constitutifs du bâtiment

Visualisation avec "Faces visibles remplies"



(Façade décomposée en 3 parties)



**Figure 5 : Les bâtiments générés sur le MNT**

ce qui, par le fait de problèmes liés à la visibilité et l'interprétation des images n'est pas toujours très aisé. Dans le cas d'une interprétation qui ne pose pas de problème particulier, cette méthode permet à l'opérateur de disposer pour chaque bâtiment d'une entité à part et de décomposer simplement son travail de restitution en différents lots.

#### Génération automatique du solide

De haut en bas.

Le processus de génération du bâtiment utilise la projection de la "polyligne" du contour du toit sur la surface de référence qui peut être le MNT. Le regroupement de tous les éléments générés ainsi est réalisé en fin de processus, chaque façade créée l'étant sous forme de surface indépendante.

De bas en haut.

Dans cette même phase de génération automatique des façades, il est également possible, et selon le même principe, de générer des solides à partir d'une trace au sol (par exemple un contour de bâtiment type cadastre). Lors du processus de génération automatique, il faut alors modifier le paramétrage en indiquant notamment que les surfaces de référence sur lesquelles les projections sont réalisées consistent cette fois en des facettes de toits (voir structuration précédente), que les contours à projeter sont les traces au sol (sous forme de "polylignes") et que le sens de projection est inversé (de bas en haut ou selon les Z croissants). Pour traiter des solides, sont utilisés conjointement un processus de projection et un processus d'extrusion. La projection

permettant de définir le paramètre "distance d'extrusion" ainsi que l'intersection avec le MNT.

Ce mode de génération est cependant dépendant d'une géométrie correcte des facettes de toit. En effet, toute projection nécessitant une surface de référence, celle-ci doit être localisée correctement "au-dessus" de la trace au sol. La précision de la restitution et la précision de positionnement au sol des traces n'étant pas toujours du même ordre, un certain nombre de problèmes liés à ce non-chevauchement ou cette non-correspondance planimétrique empêchent souvent un traitement tout automatique. Un traitement topologique initial permettant de vérifier l'inclusion des différentes "polylignes" dans les facettes permettraient de s'affranchir de ces problèmes.

#### Exploitation de la maquette

Une maquette dans laquelle chaque bâtiment est une entité à part entière est très intéressante pour l'analyse et le traitement 3D. L'intégration du bâtiment sous forme d'une seule entité, décomposable par la suite, est grandement facilitée par cette forme de structuration. L'inverse, c'est-à-dire le regroupement de plusieurs façades indépendantes appartenant à un même bâtiment en une seule entité, est plus compliqué à obtenir automatiquement.

Enfin, chaque bâtiment étant considéré comme une seule entité, nous pouvons traiter le sous-sol d'une manière unique pour chaque bâtiment entier. Nous définissons ainsi une surface de sous-sol fermant le bâtiment par le dessous et

dont l'altitude (paramétrable) est par défaut égale à l'altitude de la projection des différentes façades sur le MNT la plus basse.

#### Modèles de surfaces

Des modèles de surfaces peuvent également être générés à partir des toits des bâtiments pour obtenir uniquement des surfaces indépendantes les unes des autres. Parmi les concepts des systèmes de DAO de telles surfaces entraînent un certain nombre de redondances, notamment au niveau des arêtes communes reprises pour chaque surface indépendante.

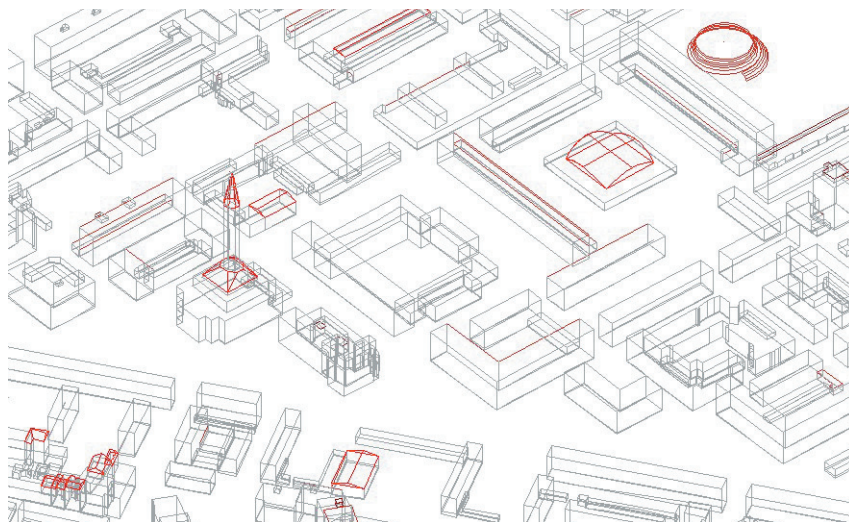
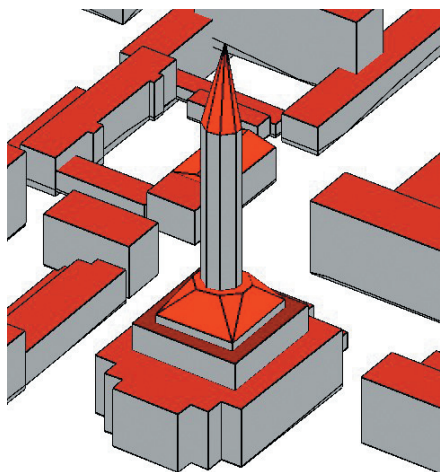
#### Méthodologie de saisie

La méthodologie de saisie des éléments constitutifs d'un toit sous la forme d'une seule "polyligne" peut également être mise en œuvre dans ce mode de génération de bâtiment. Il s'avère néanmoins que pour augmenter le confort de l'opérateur de saisie et pour améliorer son rendement, celui-ci préfère mesurer des contours de toit sous le forme de segments indépendants (correctement connectés). Cette méthode de saisie permet de traiter plusieurs toits en même temps et permet notamment de passer d'un toit à un autre sans qu'il n'y ait un ordre précis et contraignant à suivre lors de l'acquisition des données. Cette contrainte effacée, des toits mêmes incomplètement mesurés à partir d'une série d'images pourront être repris ultérieurement.

#### Génération automatique des surfaces

De haut en bas.

Les façades des bâtiments générées automatiquement sont, dans ce cas, elles-mêmes décomposées en faces. En effet, chaque segment indépendant lancera un processus de projection et de génération de face verticale dont le contour sera formé par la succession des éléments suivants : segment de contour de toit, segment vertical, segment horizontal inférieur, segment vertical. Cette modélisation permet de travailler avec des surfaces simples (quadrilatères) qui sont exportables dans n'importe quel système d'exploitation cartographique. La ligne d'intersection avec le MNT sera également générée. Tout comme pour le cas des solides, le segment inférieur est défini par défaut



**Figure 6 : extrait de restitution d'un quartier du Havre comportant un bâtiment complexe (détail et modèle filaire)**

■ ■ ■ à une altitude correspondant à la projection la plus basse sur le MNT. Il s'en suit que chaque face, qui plus est, chaque façade d'un même bâtiment comportent des segments inférieurs horizontaux dont l'altitude est différente (même s'il est envisagé de la paramétrer) mais au moins inférieure à celle du point localement le plus bas sur le MNT.

De bas en haut.

Le traitement de segments indépendants permet également de travailler avec des traces au sol à projeter vers les facettes des toits. Le processus indépendant génère des faces également indépendantes. Les paramétrages sont les mêmes que pour le traitement des "polygones".

## Exploitation de la maquette

De l'avis des utilisateurs de maquettes 3D, le fait de décomposer les bâtiments en façades indépendantes ne complique

en rien la gestion graphique des objets. Au contraire, pour alléger la maquette graphique, la suppression des façades verticales mitoyennes entre deux bâtiments (qui sont d'ailleurs dédoublées) est envisageable dans le cas d'une bande de bâtiments. En revanche, pour les besoins de localisation et de délimitation il ne faudrait conserver, par exemple, que la projection sur le MNT de la limite entre les deux bâtiments.

En revanche, il n'est plus envisagé d'associer les différentes faces et façades d'un même bâtiment sous une même entité. Dans le cas d'analyses 3D effectuées à partir d'une telle maquette, le système cartographique devra offrir une solution de regroupement, ou alors, les traitements ultérieurs d'enrichissement des propriétés de la maquette devront intégrer de telles fonctionnalités.

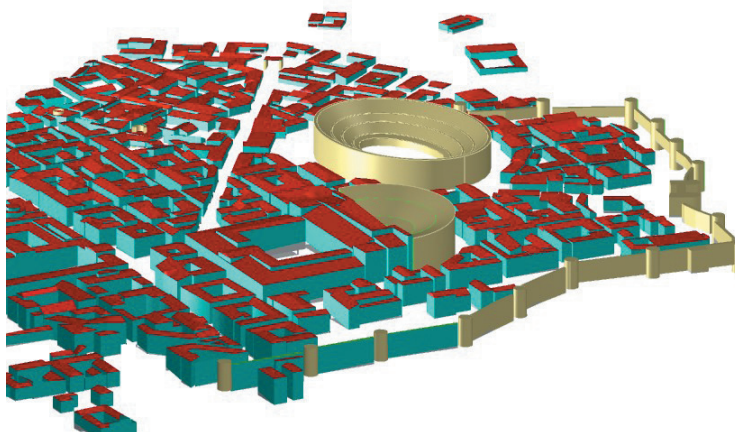
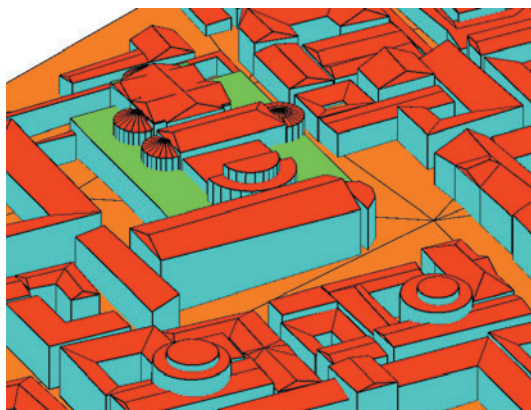
## ■ Compléments de modélisation

A l'heure actuelle, les processus de construction de maquettes 3D ont été implantés sur le système de DAO Microstation V7 de Bentley. Ce moteur de DAO bien connu et performant dans des environnements 3D offre toute une gamme d'outils d'édition et de conception 3D. Pour des cas particuliers de bâtiments (ou d'autres édifices) incompatibles avec les principes de base définis dans cette application, la maquette peut être complétée par des surfaces ou solides de révolution, obtenus par extrusion, définis à l'aide de sections, de génératrices, etc.

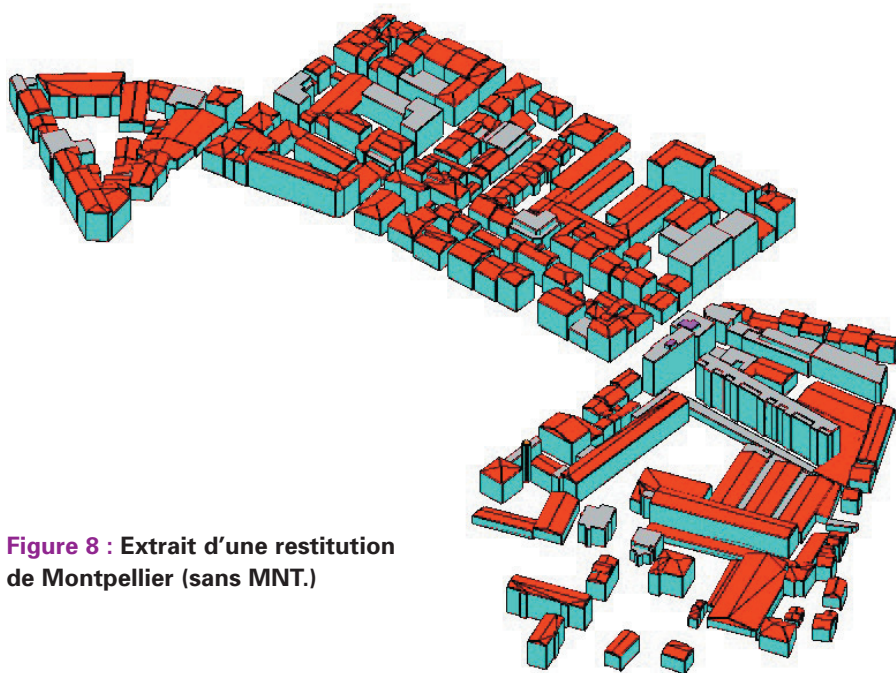
Il est à noter que ces compléments de modélisation manuels, demandent un temps d'exécution parfois aussi important que la génération automatique d'une maquette classique entière.

## Exemples de réalisations

Quelques exemples de réalisations montrent la diversité en terme de densité des



**Figure 7 : Extrait de la maquette 3D d'une maquette de l'ancienne Arles**



**Figure 8 : Extrait d'une restitution de Montpellier (sans MNT.)**

différents espaces urbains modélisés.

## Conclusions et perspectives

Les outils et méthodes mises en place permettent la restitution et la reconstruction des différents types de bâtiments. Des règles de reconstructions plus complètes et plus complexes permettraient d'apporter encore plus de précision géométrique. Ces règles doivent être bien identifiées et applicables dans des cas très généraux de manière à pouvoir automatiser les processus de reconstruction. Le choix d'un modèle surfacique est délibéré pour des raisons de simplification. Les surfaces sont principalement des surfaces planes. Des outils de maillages permettent de compléter ces surfaces par des surfaces plus complexes. Les techniques de maillages utilisées pour la constitution des MNT de base peuvent ici être réemployées très efficacement.

Enfin, les implantations ont été réalisées dans des logiciels de DAO du marché de manière à utiliser efficacement les possibilités de représentation et les structurations des éléments graphiques existantes. La mise en place d'un format indépendant, l'implantation dans un système indépendant ouvriraient de nouvelles perspectives.

### ■ Vers l'intégration de données dans un SIT-3D

La structuration des données lors de la

restitution et lors des différentes phases de reconstruction permettent d'intégrer les données en fonction de leur type dans un SIT-3D. Les possibilités offertes par les systèmes d'information permettent d'associer des données complémentaires (attributs) et ainsi d'exploiter au maximum les nouvelles données intégrées dans le SIT-3D.

### ■ Enrichissement de la maquette

La structuration des données en facettes de toits ou en façades verticales sont très propices à l'association de textures. Cette association sous forme d'éléments de photographie ou de textures artificielles permettent d'augmenter l'aspect réaliste lors de l'utilisation sous forme de visualisation ou d'effectuer des choix et des rendus réalistes lors de simulations.

La phase suivante, actuellement à l'étude, consiste à enrichir les façades par la reconstruction des éléments géométriques qui les constituent et définissent ainsi des reliefs entrants ou sortants de celles-ci. Ainsi les façades des bâtiments peuvent-elles contenir des informations géométriques et thématiques plus détaillées qu'une simple surface verticale comme celle générée actuellement.

Avec un degré de détail croissant, l'échelle de travail augmentera également et la zone de travail sera donc d'autant réduite. Pour des raisons de

lourdeur de mise en œuvre et de quantité de données, les maquettes ainsi détaillées ne pourront alors plus que couvrir certaines zones d'études bien ciblées. ●

## Références bibliographiques

*"Définition et conception d'outils de modélisation et d'intégration de données dans un SIT-3D urbain", Vincent GAÏOTTI, Mémoire de DEA, INSA septembre 2003, 60 pages.*

*"Modélisation géométrique et sémantique en milieu urbain", Mathieu KOEHL, Thèse de Doctorat ULP Strasbourg, 1999, 292 pages.*

*"Modélisation géométrique et sémantique dans un SIT-3D", Mathieu KOEHL, Séminaire MAP, SOUSSE Tunisie 2002, 8 pages.*

*"Logiciels de SIG pour la gestion, le traitement et la visualisation de données géographiques tridimensionnelles", Marc RIEDO, EPFL, octobre 1999, 30 pages.*

**Mathieu KOEHL**

Maître de Conférences

INSA de Strasbourg Equipe-PAGE

UMR MAP CNRS/MCC 694

## Abstract

**Key words :** 3D City models, data acquisition, geometric modelling, automatic reconstruction

*The production of city models for the three dimensional management of urban areas has really increased during the last years. These graphic models are more or less detailed and accurate according to the building methods and the techniques used for the initial geometric data acquisition. This paper describes, in a first time, the photogrammetric data acquisition method, and in a second time, the construction mode of such models. The explained examples are buildings constructed from the constituent element of their rooves. The geometric data are measured from aerial images. The models are defined with different structures discussed in this paper.*

# L'Institut Français de Navigation : 50 année d'avancées spectaculaires des géosciences au service des navigateurs

■ Jean BOURGOIN

*L'après deuxième guerre mondiale a vu l'explosion de systèmes et de technologies nouvelles telles que la radiolocalisation, la localisation par satellites, le sondage par les sondeurs ultra-sonores, les sondeurs latéraux et multifaisceaux, l'automatisation de l'acquisition et du traitement des données, la carte électronique, l'océanologie spatiale. Les principaux progrès en géodésie sont issus chronologiquement, du traitement des mesures par ordinateur (1960), des distancemètres électroniques (1969), des satellites (1969), du GPS (1989), assorti du système DORIS, qui permet des déterminations au centimètre. La localisation en mer et la navigation ont bénéficié dès 1955 de l'avènement de la radiolocalisation, puis de la localisation par satellites. Le SHOM et l'IFN ont largement participé aux développements des techniques les concernant, et qui recoupent celles de la géodésie (TRANSIT, GPS, etc.). La mesure des profondeurs est fondamentale en hydrographie. Depuis 1945, la mesure bathymétrique par des méthodes acoustiques a pris la relève du sondage au plomb poisson. Le sondeur multifaisceaux, au milieu des années 1970 a permis de passer du sondage linéaire au sondage surfacique. A la fin des années 1980, le "sonar hydrographique Marine" permet de détecter des objets métriques dans un rayon de 700 mètres, par des profondeurs inférieures à 120 mètres. Depuis les années 1980, le pilotage des restitués analytiques par ordinateur permet d'exploiter la radiolocalisation précise de l'avion, et de tenir compte de la réfraction au passage du dioptré air-eau, dans les fonds inférieurs à 10 mètres, en eau claire. Le satellite SPOT 1, lancé en 1986, permet de déterminer la profondeur en eaux claires, dans les fonds inférieurs à 30 mètres. En océanographie, la radar-altimeétrie par satellites a ouvert, à partir de 1978 (SEASAT), des voies nouvelles pour la mesure et la prévision de la "topographie des océans", qui donne accès à la marée et aux courants géostrophiques. Par ailleurs, la tomographie acoustique, à partir de sources basse fréquence, a permis de scruter la tranche d'eau sur des vastes étendues. En gravimétrie, l'utilisation optimale des centrales à inertie des sous marins a conduit la Marine à exprimer des besoins en matière de connaissance du géoïde. Un modèle de pesanteur pour l'Atlantique Nord Est a été développé en 1987, par le SHOM, en collaboration avec le CNES. En sédimentologie, l'imagerie donnée par les sondeurs latéraux et multifaisceaux a apporté des réponses, aussi bien aux problèmes de chasse aux mines, qu'à ceux de la pêche et de la navigation dans le Pas de Calais. Le cinquantenaire de l'Institut Français de Navigation a donné l'occasion de célébrer une période sans précédent dans l'application des géosciences à la mer, mais aussi une collaboration amicale et fructueuse entre l'IFN et le SHOM.*

L'hydrographie n'est pas une science, mais un domaine technique qui fait appel à bon nombre de discipline scientifiques. Pour la mener à bien, il est essentiel de garantir à ses bénéficiaires une qualité de connaissance supérieure à celle que ces bénéficiaires peuvent eux-mêmes atteindre avec les moyens dont ils disposent. De ce fait, l'hydro-

graphe a toujours été amené à considérer une amélioration continue de ses méthodes et de ses moyens afin de conserver la maîtrise de la satisfaction des besoins des usagers de la mer et, si possible, anticiper ces besoins. Pour cette raison, les hydrographes ont largement contribué aux développements scientifiques liés à la connaissance des océans, que ce soit en

matière d'instrumentation, de compréhension ou de modélisation.

Jusqu'à la deuxième guerre mondiale, les hydrographes ont appliqué la doctrine de levé élaborée par Beautemps-Beaupré (publié en 1808 dans un appendice au rapport de mission de d'Encasteaux). Les efforts ont surtout porté sur les problèmes de géodésie, de ■■■

■ ■ ■ précision des instruments d'optique, de chronométrie, de théorie des marées. Depuis la deuxième guerre mondiale, on a assisté à l'explosion de systèmes et de technologies tels que : la radio-localisation, le sondage par les sondeurs ultra-sonores, les sondeurs multifaisceaux et les sondeurs latéraux, la localisation par les satellites, l'automatisation de l'acquisition et du traitement des données, la carte électronique, l'océanologie spatiale.

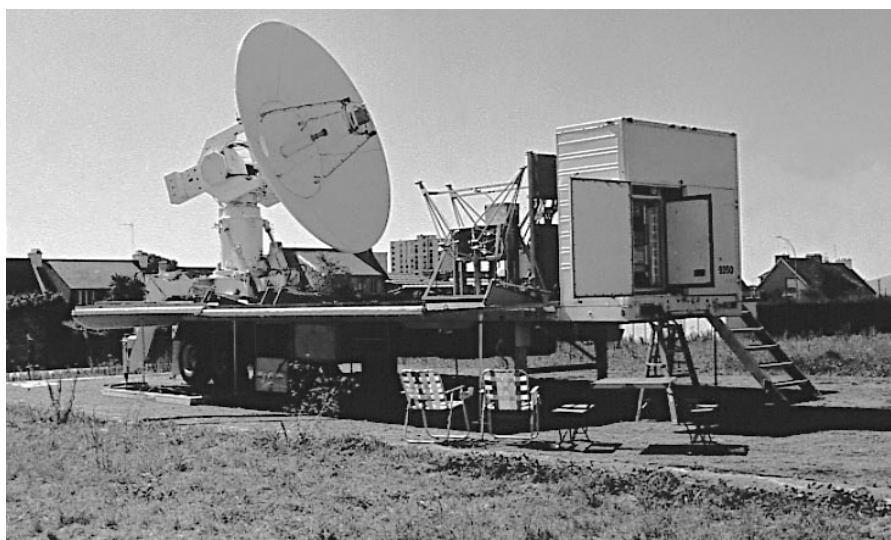
Ces nouvelles technologies ont du prendre en compte une nouvelle gamme de tirants d'eau, allant de 2 mètres à 30 mètres qui rendent caducs nombre de levés antérieurs aux années 1970, conçus pour les tirants d'eau de 8,5 m des Liberty ships. Le développement simultané des besoins et des moyens s'est accéléré au cours des dernières décennies, laissant aux hydrographes le soin de promouvoir les recherches pour de nouvelles applications au bénéfice des navigateurs.

Je vous propose de faire un voyage à travers des disciplines mises en œuvre par les hydrographes au service des utilisateurs de leurs produits.

## La géodésie terrestre

Les travaux géodésiques servent de base aux sondages, qui constituent l'essentiel de toute mission hydrographique. L'opération indispensable dans l'établissement de tout réseau géodésique consiste à déterminer la position géographique de l'un des points de ce réseau, au moyen du théodolite et du chronomètre, jusqu'à la mise au point, en 1901 de l'astrolabe à prisme (par Claude et Driencourt) et la disposition des signaux horaires, à l'issue de la première guerre mondiale. L'astrolabe était d'un usage courant dans les missions hydrographiques des années 1930. Il permettait de déterminer avec précision (la seconde sexagésimale) la latitude et la longitude du lieu, par la méthode des hauteurs égales. Il restera en usage jusqu'aux années 1970.

Une fois le réseau calé, son orientation était déterminée par une visée sur étoile, au théodolite. L'échelle du réseau était enfin fixée, au



**Fig. 1 : station VLBI installée à l'EPSHOM en août et septembre 1989**

début du XX<sup>e</sup> siècle, par la mesure de la distance séparant deux points du réseau, au moyen du fil invar, sous tension constante.

Les vrais progrès en vitesse d'exécution et exactitude apparurent en France à partir de 1958 dans les missions hydrographiques en Afrique, avec les distancemètres, géodimètres et telluromètres.

Les ingénieurs hydrographes établirent des procédures calculatoires rigoureuses permettant de s'affranchir des contraintes de l'environnement (température, pression, hygrométrie) et de dominer les calculs sur l'Ellipsoïde dans les systèmes de projections appropriées.

Pour mettre en œuvre les chaînes de radiolocalisation à longue portée, il fut nécessaire de disposer de canevas géodésiques homogènes. À partir des années 1960 l'ordinateur permit d'effectuer un traitement global des observations et de s'affranchir de la plupart des simplifications abusives liées au calcul en projection. C'est ainsi que, pendant longtemps, les hydrographes avaient utilisé un mode de représentation plane, consistant à rabattre successivement tous les triangles sur le plan de l'un d'entre eux, après avoir corrigé les angles observés du tiers de l'excès sphérique. Ce procédé ne peut s'appliquer qu'à des bandes étroites de terrain, relativement rectilignes. Les différents systèmes géodésiques réalisés formaient des tronçons indépendants, présentant des hétérogénéités internes

et des discontinuités à la jonction avec les systèmes voisins.

Le système des satellites TRANSIT fut utilisé par le SHOM dès 1969 pour permettre le rattachement à un système géodésique mondial des réseaux locaux constitués au fil du temps par les missions hydrographiques, ou utilisés sur les cartes marines. Plusieurs centaines de rattachements géodésiques ont été réalisés avec le système TRANSIT entre 1969 et 1997.

Par ailleurs, dès 1989 le GPS fut utilisé couramment dans les travaux géodésiques de la mission océanographique du Pacifique pour positionner, orienter, et mettre à l'échelle les systèmes géodésiques des archipels de la Polynésie française.

Le GPS est actuellement utilisé systématiquement dans les missions du SHOM. Il se révèle particulièrement performant pour les mesures relatives en mode différentiel, où les stations sont rattachées à quelques centimètres près jusqu'à un éloignement de 200 km, puis en mode cinématique, qui permet dorénavant la même précision, la station rattachée étant mobile.

Pour un positionnement absolu, nécessaire au rattachement de territoires éloignés, la précision accessible correspond à un cube de 10 m de côté. Pour cette raison, le SHOM, dès 1992 a utilisé, en partenariat avec l'IGN, une génération complémentaire de satellites de positionnement absolu ultra-

précis. Il s'agit du système DORIS qui, pour un réseau principal de 13 stations en Polynésie, a assuré une précision de quelques centimètres. Il est ainsi désormais possible d'envisager des applications géophysiques concernant les marées océaniques ou terrestres et le tectonique des plaques, ou même des études de courants océaniques.

## La localisation en mer et la navigation

Avec l'abandon du cercle hydrographique vers 1955, on est passé de localisation optique à la localisation radio-électrique, puis actuellement à la localisation par satellites. Ces trois étapes marquent de façon très typique les évolutions de l'Institut Français de Navigation (IFN) consacré par le colloque de son cinquantenaire.

Après la seconde guerre mondiale, les hydrographes avaient défriché le terrain de la radionavigation et préparé l'utilisation courante pour les navigateurs des systèmes internationaux comme l'OMEGA, le LORAN C, le DECCA, et des systèmes nationaux comme le RANA, le SYLEDIS, le TORAN, le TRIDENT, appropriés aux travaux hydrographiques, ou encore les systèmes satellitaires.

L'industrie, stimulée par les besoins des compagnies pétrolières avait proposé rapidement une grande variété de systèmes, les uns fournissant directement

des distances à un émetteur, les autres des différences de distances entre deux stations terrestres. Ces derniers étant utilisés de façon passive n'étaient pas saturables et pouvaient satisfaire un nombre illimité d'utilisateurs. Ils peuvent être classés suivant la fréquence des ondes utilisées. Leur précision et leur portée varient en sens inverse. Par exemple : avec une portée inférieure à 10 km, la précision du système Axyle est submétrique ; avec une portée de 800 milles, la précision du LORAN C est hectométrique ; avec une couverture mondiale, la précision du système OMEGA est kilométrique. D'une façon générale, plus les fréquences sont basses, plus la portée est grande et la précision faible.

En fait, l'évolution des systèmes est devenue telle que les systèmes en développement se retrouvèrent rapidement en usage opérationnel. Le SHOM a ainsi organisé trois colloques nationaux sur le positionnement en mer, en 1971, 1979, et 1987, dont les propositions novatrices étaient devenues dix ans après d'application ordinaire, quand elles n'étaient pas tout simplement dépassées par de nouvelles techniques. Il avait aussi apporté sa contribution à la solution de nombreux problèmes, tels que ceux des conditions de propagation, de réflexion, de calibration, du calcul du point, de la généralisation à l'ellipsoïde des ellipses et hyperboles "géodésiques", limitée jusque là au plan.

L'arrivée des systèmes satellitaires a marqué un tournant décisif dans la localisation. En effet, les stations embarquées sur satellite sont aisément reçues en ondes courtes et elles apportent une bonne précision de localisation : c'était déjà le cas, en 1970, avec le satellite TRANSIT, dont les positions sont obtenues par intégration des signaux émis sur un arc long d'orbite, et qui fut largement employé avant l'apparition du GPS.

Le système GPS (constellation de 24 satellites distribués sur 6 plans orbitaux et tournant à 20 200 km au dessus de nos têtes) a révolutionné la problématique de la localisation au large. Dès la phase probatoire, le GPS a été utilisé systématiquement dans les missions du SHOM depuis 1989, tant pour calibrer les systèmes à base terrestre que pour réaliser des levés en métropole et outre-mer. Sa précision est décimétrique en mode normal, métrique en mode différentiel (DGPS), décimétrique, voire centimétrique en mode cinématique. Seuls, actuellement, les levés côtiers et portuaires sont encore localisés par le système Axyle (SERCEL), quand ils ne le sont pas par le GPS en mode cinématique.

Tous les systèmes de radionavigation, de radiolocalisation et de positionnement par satellites ont fait l'objet de nombreuses études du Service Hydrographique et de l'Institut Français de Navigation, qui ont été publiées par ces organismes.

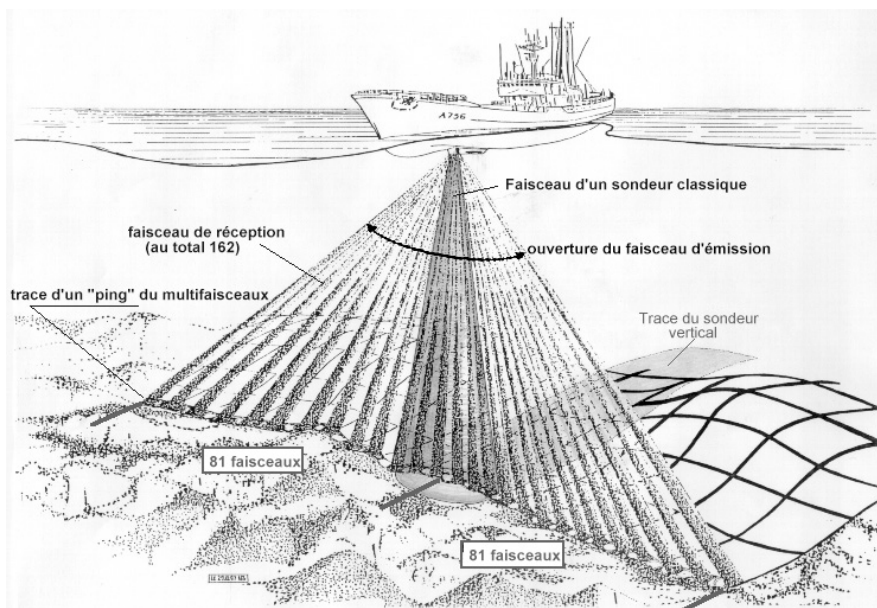
## La mesure des profondeurs

La mesure des profondeurs est l'opération fondamentale en hydrographie. Elle doit être rattachée à une altitude conventionnelle pour tenir compte des variations périodiques du niveau de la mer. Elle conduit à la mise en œuvre de diverses techniques telles que la géodésie terrestre, le positionnement en mer, l'étude des marées, l'hydrologie ou les techniques de sondage.

L'océan étant opaque au rayonnement électromagnétique, la mesure bathymétrique est obtenue par des méthodes acoustiques depuis 1945, époque qui marque la fin des sondages au plomb



Fig. 2 : station Trident III



**Fig. 3 : schéma de déploiement des faisceaux du SMF EM12 Dual montés sur le BH1 L'Espérance**

poisson. On rappelle, au passage, que l'inventeur du sondage vertical acoustique ultrasonore est l'ingénieur hydrographe Marti, en 1919. Son système enregistrait une explosion, sur microphone assorti d'un amplificateur et d'un oscillographe à plume. Il fut breveté en 1930 sous l'appellation "Langevin-Florisson-Marti". Pour mémoire, au passage, signalons que les sondeurs petits et grands fonds utilisés au SHOM proviennent des firmes Hughes, Atlas, Edo, Raytheon.

Le sondeur ultra-sonore classique, à faisceau unique, d'un cône d'ouverture de  $20^\circ$  à  $30^\circ$ , explore le fond selon un profil de sonde. La sécurité hors du cône d'émission, avec ce type de sondeur, est assurée par le sondeur latéral. La mise en service de compensateurs de pilonnement, en 1980, pour les bâtiments océanographiques du SHOM, et en 1996, pour les vedettes, a permis d'affranchir les sondages des mouvements de plate-forme.

## ■ Les sondeurs multi-faisceaux

Au milieu des années 1970 est apparu un concept nouveau, celui du sondeur multi-faisceaux.

Le principe de fonctionnement du sondeur multi-faisceaux est basé sur des techniques acoustiques permettant de mesurer les profondeurs sur toute une fauchée perpendiculaire à l'axe du

navire, sur une largeur variant de 2 à 7 fois la profondeur. La technique généralement utilisée est dite des "faisceaux croisés", car l'émission du signal sonore et la réception l'écho réfléchi se font selon des faisceaux perpendiculaires dont l'intersection représente la surface sondée. L'émission est effectuée par un faisceau de très faible ouverture longitudinale (environ  $2^\circ$ ), mais très large latéralement (de  $30^\circ$  à  $150^\circ$ ). La réception est effectuée par plusieurs faisceaux (de 20 à 200 selon les cas), de faible ouverture latérale (de  $1^\circ$  à  $5^\circ$ ) et de grande ouverture longitudinale (environ  $20^\circ$ ).

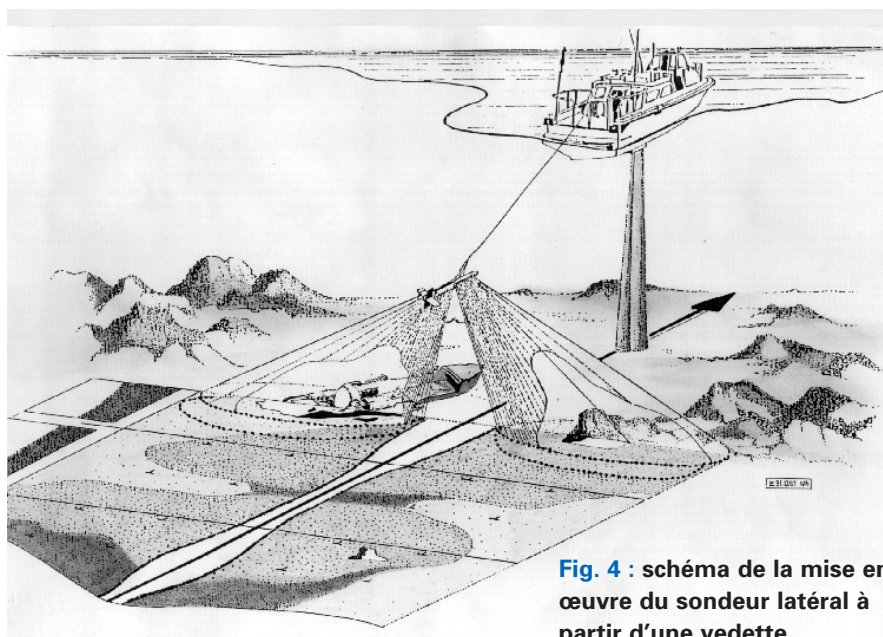
Il existe des modèles grands fonds, pour la bathymétrie au large, et la géophysique : c'est le cas de l'EM12-DUAL de SIMRAD (qui a équipé "L'Espérance" au SHOM) : 162 faisceaux balaient une largeur de  $150^\circ$ , correspondant à 4 fois la profondeur, en acquérant  $10^6$  sondes au  $\text{km}^2$  ; mais aussi des modèles petits fonds, pour les applications côtières, comme le sondeur Lennormor-Thomson-Sintra-ASM, acquis en 1988, et précurseur dans sa génération, qui permet, entre 20 et 300 mètres de profondeur, une fauchée de  $90^\circ$  par un ensemble de 20 sondeurs élémentaires. Le SHOM utilise actuellement l'EM 2002 dont les performances sont voisines.

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

## ■ La détection des obstructions

### Le sondeur latéral

Elle concerne la détermination de la position, de la profondeur, de la nature, des obstacles naturels ou artificiels. Dans les années 1970 sont apparus les sondeurs latéraux (Edgerton) qui donnaient des images acoustiques du fond, transversalement à la route suivie. Les



**Fig. 4 : schéma de la mise en œuvre du sondeur latéral à partir d'une vedette**

sondeurs latéraux sont remorqués par des vedettes ou des bâtiments. Tout point suspect doit être insonifié deux fois à partir de profils situés de part et d'autre de ce point. Des exemples :

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

Pour mémoire : la cotation des hauts fonds était effectuée dès 1884 par la drague Renaud, à laquelle a succédé la drague américaine à partir des années 1950.

### La photogrammétrie

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

### Le laser

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

### Les satellites SPOT

Le scanner multispectral du satellite SPOT, lancé pour la première fois en 1986, rayonne sur une bande au sol de 60 km de large, l'unité de surface mesurée étant un carré de 20 m de côté, appelé pixel. L'énergie réémise par le sol est mesurée par le radiomètre du scanner dans 3 canaux : le vert, le rouge et l'infrarouge. Le rayonnement est absorbé sélectivement par

la tranche d'eau, avec une pénétration nulle en infrarouge, et maximale dans le vert, et proportionnellement à la longueur du trajet, c'est à dire la profondeur. La précision obtenue est de 5 à 10 % pour les profondeurs inférieures à 30 m, dans les eaux claires. A signaler l'exploitation des images SPOT dans les cartes marines, pour les régions coralliennes.

### Le niveau de référence des sondes

Les profondeurs sont traditionnellement réduites à un niveau localement fixe appelé zéro hydrographique, normalement inférieur aux plus basses mers astronomiques. Cette réduction suppose que l'on connaisse la marée au point de mesure, ce qu'on obtient par un modèle calé sur des observations en des points proches, y compris à l'aide de marégraphes immergés. Mais l'amplitude de la marée variant avec la position, la cote de ce niveau par rapport à des références terrestres est variable.

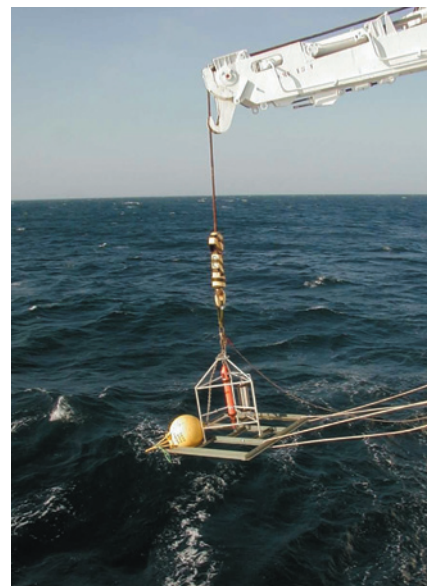
Les satellites de positionnement (GPS aujourd'hui, GPS et GALILEO demain) permettent maintenant, jusqu'à quelques dizaines de kilomètres des côtes de mesurer l'altitude absolue des mobiles par rapport à l'ellipsoïde de référence ; on peut donc mesurer la forme de la topographie sous-marine directement par rapport à cette référence, ce qui évite une source d'imprécision dans la réduction des sondes et permet de gérer la continuité terre-mer. Il reste à généraliser l'emploi de ces nouvelles technologies, dont la faisabilité est démontrée, dans des systèmes opérationnels.

### La marée

La marée est un phénomène déterministe dépendant de la rotation :

- de la Lune autour de la Terre (29,53 jours),
- de la Terre autour du soleil (365,24 jours),
- de la Terre sur elle-même (24 heures).

Le résultat est le rythme biquotidien des marées, avec des modulations semi-mensuelles et mensuelles entre vives eaux et mortes eaux, et des variations



**Fig. 5 : mouillage d'un marégraphe grand fond dans le détroit de Bab El Mandeb**

semi-annuelles et annuelles correspondant aux marées d'équinoxe.

- la première théorie est celle de Newton, de l'attraction universelle, en 1687. La théorie de Newton est dite statique, parce qu'elle néglige l'inertie du fluide,
- la seconde théorie, un siècle plus tard, est celle de Laplace, qui imagine la "formule de Laplace". Sa théorie, dynamique, est basée sur deux principes :
  - les oscillations forcées des molécules d'eau ont la même période que la force périodique qui leur donne naissance ;
  - les très petites forces qui créent la marée se superposent en petits mouvements leur correspondant.

Laplace admet que l'amplitude de la marée est proportionnelle à sa valeur théorique, et que la marée est déphasée par rapport à sa valeur théorique : les facteurs de proportionnalité et de déphasage dépendent des contours des continents et des profondeurs.

- en 1870 Lord Kelvin invente l'analyse harmonique, et la met en pratique grâce à une machine analogique, le "Tide predictor".
- en 1883, Darwin identifie et baptise les principales composantes harmoniques, avec des sigles (N2, S2, M2, K2 etc.)

La marée a toujours été un domaine d'excellence au service hydrographique mais, depuis les années 1980, elle fait

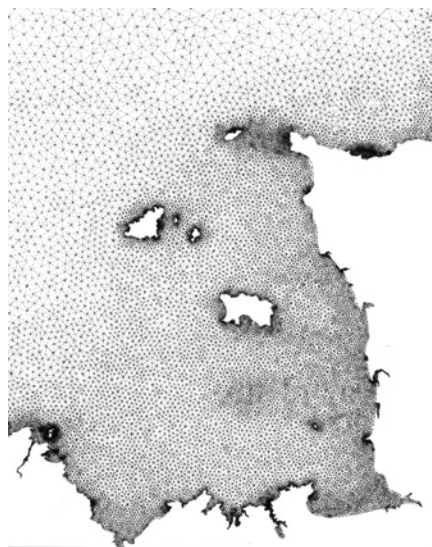
- ■ ■ partie des objectifs de programmes spatiaux internationaux auxquels participe la France. L'altimétrie spatiale de haute précision donne accès, à la précision de quelques centimètres, à la marée sur l'ensemble du globe.

N'oublions pas, pour autant, que la marée se mesure d'abord et aussi avec des marégraphes.

## ■ Les modèles numériques de marée

Les performances actuelles des ordinateurs permettent de prédire la marée par des modèles numériques s'appuyant sur les équations de l'hydrodynamique. On découpe le domaine intéressé en mailles auxquelles on applique les principes suivants :

- le principe de conservation : la variation de la hauteur d'eau dans une maille résulte des différences de quantité d'eau entrant et sortant. Elle dépend en fait des courants traversant la maille ;
- le principe fondamental de la dynamique, qui est appliqué aux forces suivantes :
  - les forces de pression dues aux différences de hauteur d'eau avec les mailles avoisinantes ;
  - la force de Coriolis ;
  - les forces de freinage s'exerçant au voisinage du fond et des parois des mailles.



**Fig. 6 : la modélisation numérique : maillage golf normand Breton**

Le tout est formalisé dans les équations de Navier-Stokes. Il est entendu que le "moteur" du mouvement est constitué par la marée aux limites ouvertes du modèle, qu'il faut mesurer ou prévoir. Le service hydrographique utilise depuis 1988 les modèles numériques pour élaborer ses atlas de courant.

## L'océanographie

L'immensité de l'océan mondial et la difficulté d'observation ont opposé des obstacles majeurs dans le passé à la compréhension globale de la dynamique de son fonctionnement en relation avec les échanges atmosphériques.

Décrire, comprendre et prévoir l'état et la variabilité de l'océan dans son ensemble est une tâche très difficile, du fait de son étendue, et des échelles tant spatiales que temporelles des phénomènes à observer tels que les ondes internes, la houle, la marée, dont les échelles temporelles s'étendent de la minute à la journée, ou encore les tourbillons et les grands courants dont les échelles de temps s'étalant de quelques mois à plusieurs années. Les précisions requises pour rendre compte de ces phénomènes sont du centimètre par seconde pour les courants, et le dixième ou le centième de degré pour la température de l'eau. Les deux voies d'approche des problèmes à résoudre sont l'espace et les mesures en mer.

## ■ L'océanographie spatiale

Dans le dernier quart du siècle passé, les satellites géoscientifiques et l'informatique ont ouvert des voies nouvelles révolutionnaires pour la mesure et la prévision des phénomènes océanographiques. Les paramètres météo-océanographiques, vents, courants, houle, température de surface, ne peuvent être observés globalement qu'à partir de l'espace. Mais l'océan est rebelle à se laisser traverser par le rayonnement électromagnétique. D'où une approche des phénomènes profonds par des phénomènes superficiels, tels que la topographie de la surface de la mer.

## L'altimétrie radar

La terre peut être représentée par un ellipsoïde dont le centre est le centre de gravité des masses terrestres. Ce centre est actuellement déterminé au centimètre près. [L'ellipsoïde qui lui correspond est désigné par le sigle WGS84, pour "World Geodetic System 1984". Le système géodésique auquel il est rattaché est l'"International Terrestrial Reference System", l'ITRS].

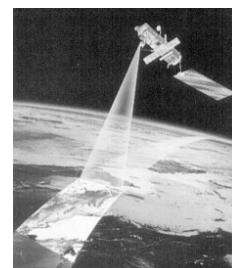
La surface des océans au repos serait, - au conditionnel parce que les océans ne sont pas au repos -, un géoïde, surface perpendiculaire en tout point à la verticale.

Rapporté à l'Ellipsoïde, le géoïde présente des écarts, creux et bosses, de  $\pm 100$  mètres.

Le forçage atmosphérique par le vent, et la marée, créent des dénivellations de  $\pm 1$  mètre par rapport au géoïde : cet écart entre surface de la mer et géoïde est appelé "topographie des océans". Il permet d'appréhender les courants de surface appelés "géostrophiques", dans lesquels la force du gradient de pression et la force de Coriolis s'équilibrent l'un l'autre.

## Le principe de la mesure altimétrique :

- L'altimètre radar mesure la distance satellite - surface de la mer,
- L'orbite du satellite est connue au centimètre près par rapport à l'Ellipsoïde WGS84, grâce au réseau de poursuite DORIS (DORIS pour Détermination d'Orbite de Radiopositionnement Intégré par Satellite), s'appuyant sur une cinquantaine de stations terrestres d'orbitographie, exploitant des radiosources extragalactiques. (Un système analogue a été développé en Allemagne sous l'appellation de PRARE),
- Le niveau de la mer est déterminé par la combinaison des deux informations ci-dessus.



**Fig. 7 : vue d'artiste du futur satellite ENVISAT**

L'altimétrie radar a débuté avec le satellite expérimental SEASAT en 1978, suivi de ERS1 en 1991, Topex-Poséidon en 1992, ERS2 en 1995, ENVISAT en 2001 et Jason en 2002.

### **Autres applications des technologies spatiales**

- *La température de la surface de la mer*  
L'imagerie infra-rouge a été la première technique spatiale opérationnelle de la surface des océans. Les radiomètres imageurs multispectraux des satellites TIROS-N de la NOAA, en 1965, ont permis d'établir quotidiennement une carte des températures de surface de l'Atlantique Nord-Est et de la Méditerranée, au 1/10 de degré. La "cellule d'environnement de la marine" exploite ces mesures en les associant aux relevés bathycélérimétriques par zone de lutte anti-sous-marine.

#### *- La couleur de l'eau*

La couleur de l'eau est directement liée à sa teneur en chlorophylle, et la répartition de celle-ci à la surface de l'océan est corrélée aux structures thermiques. Le teneur en chlorophylle est déduite du rapport de deux mesures, l'une dans le bleu, l'autre dans le vert. Déjà mesuré, entre 1978 et 1986 par le satellite NIMBUS, ce paramètre est acquis depuis 1996 par ADEOS et actuellement par JASON.

## **■ L'océanographie embarquée**

### **La tomographie acoustique**

La tomographie acoustique fait partie des techniques récentes d'observation de l'océan, dérivées de l'acoustique sous-marine. Elle permet, à partir de sources basse fréquence (quelques centaines de hertz) de scruter l'intérieur des mers sur des vastes étendues, car aux basses fréquences l'atténuation est particulièrement faible.

La vitesse du son dans l'eau dépend, entre autres paramètres, de la température de celle-ci. En disposant de sources acoustiques et de récepteurs autour de la zone à étudier, et en mesurant les temps de parcours des ondes acoustiques entre les différents émetteurs et récepteurs, l'évolution des caractéristiques thermiques des eaux dans la zone considérée peut être suivie.

Les américains, pionniers de cette nouvelle technique, l'ont testée au début des années 1980. En France, le service hydrographique, en collaboration avec l'IFREMER, la DRET, l'UBO, et des laboratoires britanniques, a effectué une première expérience à grande échelle, GASTOM, en appareillant dans le Golfe de Gascogne (avec six émetteurs-récepteurs ERATO) en 1990.

Depuis 1990 le SHOM a mis au point des méthodes voisines appliquées sur de plus courtes distances permettant une description globale de la propagation acoustique directement utilisable pour la détection sous-marine.

### **Les systèmes embarqués**

L'instrumentation embarquée a été totalement renouvelée depuis les années 1970.

La bathysonde (pression, température, conductivité) Howald 1970, a laissé la place à un multiéchantillonneur à rosette, puis à la sonde Guildline, et actuellement au capteur de troisième génération Sea-Bird Electronics.

Les thermomètres à renversement ont été remplacés par des thermomètres électroniques avec un facteur 10 de résolution.

Le bathythermographe Richard a été remplacé dans les années 1970 par des

sondes perdables SIPPICAN, pour mesurer la température, la vitesse du son dans l'eau, la conductivité.

Le système SEA-SOAR (Chelsea), équipant le d'Entrecasteaux depuis 1994, est un poisson remorqué à profondeur variable contrôlée, mesurant, salinité, température et profondeur.

Le Flotteur dérivant de subsurface RAFOS effectue une mission préprogrammée du type "plongée - séjour en profondeur - remontée en surface". En fin de mission, le flotteur émet les informations acquises vers les satellites du système ARGOS. Les signaux acoustiques sont traités et archivés.

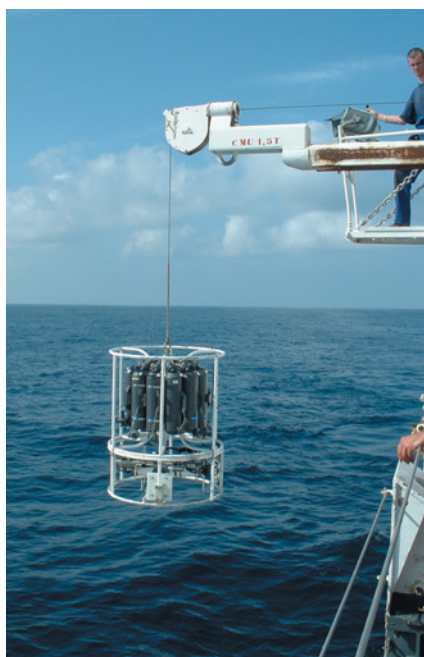
Les anciens MECABOLIER (courantométrie au point fixe selon la méthode d'Euler) ont été remplacés dans les années 1980 par des courantomètres SUBER de nouvelle génération.

## **Le magnétisme**

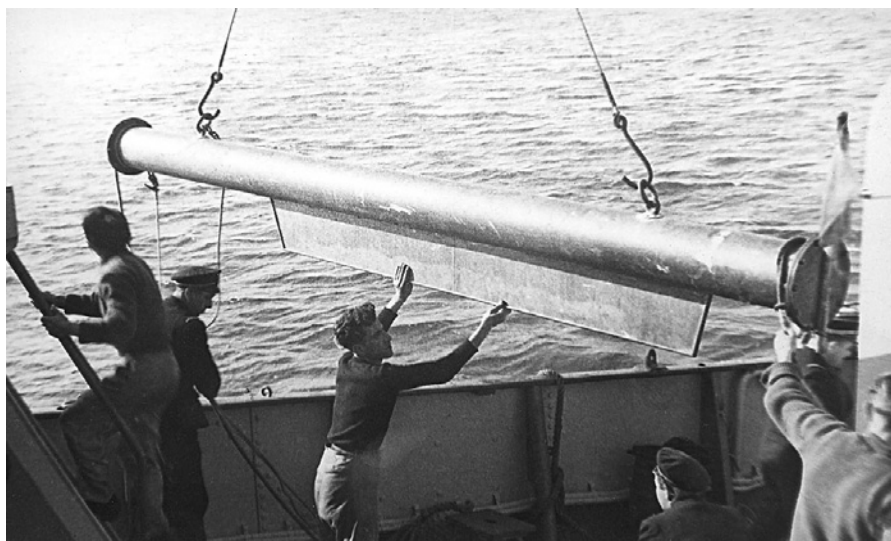
Longtemps le magnétisme ne fut considéré au service hydrographique que dans l'optique de la navigation : toute carte marine doit en effet porter la valeur de la déclinaison magnétique. C'est ainsi que l'on relève dans les annales hydrographiques, entre 1952 et 1972, une centaine de rapports sur des mesures et déclinaisons et d'intensité magnétique effectuées par les missions hydrographiques avec les instruments appropriés tels que le théodolite Wild To de la firme Wild.

Les observations à terre du magnétisme disparurent presque complètement dans les missions hydrographiques avec l'avènement dans les années 1970 des modèles mondiaux calés sur un réseau de stations permanentes donnant une précision suffisante pour la navigation.

Par ailleurs, la recherche d'épaves a bénéficié du développement des magnétomètres remorqués qui mesurent le champ total et permettent donc de détecter les anomalies induites générées sur les épaves. Les magnétomètres usuels permettent de détecter une épave de 10 tonnes à 45 mètres, et une épave de 100 tonnes à 100 mètres. Les magnétomètres servant aux obser-



**Fig. 8 : mise à l'eau d'une bathysonde**



**Fig. 9 : Mouillage d'un magnétomètre en 1951**

■ ■ ■ vations à la mer mesurent le champ magnétique terrestre. Ils sont basés sur la propriété de résonance des protons plongés dans un champ magnétique.

On parle alors de résonance magnétique nucléaire (RMN). Ce type de capteur permet d'atteindre la précision du nanotesla. Ces magnétomètres sont remorqués derrière le bâtiment, à une distance d'au moins 2,5 fois sa longueur.

## La gravimétrie

En 1885, les différences entre les positions astronomiques relatives de Nice

et Toulon et celles déduites de la triangulation de 1842, attirent l'attention sur les différences entre les verticales physiques, données par le fil à plomb, et les normales à l'ellipsoïde. Ces différences sont dues à la gravité : les points astronomiques se réfèrent à la verticale du lieu, les points géodésiques se réfèrent à l'ellipsoïde.

En 1929, ont lieu les premières mesures de gravité en sous-marin, par le géodésien Verring-Meinesz, à l'aide d'un ensemble de pendules dont on observait les oscillations à l'occasion d'une station en plongée. En 1933 et 1936, le service hydrographique reprend les mesures de gravité en

plongée à bord des sous-marins Fresnel et Espoir, en Méditerranée. La précision de 3 à 5 mGal était très suffisante pour mettre en évidence les anomalies de pesanteur par rapport au modèle international.

A la fin des années 1950, la mise au point par la firme ASKANIA (GSS2-Allemagne) d'un gravimètre marin et de sa plate-forme stabilisée pour bâtiment de surface, permit son utilisation sur les bâtiments du service hydrographique, avec une précision de quelques mGal, à partir de 1967.

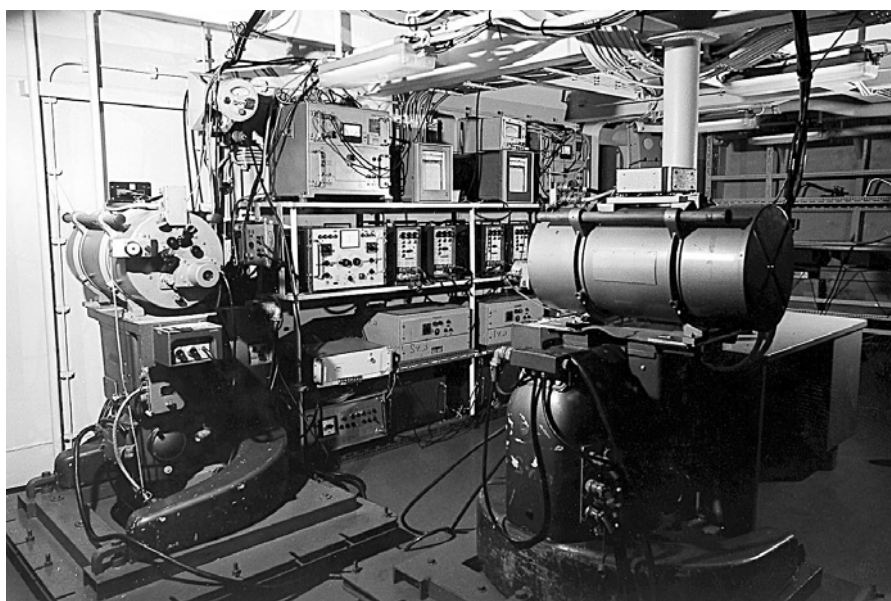
L'utilisation optimale des centrales à inertie des sous-marins a conduit la Marine à exprimer des besoins en matière de connaissance du géoïde. Un modèle de pesanteur pour l'Atlantique Nord-Est a été développé en 1987 par le service hydrographique en collaboration avec le CNES. Ce modèle sert non seulement à maîtriser les perturbations dues aux anomalies de pesanteur, mais aussi à se servir de ces anomalies pour contrôler les centrales à inertie.

## La sédimentologie

Dans le domaine de la sédimentologie et de la géologie marine, les travaux réalisés lors des levés hydrographiques ont été orientés jusqu'aux années 1980 :

- d'une part, vers la détermination de la nature superficielle du fond sous-marin, en vue de renseigner les cartes, car la nature des fonds intéresse la navigation, pour évaluer la tenue des mouillages,
- et, d'autre part, vers les études dites de "régime des côtes", dont le service hydrographique a été responsable de 1858 à 1958, en publiant les "Cahiers de recherches hydrographiques sur le régime des côtes".

Après la fin des sondages au plomb poisson, en 1945, la détermination de la nature du fond nécessitait des appareils de prélèvement, tels que bennes, dragues, carottiers, auxquels le service apporta largement sa contribution. Par ailleurs, la tradition d'archivage des natures de fond avait fait du service, jusqu'au années 1980, le service fran-



**Fig. 10 : La salle des gravimètres à bord du D'Entrecasteaux : 1977**



**Fig. 11 : le tirant d'eau maximal des navires atteint maintenant les 30 m**

çais disposant du fond documentaire le plus riche au plan national.

Dans les années 1980 l'augmentation du tirant d'eau des navires et de la fréquentation du Pas de Calais et du sud de la mer du Nord, amenèrent les français, les britanniques et les néerlandais, à contrôler par des levées périodiques les dunes sous-marines dans ces parages.

D'autre part, la Marine nationale exprima des besoins considérables en matière de connaissance sédimentologique pour les opérations de chasse aux mines et la maîtrise des conditions de propagation des ondes acoustiques, auxquels il faut ajouter ceux de la pêche. Dans les années 1990, une coopération s'engagea entre le SHOM et les laboratoires d'IFREMER et du Bureau des recherches Géologiques et Minières (BRGM).

De nouveaux outils acoustiques permettaient la description de la surface des fonds. Le sondeur latéral, utilisé en recherches de roches, donne aussi une imagerie des fonds qui permet de circonscrire les zones rocheuses, de différencier les sables grossiers et fins, et de décrire les structures sédimentaires. Une telle imagerie est également offerte par les sondeurs multifaisceaux grands fonds (EM12 Dual). Le system Rox-Ann d'analyse des signaux de retour des sondeurs verticaux permet d'obtenir des coupes sismiques à très haute résolution.

La coopération avec des laboratoires universitaires a débouché sur la création d'une variante des cartes marines : les cartes G (pour Garlan) présentant de façon synthétique la

nature superficielle des fonds, au profit d'une large communauté d'utilisateurs : pêcheurs, aménageurs, chercheurs et Défense nationale.

## Pour conclure

L'hydrographie française plonge ses racines dans l'École de Dieppe, au XV<sup>e</sup> siècle, bien avant que Colbert l'incorpore, en 1661, à son département de la Marine. Elle n'a pu se développer qu'en s'attachant à la compréhension des domaines qui servent la navigation : la mesure de la Terre, l'astronomie, la marée, les courants, la météorologie. Le spectre des études relatives à l'hydrographie s'est élargi et approfondi au fil des siècles, en franchissant laborieusement les premières barrières de la mesure précise du temps et des dimensions de la Terre, à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, qui marque la première grande étape de l'histoire du service.

L'ordonnance du 6 juin 1814, créant un "Corps des ingénieurs hydrographes", formés à l'École Polytechnique depuis 1816, va permettre à l'hydrographie de prendre son essor, fondé sur la robuste doctrine de Beautemps-Beaupré. Les hydrographes oeuvrent sous toutes les latitudes pendant tout le XIX<sup>e</sup> siècle et jusqu'à la deuxième guerre mondiale, qui constitue une charnière dans son histoire.

Le développement des géosciences, dans l'après guerre mondiale, a ouvert un vaste champ d'études aux hydrographes dans les domaines de la géodésie, de l'astronomie, de la marée, de l'acoustique sous-marine, de l'océanographie et du spatial. On assiste depuis les années 1980, à un essor sans précédent du service hydrographique, basé sur l'informatique et l'espace. Il se traduit par un partenariat élargi et renforcé avec de nombreux grands organismes tels que le Centre National d'Études Spatiales (CNES), le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), l'Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER), l'Institut Paul Émile Victor, l'Institut Océanographique (IO), la Météorologie Nationale. ●

**Jean Bourgoin** Ingénieur Général de l'Armement (Hydrographe), de l'Académie de Marine

## Remerciement

La rédaction d'XYZ est heureuse de remercier l'Institut Française de Navigation, qui a donné son autorisation à la présente publication, issue de la revue "Navigation" (numéro 202, avril 2003). Elle attire l'attention des lecteurs sur un autre article, passionnant, de cette revue : "En attendant Galiléo... La Terre mesurée depuis l'espace : de Diapason (1966) à Jason (2001), la contribution française", sous les signatures de Michel Lefebvre (ingénieur CNES) et François Barlier (astronome titulaire (CERGA)).

## ABSTRACT

*After World War Two there were a great number of new systems and technologies for localisation, sounding, automatization, data acquisition and processing, hydrography and oceanology. The progress in geodesy as well as in localisation and navigation is due to computers and satellites. The accuracy of sea depth measurement is the consequence of echo sounding improvement. The progress in oceanography knowledge owes to satellites with radar altimeter. The 50th anniversary of the French Institute of Navigation was an opportunity to review as far as possible all these evolutions, in tight conjunction with the French Hydrographic and Oceanographic Service.*

## Transformation dans le Système R.G.F 93 de la base de données géographiques de la Ville de Nice

■ Ludovic ANDRES

*L'intérêt de travailler dans le nouveau système de référence R.G.F.93 en vigueur en France est exposé à travers l'expérience de migration des données géographiques de la Ville de Nice : l'utilisation d'une méthode classique de changement de système de coordonnées de l'ensemble de la base de données géographiques rattachée au système planimétrique N.T.F. est présentée. Cette technique permet de préserver au maximum la précision des données, et peut être mise en œuvre simplement à l'aide de logiciels existants. Cette expérience peut être transposée à d'autres bases de données géographiques et doit inciter à migrer dans le système de référence en vigueur.*

Le décret d'application de l'article 53 de la loi d'Aménagement et de Développement Durable (*Décret n° 2000-127, Loi n°95-115*) a défini depuis le 26 décembre 2000 le R.G.F.93 et sa projection associée le Lambert 93 comme le nouveau système de référence en vigueur. Ce système venait en remplacement de la Nouvelle Triangulation de la France - N.T.F. (Levallois, 1988) dont la faible précision de l'ordre de 1 cm/km, et des problèmes d'échelle locaux rendaient inadapté aux exigences actuelles en terme de levés topographiques et génèrent également des difficultés liées à l'entretien du canevas (Kasser, 2001). Le nouveau référentiel R.G.F.93 remédie à ces problèmes en offrant une précision accrue de l'ordre du centimètre sur l'ensemble du pays. Il permet d'autre part de travailler de manière beaucoup plus simple et précise avec le système de positionnement par satellites GPS - Global Positioning system (Botton et al., 1997). De très nombreux articles ont expliqué en détail tous les avantages liés à ce nouveau référentiel, et l'on peut également obtenir simplement des informations à ce sujet sur les sites internet de l'Institut Géographique National - IGN (<http://www.ign.fr>) ou du Conseil National de l'Information Géographique - C.N.I.G. (<http://www.cnig.fr>).

### Le choix du R.G.F.93

En ce qui concerne la Ville de Nice (VdN), différentes raisons ont conduit à adopter le système R.G.F.93.

### ■ Utilisation du système GPS

L'acquisition et la mise en œuvre de récepteurs GPS a mis en évidence une difficulté liée à son utilisation dans le cadre du système N.T.F. ou de sa densification locale : en effet, ce système de positionnement permet d'obtenir aisément une précision de l'ordre du centimètre quel que soit le lieu dès lors que l'on travaille dans un référentiel précis et homogène. L'établissement d'un canevas à l'aide de cette technologie peut donc conduire à un réseau comportant de faibles déformations. A contrario, la N.T.F. présente des déformations plus importantes et non homogènes. Convertir des coordonnées obtenues par GPS dans la N.T.F. engendre donc une dégradation de la précision initiale des données. Les déformations de la N.T.F. étant importantes au niveau national, et non négligeables localement, il convient de les modéliser et d'en tenir compte dans le processus de transformation de coordonnées afin d'insérer le point mesuré au mieux dans le réseau déformé de la N.T.F. Une grille de conversion (GR3DF97A, 1997) modélisant ces déformations a été élaborée par l'IGN et est disponible gratuitement sur son site internet. Cette grille permet d'insérer les données dans la N.T.F. avec une erreur variant globalement entre 0 et 10 cm : elle convient donc a priori pour transformer toutes les données de petite et moyenne échelle, mais n'est pas adaptée pour les données à très grande échelle que sont les données topographiques et le canevas densifié de précision centimétrique. Cela nous imposait donc d'effectuer des mesures GPS complémentaires afin de modéliser la géométrie locale de notre canevas topographique dans le but de la prendre en compte dans le processus de transformation de coordonnées. Cette étape supplémentaire constituait d'une part une surcharge de travail et d'autre part conduisait malgré tout, in fine, à une dégradation de la précision initiale des données. Cette solution n'était donc pas satisfaisante et génère un sentiment de frustration chez nos géomètres, attachés à effectuer de la belle ouvrage.

### ■ Maintenance et amélioration de la qualité du canevas

Le canevas topographique de la Ville de Nice présente à l'échelle de la commune des erreurs comprises entre 0 et 10 cm environ. Ces erreurs peuvent parfois générer des compensations importantes au regard des distances considérées. Il a donc été décidé d'exploiter au mieux les technologies à notre disposition et de modifier nos méthodes de tra-

vail afin d'améliorer progressivement la qualité de notre canevas. De plus le développement de notre canevas conduit parfois à des travaux de polygonation importants et immobilisants. Tous cela nous a conduit à favoriser l'utilisation du système GPS et à opter pour un référentiel géodésique plus précis.

### ■ Utilisation du R.G.F.93 et du R.G.P.

L'Institut Géographique National ne maintient plus le réseau N.T.F. qu'il a remplacé (**Kasser, 2001**) par le Réseau de Base Français - R.B.F. (1023 sites) formant l'accès opérationnel au R.G.F.93 (23 sites). Les bornes détruites de l'ancien référentiel ne sont donc plus remplacées. En sus du R.B.F., un Réseau de GPS Permanents (R.G.P.) a été développé par l'I.G.N et différents partenaires (Collectivités Territoriales, Universités, CNRS, etc...). Il couvre l'ensemble du territoire français et permet un accès aisé et précis au référentiel national R.G.F.93. Les travaux de canevas par GPS s'en trouvent donc simplifiés et de qualité accrue.

### ■ Travaux topographiques de précision

D'importants projets d'infrastructure ont été lancés par la Ville de Nice tels la construction d'une ligne de tramway traversant la commune, ou le prolongement d'une autoroute urbaine. Ces énormes chantiers sont soumis à des contraintes importantes en terme de précision des travaux topographiques afférents. L'exploitation du système G.P.S dans le R.G.F.93 permettait de répondre aux spécifications techniques liées à la topographie, de bâtir une ossature de canevas et d'intégrer toutes les données actuelles et futures dans la base de données topographique de la commune. Travailler dans l'ancien système N.T.F. n'aurait aucunement permis d'atteindre simultanément ces objectifs. Les importants investissements réalisés en terme de topographie et liés à ces chantiers s'en trouvent ainsi capitalisés et les résultats obtenus pourront être facilement exploités pour des études ou travaux ultérieurs.

### ■ Respect de la Loi

En tant qu'acteur local important, la Ville de Nice doit s'intégrer au cadre légal dans le véritable esprit de la loi, qui est de s'appuyer sur le R.G.F.93 et d'abandonner la N.T.F.

De ce fait, en montrant l'exemple, et à travers les nombreux échanges de données qu'elle réalise avec ses différents partenaires, la Ville de Nice contribue à faire adopter ce nouveau référentiel. Elle participe ainsi à l'effort national concernant la gestion cohérente et homogène des informations géographiques sur l'ensemble du territoire.

## Contexte et Historique

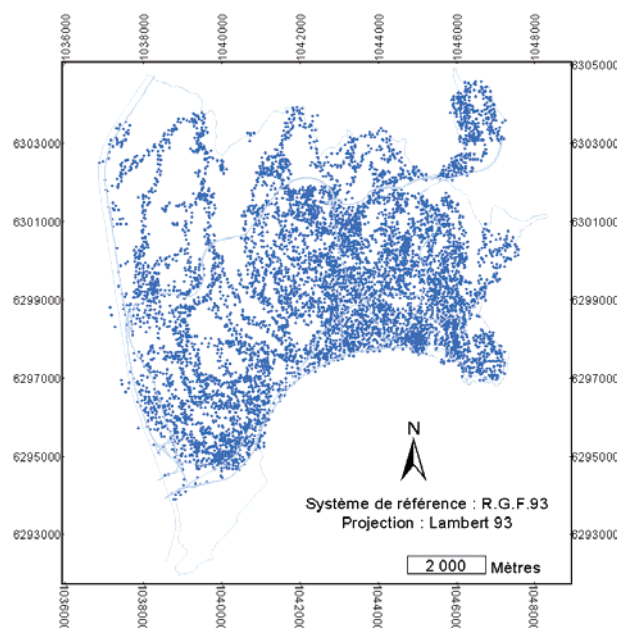
Avant de présenter la méthodologie utilisée pour réaliser la conversion dans le système R.G.F.93, il est nécessaire de présenter un bref historique ainsi que le contexte dans lequel s'opère cette transformation.

## ■ La topographie

La Ville de Nice dispose d'une base de données topographique dont l'élaboration a débuté dans les années 1920. Il s'agissait à l'époque de plans topographiques relevés dans un système local, nommé « Système Ville de Nice » et dont la triangulation initiale de 122 sommets avait été conduite par Monsieur Danger, ingénieur géomètre. Il est important de souligner que dès la création du service il avait été jugé nécessaire de rattacher tous les travaux à un même système de référence planimétrique afin d'assurer un continuum géographique des données : le but recherché était d'en faciliter la gestion (création, mise à jour, édition de plans), et de permettre de mieux coordonner les alignements de voirie sur l'ensemble de la commune. Le dessin s'effectuait sur des feuilles Invar de format A0.

Avec la mise en place de la N.T.F. et la parution le 2 Juin 1948 du décret interministériel rendant son application obligatoire, le Système Ville de Nice devenait obsolète. Aussi, au début des années 70 tous les plans ont été transformés manuellement dans le système N.T.F. L'objectif recherché était non seulement de travailler dans un cadre légal, mais également de faciliter les échanges de données avec les différents partenaires de la Ville de Nice (cabinets de géomètres, services de l'Etat, secteur privé, etc...). Tous les nouveaux levés étaient donc réalisés directement dans la N.T.F. En réalité, il avait été procédé à une densification locale de la N.T.F., densification qui s'est étoffée au fur et à mesure des nombreux travaux topographiques.

Les évolutions technologiques ont affecté naturellement les méthodes de levé, mais également celles liées aux calculs topographiques et aux dessins des plans : dès le début des ■■■



**Figure 1 : répartition géographique des relevés topographiques sur la commune de Nice**

■ ■ ■ années 80, des ressources informatiques ont été attribuées et ont permis de mettre en place une base de données graphique de plans topographiques. Environ 50 % des plans anciens jugés encore d'actualité ont été numérisés tandis que tous les nouveaux levés étaient directement saisis sur le logiciel de dessins qui fonctionnait alors sur un système central IBM. Aujourd'hui, la base de données topographique de la Ville de Nice s'étend sur plus de 80 % du corps de rue de la commune. Elle comporte 1 300 000 points de semis et 13500 stations. La Figure 1 illustre la répartition géographique des relevés topographiques sur la commune de Nice.

Tous les points de la base de donnée sont renseignés d'une altitude provenant d'un réseau de nivellement propre à la Ville de Nice, et qui constitue une densification de celui de l'IGN : à ce propos, une conversion dans le système NGF - IGN69 (Levallois et Maillard, 1970) à partir du système NGF - Lallemand a eu lieu en 2002 (Andres, 2002) afin de travailler dans le système altimétrique en vigueur. La gestion entièrement numérique des données s'effectue sous le logiciel Autodesk Map 5 en assurant un continuum géographique.

## ■ Les autres données du Système d'Information Géographique

Les données topographiques, ne forment qu'une partie du Système d'Information Géographique de la Ville de Nice (SIGN). Ce dernier comprend également de très nombreuses autres informations dont l'acquisition et l'exploitation numérique a débuté au début des années 1990. Aujourd'hui une importante base de données regroupant plus 300 couches correspondant à plus de 30 secteurs d'activité différents est en service. La table 1 présente les principales couches d'information formant le SIGN.

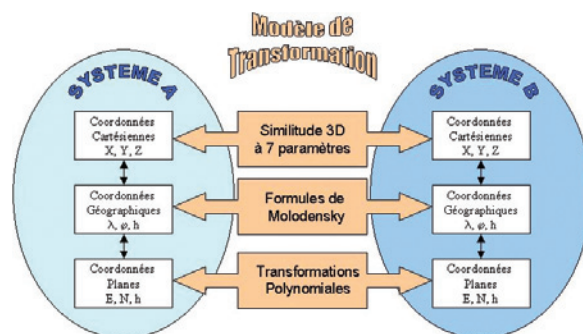
Le fait que la base géographique représente un volume très important (environ 60 Go), réparti en de très nombreuses couches gérées dans différents formats correspondants à plusieurs logiciels, génère des difficultés qu'il faudra appréhender lors du changement de système de coordonnées. De plus, son exploitation de manière continue et intensive aussi bien en consultation qu'en mise à jour ne saurait tolérer une interruption de service durable.

Le processus de transformation de la base de données peut se décliner en deux étapes principales :

- il s'agit en premier lieu de déterminer la méthode de transformation de coordonnées ainsi que ses paramètres associés
- en second lieu il conviendra d'appliquer la transformation sur l'ensemble des couches constituant le SIGN à l'aide de différents logiciels.

## Choix de la méthode de transformation et détermination des paramètres

Comme on l'a vu précédemment, les données géographiques de la Ville de Nice sont exprimées dans un système de coordonnées correspondant à une densification du système de référence géodésique N.T.F. Or nous souhaitons dorénavant obtenir pour chacun des points et objets de la base, des coordonnées dans le nouveau système R.G.F.93. C'est la transformation permettant d'exprimer les coordonnées de ces points dans un autre système géodésique (en l'occurrence dans le R.G.F.93) qui constitue le changement de système géodésique. Cette transformation peut s'appliquer sur des coordonnées planes, géographiques ou bien cartésiennes. De nombreuses méthodes mathématiques de transformation existent, et la figure 2 (IGN, 1999) présente pour quelques modèles de transformation un schéma synoptique permettant d'appréhender le processus global de changement de système



**Figure 2 : Processus de changement de système géodésique : pour chaque type de coordonnées un modèle de transformation est présenté (source : Institut Géographique National)**

**Table 1 : Principales données utilisées et constituant le Système d'Information Géographique de la Ville de Nice**

Echelle	Vecteur	Raster
Petite		Scan 25 IGN, Scan 100 IGN
Moyenne	Plan Urbain de la Ville de Nice Périmètres administratifs : Canton, quartiers... Bd Eclairage Publique Ville de Nice Filaire de voie - Référentiel des adresses Ilots et Iris INSEE	
Grande	Cadastre DGI précision Plan d'Occupation des Sols Autres données Ville de Nice (habitat, nettoyage, sport, éducation, équipement, publics, réseaux, patrimoine, espaces verts, culture, etc...)	Bd Ortho IGN Orthophoto VdN Orthophoto satellite 60cm
Très grande	BD Topographique Ville de Nice et canevas géodésique Alignements de voirie Ville de Nice	

Les principales méthodes de transformation analysées à la Ville de Nice ont été les suivantes :

- Transformation standard N.T.F.->W.G.S.84 avec les paramètres uniques standards
- Transformation en utilisant la grille de conversion planimétrique GR3DF97A
- Transformation en utilisant une grille locale à la Ville de Nice
- Transformation par similitude 2D à 5 paramètres (transformation plane)
- Transformation par une similitude 3D à 7 paramètres

## ■ Critères de choix

Il a été décidé, afin de conserver l'homogénéité de la base de données, et de ne pas altérer sa topologie, de transformer l'ensemble des données avec le même modèle de transformation. En effet, de nombreuses couches de données ont été créées en s'appuyant sur d'autres couches de référence : c'est le cas notamment du Plan d'Occupation des Sols (POS) saisi sur le plan cadastral ou bien des alignements établis à l'aide des relevés topographiques.

De plus, la transformation retenue doit être en accord avec la précision initiale des données : les couches de données les plus précises étant les données topographiques centimétriques, la précision moyenne de la transformation doit donc s'en approcher.

La mise en œuvre ultérieure de la transformation est également un critère très important : les différents logiciels SIG et DAO utilisés devront permettre de réaliser la transformation retenue. Celle-ci devra être analysée sous deux angles distincts :

- Possibilité de réaliser la transformation de manière définitive (la base de données est définitivement convertie)
- Possibilité de réaliser la transformation à la volée (les données peuvent rester dans le système ancien et le logiciel les transforme à la volée au moment de l'affichage ou de l'analyse, dans le système choisi)

La simplicité de la transformation est également à nos yeux un facteur à prendre en compte : une transformation avec paramètres uniques conduit à une transformation en bloc (chaque point est transformé de la même manière) : à précision équivalente, elle conduira à une simplicité accrue et pourra permettre une réversibilité plus simple qui serait utile si une période transitoire longue s'avérait nécessaire.

## ■ Transformation standard N.T.F - W.G.S.84

Il s'agit d'une transformation réalisant une translation en 3 dimensions entre les coordonnées géocentriques cartésiennes du système N.T.F. et celles du système W.G.S.84, ce dernier système étant compatible au niveau métrique avec le R.G.F.93. Les paramètres de translation (**RTG n°14**) sont illustrés dans le système d'équations ci-dessous : pour inverser la transformation, il suffit d'inverser le signe des valeurs de la translation.

$$\begin{cases} X_{WGS84} = X_{NTF} + 168 \\ Y_{WGS84} = Y_{NTF} + 60 \\ Z_{WGS84} = Z_{NTF} - 320 \end{cases}$$

La précision moyenne de ce modèle de transformation est d'environ 2 mètres, et peut aller jusqu'à 5 mètres selon les lieux (**IGN, 1999**).

Cela signifie que cette transformation standard N.T.F.- W.G.S.84 est écartée d'emblée, car l'erreur qui en résulterait ne serait pas compatible avec la précision de nos données.

## ■ Transformation avec la grille de conversion planimétrique GR3DF97A

Cette grille mise au point par l'Institut géographique National est basée sur le même principe de transformation que celui présenté ci-dessus, c'est à dire une translation 3D entre système géodésique. Cependant, au lieu de disposer d'un seul jeu de paramètres, de très nombreux jeux de paramètres (établis par mesures GPS précises sur les sites R.B.F. / N.T.F.) ont été interpolés dans une grille qui recouvre toute la France et dont le pas est de 0,1° en latitude et longitude. La précision obtenue à l'aide de ce modèle de transformation est de quelques centimètres (principalement de 0 à 10 centimètres selon les lieux).

Nous avons effectué des mesures GPS précises en Lambert 93 des principales bornes N.T.F. de la commune de Nice. Nous avons ensuite comparé les coordonnées obtenues avec celles issues de la transformation des coordonnées N.T.F. de ces bornes à l'aide de la grille GR3DF97A et du logiciel CIRCE de l'IGN.

La table 2 présente les résultats obtenus pour ces sites ainsi que les écarts constatés. On s'aperçoit, en ce qui concerne la commune de Nice que les écarts en distance constatés entre un point stationné "nativement" en R.G.F.93 et le même point ■■■

Borne géodésique	Ordre N.T.F	N par GPS	E par GPS	N par CIRCE	E par CIRCE	DN	DE
Mt Chauve	1	6306012,125	1042471,044	6306012,145	1042471,055	0,020	0,011
Observatoire	1	6301373,633	1046291,064	6301373,574	1046291,139	0,059	0,075
Serena	3	6302898,705	1042601,069	6302898,671	1042601,095	0,034	0,026
Albert 1 <sup>er</sup>	3	6297711,936	1043971,146	6297711,807	1043971,163	0,129	0,017
Mt Alban	3	6298538,279	1046500,483	6298538,213	1046500,572	0,066	0,089
Cagnes	3	6292515,762	1035105,736	6292515,783	1035105,507	0,021	0,229
					<b>Moyenne</b>	<b>0,055</b>	<b>0,074</b>

**Table 2 : Evaluation de la précision de la grille GR3DF97A sur les bornes géodésiques N.T.F. de la Ville de Nice (système de coordonnées : R.G.F.93/Lambert93)**

- transformé à partir de ses coordonnées N.T.F. s'échelonnent entre 2 et 23 centimètres, avec une moyenne de 9 centimètres environ. Cette précision constatée sur quelques points confirme la précision moyenne de 5 à 10 cm annoncée par l'IGN pour cette grille de transformation. Nos données topographiques étant de précision centimétrique, cette méthode de transformation est donc insuffisante car elle générerait une perte de précision de nos données.

## ■ Transformation en utilisant une grille locale à la Ville de Nice

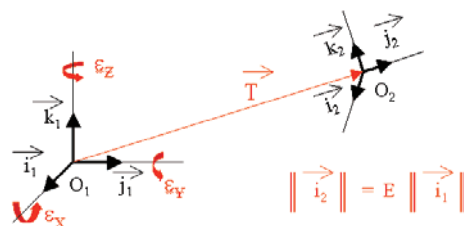
Le principe serait d'établir une grille de transformation semblable à la grille GR3DF97A, mais adaptée à notre géodésie locale. Cela aurait pour effet d'obtenir une précision améliorée, puisque la grille serait calculée à partir de données mesurées par GPS et réparties sur l'ensemble de la commune. Cependant, une analyse approfondie de notre canevas local, permise grâce aux nombreuses mesures GPS effectuées dans le système R.G.F.93, a permis de constater qu'il présente des déformations en amplitude et en orientation qui varient de façon très importante selon les lieux (figure 6). Pour que la grille locale envisagée modélise de manière cohérente les déformations du canevas, il faudrait densifier de manière très importante les observations à réaliser, pour qu'elles soient en adéquation avec les polygonales réalisées depuis plus de vingt ans, polygonales qu'il conviendrait d'identifier précisément. Outre un travail de préparation colossal, cela engendrerait une masse d'observations très importante. Aussi cette solution n'a pas été retenue : l'amélioration de précision que l'on obtiendrait n'étant pas en rapport avec l'investissement en terme de temps passé et de coût. De plus les versions de logiciels DAO et SIG utilisées actuellement à la Ville de Nice, ne supportent pas encore une transformation avec ce type de grille de conversion.

## ■ Transformation par similitude 2D à 5 paramètres (transformation plane)

Cette méthode de transformation consiste à trouver le meilleur jeu de paramètres pour une similitude à 5 paramètres (translation en X et Y, rotation en X et Y, facteur d'échelle), entre des coordonnées planes de la N.T.F. (Lambert III), et les coordonnées planes du R.G.F.93 (Lambert 93). Le problème rencontré avec cette méthode est que peu de logiciels l'implémentent. Aussi, eu égard au contexte logiciel de la Ville de Nice, il était difficile de mettre en application cette transformation à l'aide de nos outils DAO et SIG. Il aurait fallu exporter toutes les données pour les convertir à l'aide d'un processeur intégrant ce modèle de transformation, et les réintégrer ensuite à leur format natif dans leur logiciels respectifs. De plus, les calculs de paramètres que nous avons réalisés selon ce modèle de transformation présentaient des résultats moindres en terme de précision que ceux obtenus avec la méthode évoquée ci-dessous.

## ■ Transformation par une similitude 3D à 7 paramètres uniques

Cette transformation connue également sous le nom de transformation de Bursa Wolf consiste à effectuer une translation,



**Figure 3 : principe d'une similitude 3D entre deux repères de l'espace**

une rotation et à appliquer un facteur d'échelle, afin de passer d'un repère orthonormé de l'espace à un autre repère de même type (figure 3)

Soit M un point de l'espace dont les coordonnées sont  $(X_1, Y_1, Z_1)$  dans le repère  $(O_1, i_1, j_1, k_1)$  et  $(X_2, Y_2, Z_2)$  dans le repère  $(O_2, i_2, j_2, k_2)$ . On peut écrire l'équation matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} \cdot E \cdot \begin{pmatrix} \cos \varepsilon_X \cos \varepsilon_Y \cos \varepsilon_Z & \cos \varepsilon_X \sin \varepsilon_Y \cos \varepsilon_Z & \sin \varepsilon_X \cos \varepsilon_Y \cos \varepsilon_Z \\ \sin \varepsilon_X \cos \varepsilon_Y \cos \varepsilon_Z & \sin \varepsilon_X \sin \varepsilon_Y \cos \varepsilon_Z & \cos \varepsilon_X \cos \varepsilon_Y \cos \varepsilon_Z \\ \sin \varepsilon_X \sin \varepsilon_Y \cos \varepsilon_Z & \cos \varepsilon_X \sin \varepsilon_Y \cos \varepsilon_Z & \sin \varepsilon_X \cos \varepsilon_Y \cos \varepsilon_Z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{pmatrix}$$

- $(T_X, T_Y, T_Z)$  qui représentent le vecteur translation entre le repère  $(O_1, i_1, j_1, k_1)$  et le repère  $(O_2, i_2, j_2, k_2)$ .
- $\varepsilon_X, \varepsilon_Y, \varepsilon_Z$ , sont les rotations autour respectivement des axes  $(O_1, i_1), (O_1, j_1), (O_1, k_1)$ .
- E est le facteur d'échelle, défini de telle sorte que  $\|i_2\| = \|j_2\| = \|k_2\| = E \cdot \|i_1\|$

Les rotations  $\varepsilon_X, \varepsilon_Y, \varepsilon_Z$  étant faibles, on peut faire l'approximation :

$$\begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} E & \varepsilon_Z & -\varepsilon_Y \\ -\varepsilon_Z & E & \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y & -\varepsilon_X & E \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix}$$

L'équation précédente peut s'exprimer de la manière suivante :

$$\begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & X_1 & 0 & -Z_1 & Y_1 \\ 0 & 1 & 0 & Y_1 & Z_1 & 0 & -X_1 \\ 0 & 0 & 1 & Z_1 & -Y_1 & X_1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \\ E \\ \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y \\ \varepsilon_Z \end{pmatrix}$$

Pour un point considéré de l'espace, ce système comporte 3 équations et 7 inconnues. Avec au minimum 3 points de l'espace connus dans les deux systèmes on pourra donc calculer les paramètres.

En pratique, un nombre important de points vont être mesurés dans les deux systèmes et vont conduire à une sur-détermination de ce système d'équations : pour N points mesurés, nous aurons 3N équations et 7 inconnues. Du fait des incertitudes liées aux mesures, les 3N équations apparaissent comme étant toutes indépendantes. On peut résoudre de tels systèmes linéaires par la méthode de l'approximation des moindres carrés :

en effet, si  $i$  est l'indice du point observé dans les deux systèmes ( $1 \leq i \leq N$ ), et en posant

$$b = \begin{pmatrix} X_2^i \\ Y_2^i \\ Z_2^i \\ \vdots \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} X_1^i \\ Y_1^i \\ Z_1^i \\ \vdots \end{pmatrix} \quad M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & X_1^i & 0 & -Z_1^i & Y_1^i \\ 0 & 1 & 0 & Y_1^i & Z_1^i & 0 & -X_1^i \\ 0 & 0 & 1 & Z_1^i & -Y_1^i & X_1^i & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix}$$

et le vecteur des 7 paramètres :  $p = \begin{pmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \\ E \\ \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y \\ \varepsilon_Z \end{pmatrix}$

Le système que l'on cherche à résoudre peut s'écrire :  $M.p=b$   
Pour calculer le vecteur  $p$  (le meilleur jeu de 7 paramètres) il faut minimiser la norme du vecteur erreur  $e=M.p-b$ , c'est à dire minimiser le carré de l'erreur quadratique moyenne multipliée par  $3N$  :

$$3N.e^2 = |M.p-b|^2 = (M.p-b)^T \cdot (M.p-b)$$

Le système  $M.p=b$  n'a pas de solution car il contient moins d'inconnues que d'équations. Par contre, le système  $M^T.M.p=M^T.b$ , de 7 équations à 7 inconnues a en général une solution si le déterminant de  $M^T.M$  n'est pas nul.

Il suffit donc de résoudre ce système pour déterminer le meilleur jeu de 7 paramètres.

### ■ Détermination des paramètres de transformation de la similitude 3D

Comme nous venons de le voir, il nous faut disposer de points de canevas possédant des coordonnées dans les deux systèmes de référence N.T.F. et R.G.F.93. Les données topographiques étant les données de référence les plus précises disponibles à la Ville de Nice, c'est cette couche d'informations qui a été utilisée pour établir les paramètres du modèle de transformation.

La base de données topographiques est originellement dans le système de référence N.T.F. Il ne reste qu'à déterminer pour un certain nombre de points à choisir judicieusement leurs coordonnées en R.G.F.93.

Le meilleur moyen d'accéder rapidement et avec précision à la référence R.G.F.93 est d'utiliser des techniques de positionnement par GPS. La Ville de Nice est d'ailleurs équipée en récepteurs GPS bi-fréquence, et possède une station permanente GPS (Figure 4) intégrée au R.G.P.

Le territoire de la commune s'étend sur plus de 7200 hectares avec un relief de type collinaire comportant des vallons orientés Nord Sud. Les altitudes varient de 0 à 500 mètres. Nous recherchons une précision d'environ un centimètre sur les composantes planimétriques des coordonnées R.G.F.93. Pour cela deux ou trois sessions d'observation GPS de 3 heures sont prévues en mode statique (les résultats seront également utilisés ultérieurement lors de la mise au point d'une grille de conversion altimétrique Hauteur Ellipsoïdale -> Altitude IGN69).

Un maillage de 1,5 km a été appliqué sur la commune conduisant à une quarantaine de points observables en régie. Ces points ont été choisis parmi les 13500 stations existantes sur le terrain.

Chaque point a été étudié avec précaution de manière à répondre aux critères suivants :

- situation géographique proche de la position théorique données par l'application du maillage
- le minimum de masque pour les observations GPS
- déport (et rattachement en Lambert III du point déporté) de la station si nécessaire pour éradiquer les masques
- contrôle de la qualité de chaque station (consultation du calcul de sa polygonale, et du levé topographique environnant)
- vérification sur le terrain de chaque station : pérennité de la station
- nivellement de précision des stations à partir de repères de nivellement IGN lorsque cela est possible (utile pour l'établissement d'une future grille de conversion altimétrique)

Le nombre de points à observer étant conséquent, les observations ont été rigoureusement planifiées et la stratégie d'observation affinée (choix des constellations favorables, choix des antennes après vérification/calibration, stratégie d'occupation, disponibilité des moyens matériels et humains, etc...). La figure 5 illustre une session d'observation réalisée en bord de mer.

Toutes les calculs ont été effectués par rapport au pivot de base que représente notre station permanente NICA, située géographiquement à moins de 10 km de tous les points à stationner. Plusieurs récepteurs GPS réalisant les mesures simultanément, un calcul de fermetures internes et externes ■■■

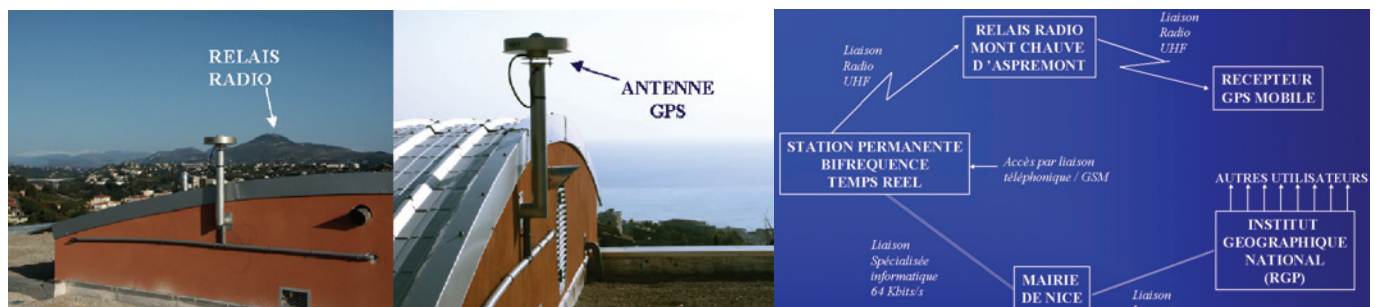


Figure 4 : Photographies et architecture fonctionnelle de la station permanente GPS de la Ville de Nice (NICA).



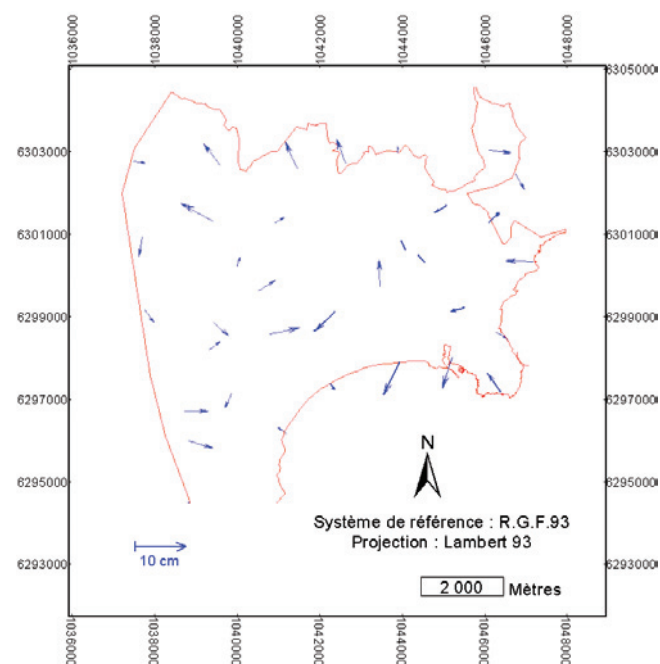
**Figure 5 : Observation d'un point géodésique situé sur la Promenade des Anglais - Matériel utilisé : Antenne ASHTECH 701945E\_M, Récepteur THALES 6502**

(Botton et al, 1997) était systématiquement effectué à l'issue des traitements en mode statique. Certaines lignes de base présentant des incohérences entre sessions successives, il a été nécessaire d'effectuer des observations complémentaires afin de lever certains doutes. Les résidus planimétriques obtenus par cette méthode de transformation en bloc sur chacun des points sont présentés en table 3.

On peut s'apercevoir que les écarts en distance varient de 2 cm à 9 cm environ si l'on ne considère pas le point du Mont chauve qui semble présenter un résidu anormal : ce point (1<sup>er</sup> ordre N.T.F.), n'est d'ailleurs pas en bon accord avec l'autre point N.T.F. 1<sup>er</sup> ordre de la commune (Observatoire).

L'écart moyen de 5 cm constaté correspond à la précision attendue de notre canevas, et l'écart type de 2,7 cm autour de cette moyenne peut être considéré comme faible.

La figure 6 propose quant à elle, une représentation graphique de ces écarts : le caractère anisotrope des orientations et des amplitudes des résidus apparaît de manière évidente.



**Figure 6 : Représentation graphique des résidus issus du modèle de transformation 3D à 7 paramètres pour les points géodésiques observés du canevas**

Point géodésique	Résidu Est (cm)	Résidu Nord (cm)	Résidu en distance (cm)
Albert 1 <sup>er</sup> -D1	-3,79	-8,13	8,97
Brancolar	0,92	-2,32	2,50
Carras	-2,25	1,77	2,86
Cimetiere de l'est	5,83	-0,67	5,87
Corniche des oliviers	2,34	1,12	2,59
Raiola	-8,20	4,53	9,36
Durandy	0,75	2,29	2,41
Ecole Bellanda	-1,69	1,37	2,18
Fabron	2,71	1,88	3,30
Ginestiere	3,98	-3,52	5,31
Jeanne D'arc	-0,23	6,87	6,87
Leclerc	4,09	-1,32	4,30
Les combes	2,95	-0,50	2,99
Lingostiere	-0,72	-5,03	5,08
Madeleine-D1	4,42	2,56	5,11
Maeterlink	-2,93	4,43	5,31
Magnan	0,72	-0,96	1,20
Marmorini	2,17	-4,09	4,63
Mont Alban	2,94	-1,92	3,51
Montreal	-1,45	-3,60	3,88
MtChauve-b	-2,86	14,22	14,51
NICA	7,78	1,56	7,93
Nikaï	5,97	-1,86	6,25
Observatoire-D1	2,80	2,09	3,50
Pont du Var	-3,23	-0,04	3,23
Pontremoli	6,31	-0,08	6,31
Ponts jumeaux	-3,07	-1,47	3,40
Port-D2	-2,56	-7,82	8,22
Rimiez Lombardie	-0,05	1,62	1,62
Riquier	-2,88	-0,71	2,97
Serena	-2,14	6,00	6,37
St pancrace	-2,89	6,76	7,35
St pierre de Feric	-4,97	-4,71	6,85
St Roman	-4,04	5,42	6,75
Verola	2,18	-3,24	3,90
Vinaigrier Gde Corniche	-7,12	0,46	7,14
<b>Moyenne des [Résidus]</b>	<b>3,14</b>	<b>2,86</b>	<b>5,13</b>
<b>Ecart type</b>	<b>3,85</b>	<b>4,38</b>	<b>2,68</b>

**Table 3 : Liste des résidus obtenus sur les points N.T.F. observés par GPS dans le système R.G.F. 93. Ces résidus sont obtenus en utilisant le modèle de transformation de Bursa Wolf (similitude 3D à 7 paramètres) calculé.**

Cela justifie pleinement le fait d'utiliser une transformation en bloc comme celle fournie par le modèle de Bursa Wolf avec un jeu unique de paramètres. La mise au point d'une grille de transformation locale de type GR3DF97A, comme évoqué précédemment, aurait nécessité une très importante densification pour modéliser de manière réaliste les déformations de notre canevas.

Les paramètres calculés pour passer du système N.T.F. densifié Ville de Nice au R.G.F. 93 sont les suivants :

$$\begin{aligned}
 T_x &= -166,1092 \text{ m} & T_y &= -59,6894 \text{ m} & T_z &= 321,8207 \text{ m} \\
 R_x &= 0,27702 \text{ ''} & R_y &= 0,014708 \text{ ''} & R_z &= 0,24028 \text{ ''} \\
 E &= 1-0,41527 \cdot 10^{-6}
 \end{aligned}$$

L'établissement de ces paramètres aura finalement nécessité approximativement :

- 100 heures de préparation, repérage, matérialisation et rattachement éventuel des points

- 300 heures d'observation
- 50 heures de vidage et calcul des observations
- 50 heures d'études, mise en forme et calcul des paramètres.

Cela représente au total environ 500 heures de travail.

Le nombre de sessions ainsi que la durée de chaque session aurait pu être minimisé, mais effectuant ce travail de manière unique, nous avons souhaité prendre le maximum de précautions quant à la qualité des coordonnées obtenues par GPS. De plus nous souhaitons obtenir une bonne précision sur la hauteur ellipsoïdale afin de réutiliser ces résultats pour analyser la grille de conversion altimétrique R.A.F.98 (Duquenne, 1998), ou en établir une localement si celle-ci s'avérait insuffisante.

## Mise en œuvre de la transformation sur la base de données géographiques

Les données de notre système d'information géographique sont gérées principalement à l'aide des logiciels ArcView (ESRI) et Autodesk Map (AUTODESK). Nous allons étudier successivement les possibilités offertes par ces produits pour mener à bien nos transformations.

### ■ Outil SIG

Le logiciel ArcView 3.3 comporte de manière native des outils de projection mais ne comporte pas d'outils permettant de changer de système géodésique. Nous n'avons pas trouvé sur le site d'ESRI France d'outils complémentaires permettant de réaliser cela.

Pour pouvoir travailler dans le système R.G.F.93 (en Lambert93 par exemple) il convient donc de transformer les données une fois pour toute dans ce système de référence, à l'aide d'un autre outil.

Le logiciel Arcview 8.3 présente de nombreuses fonctionnalités concernant l'exploitation simultanée de données qui sont dans des systèmes de référence différents.

La transformation par similitude à 7 paramètres de type Bursa Wolf fonctionne à la volée ou permet une transformation définitive des données vecteur. Elle fonctionne également sur les données raster mais uniquement à la volée et ne permet pas de transformation définitive sur ce type de données sans le recours à une extension spécifique. Enfin, elle ne fonctionne pas sur les données CAO/DAO Autocad (DWG-DXF) ou Intergraph (DGN).

Cette version 8.3 du logiciel ne supporte pas la grille de conversion GR3DF97A : ESRI France nous a donné la possibilité d'évaluer la version 9 d'Arcview qui sera commercialisée courant 2004, pour laquelle nous avons pu constater le support de la grille GR3DF97A ainsi que son bon fonctionnement.

Puisqu'à la ville de Nice nous travaillons simultanément avec des données SIG et DAO, nous serons donc forcés de convertir nos données DAO une fois pour toute dans le système souhaité pour pouvoir utiliser ces données DAO à l'aide du logiciel SIG Arcview.

### ■ Outil DAO

Le logiciel Autodesk Map 5 présente des fonctionnalités SIG permettant notamment d'interroger (visualisation ou conversion définitive) un dessin dans un système différent de celui dans lequel se trouvent les données originales. Ces transformations tiennent compte du changement de système géodésique par la méthode de Molodensky ou bien par une transformation à 7 paramètres de Bursa Wolf. Toutes les projections et ellipsoïdes sont également paramétrables. Après avoir effectué de nombreux tests et paramétrages pour les projections nous concernant, et les transformations géodésiques souhaitées nous ne sommes pas parvenu à obtenir des résultats satisfaisants. Le problème a été signalé à Autodesk qui reconnaît que ces fonctionnalités ne sont pas pleinement opérationnelles en version Autodesk Map 5, et nous oriente sur les versions Autodesk Map 6 et ultérieures. D'autre part aucun support de la grille de conversion GR3DF97A n'existe dans cette version 5.

Les versions 6 et ultérieures présentent les mêmes fonctionnalités que la version 5 sur ce sujet avec en plus le support de la grille GR3DF97A. Après des paramétrages adéquats, il s'avère que les changements de systèmes géodésiques fonctionnent parfaitement bien, notamment en ce qui concerne la transformation par similitude à 7 paramètres de type Bursa Wolf. Nous avons également testé avec succès la transformation utilisant la grille de conversion GR3DF97A (après paramétrage du symbole décimal comme caractère point).

Il est nécessaire de préciser que ces transformations ne concernent que les données de type vecteur manipulées par le produit Autodesk Map.

D'autre part il n'y a aucune possibilité d'exploiter ces fonctionnalités pour des données de type raster : toutes les données raster doivent donc obligatoirement être converties de manière définitive avec un outil spécifique dans le système de référence choisi.

Nous sommes donc forcés de convertir définitivement dans le système de référence choisi les données :

- Raster (à cause des outils DAO utilisés)
- DAO (à cause des outils SIG utilisés)

Nous avons donc décidé de transformer de manière définitive l'ensemble de nos données géographiques, qu'elles soient de type raster, ou vecteur (SIG et DAO)

Cette transformation a été planifiée sur une période d'une semaine. Toutes les données dont la fréquence de mise à jour est faible ont été préalablement transformées (données raster et vecteur). Les autres ont été identifiées et transformées rapidement en concertation étroite avec les services utilisateurs. Des actions d'information ont eu lieu régulièrement depuis environ une année, et des séances de formations sont organisées pour les correspondants des différents services utilisateurs. Enfin, vis à vis des professionnels (géomètres, entreprises, acteurs locaux, ...), des formulaires d'information ont été envoyés par courrier, et une réunion d'information sera organisée début 2004 sur l'intérêt de ce nouveau référentiel et sa mise en œuvre à la Ville de Nice.



## ■ ■ ■ Conclusion

L'adoption du nouveau référentiel R.G.F.93 apparaît comme un choix inévitable et sage afin de rester en adéquation avec les méthodes de travail modernes et le degré de précision qu'elles permettent. La seule difficulté, de taille malgré tout, consiste en la transformation des données existantes. Ce travail important et coûteux doit cependant être réalisé : la difficulté de cette tâche est liée à la précision et à la complexité des données à transformer. D'ores et déjà notre étude montre qu'il peut être aisé de transformer des données de précision décimétrique à l'aide de modèles établis tel la grille de conversion GR3DF97A qu'il est possible de mettre en œuvre simplement à l'aide de logiciels existants. Pour des données de haute précision, notre expérience prouve que cela est réalisable dès lors que la volonté de travailler dans le système légal existe.

Peu de témoignages sur ce type d'expérience existent en France. Aussi le changement de système de coordonnées réalisée ici doit avoir une action de démystification : elle doit inciter les gestionnaires de bases de données géographiques tels des collectivités territoriales, des services de l'Etat, des concessionnaires de réseaux, ou des cabinets de géomètres demeurés dans la N.T.F. ou dans des systèmes locaux à migrer dans le système légal R.G.F.93. ●

## Contacts

**Ludovic ANDRES** - Ingénieur en Chef  
Direction Information Géographique  
membre du GT SIG TOPO de l'AITF

### Mairie de Nice

3 rue de la Terrasse - 06364 NICE Cedex 4  
Tel : 04 97 13 25 53  
Fax : 04 97 13 29 24  
Email : ludovic.andres@ville-nice.fr

### Bernard Laugier

Direction Information Géographique  
Bernard.laugier@ville-nice.fr

### Denis Delerba

Responsable de la Direction Information Géographique  
Animateur National GT SIG TOPO de l'AITF  
Denis.delerba@ville-nice.fr

## ABSTRACT

*The City of Nice operates a large geographic database in a former french geodetic reference system named N.T.F. that has been replaced by a new one, the R.G.F.93. The advances of working in the R.G.F.93 system are pointed out through the data migration project that has been carried out. The coordinate conversion process that has been selected aims to preserve the data precision, and its implementation involving the use of common algorithms and softwares is presented. Finally, such geographic database coordinate conversions are encouraged in order to support the R.G.F.93 system.*

## Remerciements

Je tiens à remercier tout spécialement mon collègue Bernard Laugier, responsable des brigades topographiques, pour son implication personnelle, le travail de grande qualité qu'il a fourni et l'aide indispensable qu'il a apporté à ce projet. Je félicite d'autre part tous les topographes de la Direction Information Géographique (brigades de topographie et des alignements) pour leur contribution active à toutes les observations GPS qui ont été réalisées ainsi que les collègues qui ont participé à la transformation de la base de données géographiques. Je remercie enfin Messieurs Michel Kasser (IGN) et Denis Delerba (Ville de Nice) pour leurs commentaires, Monsieur Alain Harmel (IGN) pour ses conseils, ainsi que les sociétés AUTODESK France, ESRI France, THALES Navigation, AEC Informatique (St Laurent du Var, 06), Digitech International (Bagneux, 92), et Latitude Géosystèmes (Deuil la Barre, 95) pour leur collaboration.

## Références

**ANDRES L., 2002**, *Conversion dans le système altimétrique IGN69 de la base de données topographiques de la Ville de Nice, XYZ n°91*, Juin 2002

### ARRÊTÉ INTERMINISTÉRIEL du 2 juin 1948

fixant les conditions d'exécution et de publication des levés de plans entrepris par les services publics, Journal Officiel.

**BOTTON S., DUQUENE, F., EGELS Y., EVEN M., WILLIS P., 1997**, *GPS localisation et navigation*, collection. CNIG-GPSD, éditions Hermes.

**DECRET N° 2000-1276, 26 Décembre 2000**, Décret portant application de l'article 89 de la loi n° 95-115 du 4 février 1995 modifiée d'orientation pour l'aménagement et le développement du territoire relatif aux conditions d'exécution et de publication des levés de plans entrepris par les services publics

**DUQUENNE, H., 1998**, *QGF98 - a new solution for the quasi-geoid in France, Proceedings of the Second Continental Workshop on the Geoid in Europe*. - Reports of the Finnish Geodetic Institute, M.Vermeer and J. Adam, editors, Masala, Finland.

**GR3DF97A, 1997**, *Grille de paramètres de transformation de coordonnées* - notice d'utilisation, Service de Géodésie et de Nivellement, Institut Géographique National.

**IGN, 1999**, *Document d'information générale sur la transformation de coordonnées*, Institut Géographique National, Service de Géodésie et de Nivellement.

**KASSER, M., 2001**, *Systèmes R.G.F. 93 et Lambert 93 : de petits problèmes à court terme, de nombreuses simplifications à long terme*, Géomètre, avril 2001.

**LEVALLOIS, J.J., 1988**, *Mesurer la Terre - 300 ans de géodésie française*, Association Française de Topographie, Paris, 1988.

**LEVALLOIS J.J. AND MAILLARD J., 1970**, *Le nouveau réseau de nivellement de 1<sup>er</sup> ordre du territoire français, conséquences pratiques et scientifiques*. IGN

**LOI N° 95-115, 4 Février 1995**, *Loi d'orientation pour l'aménagement et le développement du territoire*, article 89

**RT/G n° 14, Nouveaux systèmes géodésiques utilisables en France (WGS84, ED87)**, Rapport Technique, Institut Géographique National.

# Les routes royales et leurs bornes milliaires

■ Robert VINCENT

*Les grandes bornes routières en pierre, que l'on peut voir encore actuellement au long de nos grandes routes autour de Paris et jusqu'à assez loin de la Capitale, ont été implantées à partir de 1765 à la suite de la construction d'un réseau de routes royales par Trudaine et Perronet, sous le règne de Louis XV. Elles ont donc plus de 200 ans et méritent considération et respect.*

*Cette étude est consacrée à ces routes et aux 250 bornes répertoriées, avant qu'elles ne disparaissent ou ne soient déplacées, faute d'une législation appropriée. Des mentions éparses sont nombreuses surtout dans des revues locales, mais l'étude d'ensemble que nous allons essayer de présenter ici, permet de conforter ces observations entre elles, de préciser le tracé des routes à l'époque de leur bornage et aussi de montrer que si l'origine du bornage, point zéro des routes royales, est à Paris au parvis de la cathédrale Notre-Dame, ce ne peut être qu'au prix d'un artifice étonnant.*

## ■ MOTS CLES

Routes royales, bornes milliaires, toise, toponymie, Trudaine, Perronet

La pratique du bornage des voies routières apparaît comme très ancienne. En effet, chaque grande époque a été marquée par la construction de voies de communication dont les tracés et les bornes portent aujourd'hui témoignage, telles les voies romaines ou les chaussées Brunehaut.



**Fig. 1 :** Borne romaine (hauteur 2 mètres, diamètre 61 cm), sur la route d'Allaines à Chartres (RN 154), face au chemin du hameau de Villereau, 4 km au sud-est du village d'Allonnes (Eure-et-Loir). Une deuxième borne romaine se trouve sur la même route, à environ 5 070 m de là, de l'autre côté du village d'Allonnes.

De nombreux ouvrages se rapportent à l'étude de ces voies antiques et leur lecture montre à quel point la conservation des indices du passé est primordiale.

Qu'en est-il aujourd'hui du réseau des routes royales. Bien sûr, les indices sont plus nombreux et il existe des archives. Mais quand on voit disparaître une borne royale pour faciliter l'entrée d'un supermarché, on peut se prendre à penser que dans 20 siècles, leurs vestiges seront moins nombreux que les vestiges romains subsistant de nos jours.

Selon l'usage, nous appellerons "métré" et par analogie "toisé", les valeurs numériques en mètres et en toises, d'une distance et plus particulièrement de la distance d'un point à l'origine de l'itinéraire sur lequel il est situé.

## Les routes royales

Le XVIII<sup>e</sup> siècle, le siècle des lumières, fut marqué par la naissance de ce qu'on appelle aujourd'hui les travaux publics. Pour ce faire, des œuvres magistrales furent entreprises et menées à bien dans la cinquantaine d'années qui ont précédé la Révolution, telle la construction d'un réseau routier dont le tracé faisait encore envie à toute l'Europe dans la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle.

Pour cela, Daniel Charles TRUDAINE (1703-1769) fonda la première École d'ingénieurs en France, l'École Royale des Ponts et Chaussées en 1747, il y a un peu plus de 250 ans. À sa tête, il plaça Jean-Rodolphe PERRONET (1708-1794) et ensemble, impulsèrent la construction de ponts et de chaussées pour un nouveau réseau de routes royales.



**Fig. 2 :** L'ancienne route royale de Paris à Lyon par la Bourgogne, entre Vermenton et La Poste aux Alouettes (Yonne). Déclassée après la construction de la route actuelle (RN 6) par Avallon, elle a gardé son état primitif. Cette route est parfois appelée "Route Napoléon", ou "Voie Impériale". Cela semble bien marquer non pas la date de sa construction - elle était plus ancienne - mais seulement l'itinéraire emprunté en 1815 par l'Empereur au retour de l'île d'Elbe.

■ ■ ■ Il n'est pas aisé de nos jours de s'imaginer ce qu'était une route royale, car leur grande emprise a permis d'y aménager les larges chaussées modernes. Toutefois, on peut se rendre compte de leur aspect sur quelques portions des 45 kilomètres de l'ancienne route royale de Lyon par la Bourgogne, entre Augy (5 km après Auxerre) et La Cerce (5 km après Avallon), remplacée vers 1852 seulement, par la route actuelle (RN 6).

## ■ Les emprises

Les routes royales de première classe avaient une emprise de 60 pieds de largeur (19,50 m), voire pour certaines 72 ou même 84 pieds. La chaussée était empierrée ou pavée dans le meilleur des cas, sur une largeur relativement étroite de 15 pieds (4,87 m). Les courriers du Roi et les voitures de la Poste aux lettres avaient obligation, de jour comme de nuit, de marcher au galop entre chaque relais. Ils tenaient ainsi "le haut du pavé", en priorité sur les voitures de la Poste aux chevaux (voyageurs) ou des messageries et autres rouliers, qui n'avaient droit que de marcher au trot ou au pas.

## ■ Les alignements

Les nouvelles routes royales devaient être tracées, selon une ordonnance royale édictée dès 1705, par alignements les plus longs possibles. Le plus remarquable d'entre eux dans la région parisienne, est celui de Montgeron à Melun, de plus de 21 kilomètres.

Pour implanter ces grandes lignes droites, les clochers ont souvent servi pour le tracé des alignements. Ils restent alors comme autant de point de mire pour les automobilistes d'aujourd'hui. Parfois même, l'alignement est entre deux clochers, comme celui de plus de 15 km entre Massay (Cher) et Vatan (Indre) sur la route de Paris à Toulouse (RN 20), remarquable avant d'être perturbé par sa transformation en autoroute.

En milieu urbain, de nouveaux tracés sont ouverts pour éviter les centres encombrés, comme à Senlis par l'actuelle rue de la République. et même à travers l'habitat ancien, comme à Orléans où, pour l'aménagement de la route de Paris à Toulouse, une percée rectiligne est tracée dans cette ville par HUPEAU, premier ingénieur des Ponts et Chaussées, depuis la place du Martroi sur la rive droite, par l'ouverture de la rue Royale, la construction d'un nouveau pont sur la Loire comportant 9 arches dont celle du milieu de 100 pieds d'ouverture (1751-1760) et prolongé par une nouvelle chaussée sur la rive gauche, l'avenue Dauphine, jusqu'à la Croix-Saint-Marceau.



**Fig. 3 :** À Massay (Cher), la route royale de Paris à Toulouse est alignée sur le clocher du village.



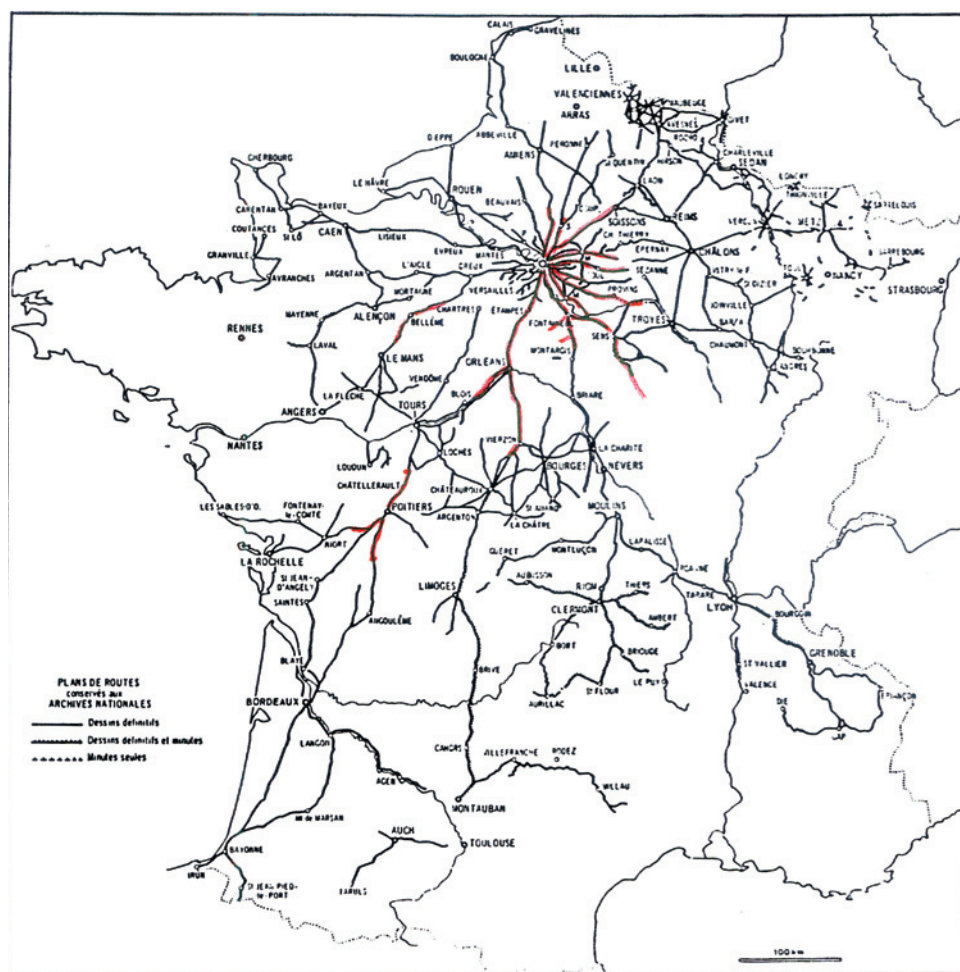
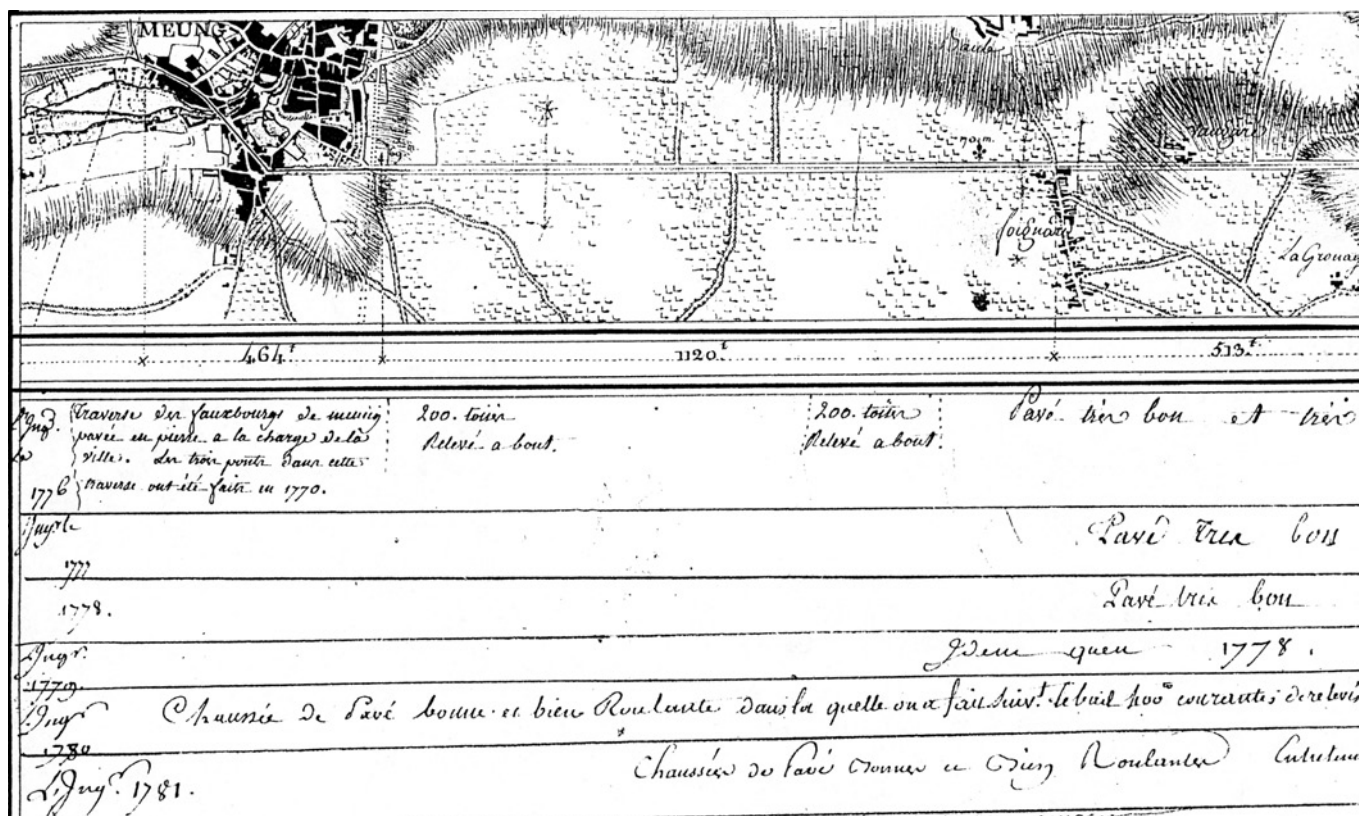
**Fig. 4 :** Le "Carrefour de l'Obélisque" à Fontainebleau. Quatre colonnes de 2 toises de hauteur (3,90 m) étaient à l'origine au départ des routes de Paris, de Lyon par la Bourgogne, de Lyon par le Bourbonnais, et d'Orléans par le Gâtinais. Enlevées depuis plusieurs dizaines d'années, elles ont été replacées en 1999, autour de l'obélisque. Les trois dernières citées portent, à la partie supérieure, l'indication 31. L'Obélisque marque en effet exactement les 31 milliers de toises depuis Paris par Juvisy, Corbeil et dans Fontainebleau, par la rue Royale pour passer devant le Palais.

## ■ Les ronds-points, pyramides, obélisques et colonnes

Les routes allaient ainsi de ville en ville, souvent par grandes lignes droites, les coudes et les carrefours étant parfois soulignés par des ronds-points ou des demi-lunes. Certains d'entre eux furent même ornés au centre par une "Pyramide" comme dans le Bois de Vincennes et à Brunoy, ou par un "Obélisque" comme en Seine-et-Marne à Fontainebleau, à Moret, dans la forêt de Crécy et à Mauperthuis.



**Fig. 5 :** Le pont Saint-Edme à Nogent-sur-Seine (Aube), construit par Perronet pour la route royale de Paris à Bâle (RN 19). Devant le précarité d'un ancien pont à quatre arches, pourtant construit depuis seulement une quarantaine d'années, Perronet fit construire un peu plus en aval, d'octobre 1766 à octobre 1768 (décintrement), un nouveau pont d'une seule arche en anse de panier de 90 pieds d'ouverture (29,24 m). Il a été détruit par les Allemands lors de leur retraite, le 26 août 1944 et malheureusement n'a pas été reconstruit à l'identique, un peu plus large certes, mais avec des brisures aux naissances de la voûte.



**Fig. 6 :** Carte de la route royale d'Orléans à Blois : Extrait des environs de Meung. Elle est accompagnée des annotations sur l'entretien de la chaussée pour les années 1776 à 1781. On remarque sur le côté gauche de la route, le dessin de fleurs de lys avec la chiffration 69 m à la sortie de Meung, et 70 m, marquant les 69<sup>e</sup> et 70<sup>e</sup> milliers de toises depuis Paris.

**Fig. 7 :** Les routes royales dans l'atlas de Trudaine et Perronet. (en rouge les itinéraires dotés de bornes milliaires)

## ■ Les ponts

PERRONET a surtout attaché son nom à la construction de ponts remarquables car ils étaient en particulier, les premiers à tabliers horizontaux. On peut citer :

- le pont de Mantes sur la route de Rouen (1757-65),
- le pont Saint-Edme à Nogent-sur-Seine (1766-68),
- le pont de Neuilly-sur-Seine (1768-1774),
- le pont sur l'Oise à Pont-Sainte-Maxence sur la route de Lille (1774-85), malheureusement détruit en 1914,

## ■ Les chaussées

Pour la traversée des zones inondables, des levées insubmersibles dites "chaussées" dans l'acception originelle de ce terme, souvent rectilignes, sont aménagées, telle celle traversant sur 5 kilomètres, la vallée de la Seine entre Le Mériot et Nogent-sur-Seine (Aube) construite en 1743 (RN 19 de Paris à Bâle), ponctuée pour l'écoulement des crues, de six petits ponts à deux arches, classés récemment à l'Inventaire Supplémentaire des Monuments Historiques et dont le dernier, le plus proche de Nogent, a reçu encastrée dans son parapet nord, la borne milliaire 51.

## ■ Les buttes

Pour franchir des déclivités parfois importantes, les routes royales ne sont tracées en lacets que dans les zones montagneuses. La montée du col de Saverne construite en 1735 (RN 4 actuelle), de 200 mètres de dénivellation, resta longtemps un modèle du genre. Ailleurs, la ligne droite s'impose presque toujours. La route peut alors présenter des pentes relativement raides, et on y trouve parfois au sommet, un lieu-dit "Montapeine" sans doute pour encourager le cocher, comme celui situé en haut de la dénivelée de 130 mètres au départ de La Ferté-sous-Jouarre vers Montmirail :

*Dans un chemin montant, sablonneux, malaisé,  
Et de tous les côtés au soleil exposé,  
Six forts chevaux tiraient un Coche.  
Femmes, moine, vieillards, tout était descendu :  
L'attelage suait, soufflait, était rendu.*

a écrit Jean de La Fontaine dans sa fable "Le Coche et la Mouche" (livre VII, fable 9). Les voyageurs descendaient pour alléger le coche quand on ne demandait pas, aux hommes du moins, de le pousser.

On peut voir encore de nos jours de tels obstacles, comme la côte rectiligne de la Croix-de-fer entre Nogent-sur-Seine et Provins (RN 19) d'une dénivellation de 110 mètres, où la pente atteint 9 % dans sa partie centrale. En certains endroits, l'inclinaison du terrain est corrigée par déblais et remblais, comme dans la forêt de Fontainebleau (RN 7) pour les "buttes" de 50 mètres de dénivellation chacune, de Montpierreux adoucie en 1758, et de Chailly en 1769, où dans sa partie haute, un mur de soutènement d'époque, présente une cavité pour loger la borne milliaire 28. Dans d'autres cas, la route royale est un raidillon rectiligne et a dû être délaissée par la route du XIX<sup>e</sup> siècle qui dessine maintenant un lacet, comme à Montry (RN 34) ou à Plailly (D 126 Oise) et la preuve de ces modifications nous est alors donnée par l'allongement du parcours constaté entre les bornes milliaires de part et d'autre.

## ■ Les relais de poste

Certains ont conservé leur rôle de relais et sont aujourd'hui hôtels et restaurants : "À la Grâce de Dieu" à Brie-Comte-Robert, "le Dauphin" à Nangis, "la Fontaine" à Provins, ces deux derniers récemment disparus, "le Cygne de la Croix" à Nogent-sur-Seine. Un des mieux conservés est le relais de Poste de La Croisière qui se trouve avant Dordives, sur la droite en venant de Nemours (RN 7). Il porte son nom en forme de rébus sur le linteau du portail de la cour : "L A † I R". Mais c'est peut-être bien une restauration du XIX<sup>e</sup> siècle.

## ■ La cartographie des routes royales

Des bandes cartographiques ont été établies à une échelle 5 fois plus grande que la carte de Cassini, d'une ligne pour vingt toises, c'est-à-dire au 1/17 280. Le relief est figuré par des hachures dirigées suivant la ligne de plus grande pente du terrain. Cette technique est en quelque sorte, le prélude à la représentation du relief qui sera adoptée au siècle suivant, pour la carte dite de l'État-major.

Ces cartes routières portent l'indication du toisé depuis Paris toutes les 1 000 toises, par une fleur de lys symbolisée, chiffrée du nombre de milliers de toises. Leur intervalle correspond à 50 lignes sur la carte, soit 112,5 mm, puisque la ligne vaut 2,25 mm environ. Ces points ont souvent été matérialisés sur le terrain par de grandes bornes dites bornes milliaires.

La cartographie de toutes ces routes est réunie dans le superbe atlas routier de Trudaine.

Les itinéraires principaux rayonnent autour de Paris, à l'exception des routes partant de Versailles pour rejoindre Saint-Germain-en-Laye, Saint-Denis et Choisy-le-Roi. Ils sont encore bien visibles aujourd'hui, puisque pour l'essentiel, ils ont été repris au XIX<sup>e</sup> siècle pour constituer le réseau des routes nationales.

## Les bornes milliaires

Le bornage des routes royales s'est avéré nécessaire, à la fois pour l'entretien des chaussées, mais aussi à l'usage des postillons et autres cochers, pour la connaissance des distances entre villes, le repérage des relais de poste et la tarification des services.

À partir de 1765, des bornes furent alors implantées toutes les mille toises, d'où leur nom de "milliaire" et toutes portent gravé, le nombre de milliers de toises depuis Paris. La lieue de poste, qui était alors utilisée pour mesurer les grandes distances routières, valant 2000 toises, ces nouvelles bornes furent aussi appelées bornes de demi-lieues.

La présence de ces bornes est due à l'initiative des Généralités, à commencer par celle de Paris. Pour les autres Généralités, le positionnement du bornage a été tributaire du mesurage amont depuis Paris. En effet, le toisé est mesuré en continu depuis Paris et donne ainsi au voyageur, une connaissance commode des distances depuis la Capitale ou entre deux lieux d'un même itinéraire, par la différence de leur toisé.

Le mesurage des milliers de toise pour l'implantation des bornes milliaires est précis, comme nous l'avons vérifié (cf. ci-dessous). Aucune erreur grossière d'espacement entre bornes successives n'a été décelée sur les 250 retrouvées. On pourrait imaginer que le toisé a été mesuré avec une chaîne de 10, 20 ou 50 toises ; mais il est plus vraisemblable, car plus commode et plus fiable, qu'il ait été exécuté par le comptage du nombre de tours de la roue étalonnée d'un chariot.

Certaines Généralités comme celle de Châlons, ne semblent pas en avoir implantées. En outre, nous allons voir que le type de bornes milliaires et même leur pose, varient d'une Généralité à l'autre. Par contre, leur conservation a souvent été dépendante des délimitations administratives ultérieures. Dans certains départements, les bornes ont été déplacées, voire même détruites.

## ■ Bornes milliaires des Généralités de Paris, Soissons, Orléans, Bourges et Alençon

### Dimensions d'une borne milliaire

En pierre, d'un seul tenant, la borne milliaire (BM) se compose d'un imposant fût cylindrique légèrement effilé vers le haut, de 16 pouces de diamètre (43 cm) et de 4 pieds de hauteur (130 cm env.) y compris un cavet et un listel circulaire le rattachant à un dé d'un pied de haut et de 2 pieds de côté (65 cm), surmontant un bloc plus ou moins bien équarri, enfoncé et grossièrement maçonné dans le sol. Le tout représente un volume d'au moins un demi-m<sup>3</sup> et un poids bien plus élevé qu'une tonne ! La borne milliaire comporte, faisant face à la route :

- en haut du fût, centrée dans une plage de 9 pouces de hauteur, la chiffraison des milliers de toises de la distance depuis Paris, gravée en caractères de 6 pouces (16 cm),



- et juste au-dessous, une fleur de lys en relief dans un ovale de 9 pouces de hauteur et de 6 pouces de largeur, refouillé de 1 pouce en profondeur, marquant ainsi la qualité royale de la route, construite et entretenue sur le budget de l'administration centrale.

**Fig. 8 :** La borne milliaire 26, sur la route de Melun à Fontainebleau (RN 6, ex RN 5 bis), 120 m après La Table du Roi. Sa fleur de lys est remarquablement conservée.

### Positionnement des bornes milliaires

Les bornes milliaires sont toujours placées sur la gauche de la chaussée, en allant dans le sens de la chiffraison croissante, c'est-à-dire en tournant le dos à Paris. Elle est sur le bas-côté souvent très large, ou même au-delà du fossé, sur le terrain contigu.

Les plus lointaines bornes milliaires connues de ce type, encore en place, sont sans doute les bornes 104 et 106, sur la route nationale n° 20, après Vierzon, de part et d'autre du village de Massay, heureusement épargnées lors de la transformation récente de cette nationale en autoroute A 20, par le contournement du village.

### Les bornes milliaires encastrées

Dans les villes et villages, certaines bornes ont été encastrées dans un mur ou dans la façade d'une maison riveraine, soit dès son positionnement initial, soit lors d'une construction ultérieure :

- BM 1 à Paris, rue de Vaugirard
- BM 16 à Lieusaint
- BM 26 à Mormant
- BM 32 à Nangis, rue Aristide Briand
- BM 32 et 33 à La Ferté-sous-Jouarre, rue de Condé, et à Reuil-en-Brie au n° 48 rue du 8 mai 1945
- BM 51 avant Nogent-sur-Seine, dans le parapet du pont sur la Noue des Nageoires
- BM 82 à Bellême, rue du Mans

Ces bornes offrent ainsi la garantie d'être à leur place d'origine. Certaines sont presque entièrement encastrées comme à Nangis et à Reuil, ne laissant apparaître que leur face antérieure.

La borne milliaire 1, située 85 rue de Vaugirard à Paris sur la route de Versailles, à l'angle de la rue Littré, est encastrée dans le mur de clôture du jardin de l'École technique photographique et cinématographique Louis Lumière. Une inscription,



aujourd'hui effacée, indiquait que l'on se trouvait ici à une demilieu du point zéro situé à l'intersection des axes de la cathédrale Notre-Dame et du Petit-Pont. Un report sur le Plan de Paris, montre que la borne est en effet éloignée très précisément de 1 000 toises du point ainsi défini dans l'Ile de la Cité, mais à condition de compter cet éloignement "à vol d'oiseau". En empruntant les rues de l'époque, la distance est bien plus grande. Nous y reviendrons.

**Fig. 9 :** La borne milliaire 1, située rue de Vaugirard à Paris.



**Fig. 10 :** La borne demi-milliaire 33 1/2 de forme cylindrique, sur la route de Fontainebleau à Orléans (RN 152 ex RN 51).

### Bornes demi-milliaires et quart-milliaires

Des bornes intermédiaires marquant le demi-millier et le quart de millier de toise, ont également été implantées.

La borne demi-milliaire comporte un fût cylindrique légèrement effilé vers le haut, d'un pied (12 pouces) de diamètre (32 cm) et de 1 pied 1/2 de hauteur (49 cm env.). On peut en voir encore quelques-unes. Ces bornes ne portent pas de chiffraison. Leur plus petite taille leur a permis de passer inaper-

ques et elles subsistent encore, là où les bornes milliaires ont disparu.

Tel est le cas, sur la route de Fontainebleau à Orléans, dans la traversée de la forêt de Fontainebleau, des bornes demi-milliaires 31 1/2 à 970 mètres de l'Obélisque, 32 1/2 porteuse d'un repère de nivellement indiqué sur la carte 1GN, 33 1/2 à 300 mètres au-delà de la Croix de Souvray, et 34 1/2. Elles sont toutes encore à leur position d'origine.



**Fig. 11 :** La borne quart-milliaire 30 1/4, sur la route de Melun à Montereau (RN 105, ex RN 5)

La borne quart-milliaire comporte un fût de section en forme de triangle équilatéral à pans coupés, les faces principales tronquées étant de 10 pouces (27 cm) et les pans coupés de 3 pouces (8 cm). La hauteur de la borne est de 1 pied 1/2 (49 cm env.). Un des sommets du triangle est dirigé vers la route.

Bien que théoriquement deux fois plus nombreuses que les demi-milliaires puisque

situées au premier quart et au troisième quart de chaque millier de toises, elles sont répertoriées de nos jours avec parcimonie. On peut citer les bornes 17 1/4 sur la route de Chantilly (RN 16), 30 1/4 et 34 1/4 sur la route de Melun à Montereau (RN 105).

## ■ Bornes milliaires de la Généralité de Bourgogne

Dans la Généralité de Bourgogne, traversée par la route de Lyon par Sens, Auxerre, Saulieu, Autun et Châlon, les bornes



**Fig. 12 :** La borne milliaire 120 à Rouvray (Côte-d'Or) semble en place. Dans la partie inférieure, le numéro de la route D 41 a été gravé après le déclassement de la voie, ancienne route nationale 6, suite à la construction de la déviation.

Au dessus, une plaque émaillée indique "Borne Impériale". Même remarque que pour la figure 2. La ville voisine de Saulieu possède deux "bornes Impériales" authentiques qui datent du second Empire (vers 1855), ancêtre de nos panneaux indicateurs.

milliaires sont un peu moins hautes que celles de la Généralité de Paris, de 3 pieds 1/2 (114 cm) au lieu de 4 pieds. La plage de chiffraison n'est plus à la partie supérieure du fût. Par contre, le fût cylindrique de même diamètre de 16 pouces que les bornes de la Généralité de Paris, comporte sur son tiers central, une surépaisseur de 2 pouces, amenant le diamètre à 20 pouces, sur laquelle est portée la chiffraison. Cette configuration donne à la borne un aspect plus trapu. Dans le tiers supérieur, un logement circulaire et non ovale, est refouillé et a peut-être porté une fleur de lys.

Rares sont ces bornes encore visibles aujourd'hui, comme la borne 93 à Champs-sur-Yonne, à 8 km au sud d'Auxerre, déplacée mais mise en valeur dans un massif fleuri, au centre d'un petit rond-point giratoire, près du passage-à-niveau. Plus rares encore sont les bornes encore en place. Rouvray, premier village traversé par la route de Lyon dès l'entrée dans le département de la Côte-d'Or, 17 km après Avallon, possède deux bornes milliaires, la 125 à l'entrée du village sur un trottoir aménagé, et plus loin la 120. La distance de 520 mètres entre les deux bornes prouve que l'une au moins, a été déplacée. La première a en effet, été implantée à Rouvray en 1996 à l'initiative de la municipalité, et est accompagnée depuis 1998 d'une plaque fixée sur un potelet, expliquant que "on a la chance de distinguer encore un peu la fleur de lys dans sa loge; celle-ci n'a pas été complètement effacée à l'époque de la Terreur ou par l'usure du temps". La seconde, la 120, semble en place comme peut en témoigner le toisé de 89 milliers de toises (173,5 km) par l'ancienne route royale depuis l'Obélisque de Fontainebleau.

## ■ Bornes milliaires de la Généralité de Poitiers

Dans la Généralité de Poitiers, plus précisément dans les actuels départements de la Vienne et des Deux-Sèvres, les routes de Paris - Poitiers - Angoulême et Poitiers - Niort furent



**Fig. 13 :** La borne milliaire 185, à 2 km au sud du village des Minières (Vienne) sur la route entre Poitiers et Angoulême (RN 10). C'est à cet endroit précis, à 360 km de Paris, commémoré par une stèle, que le 26 mai 1903 lors de la course automobile Paris-Madrid, la voiture des pionniers Louis et Marcel Renault fut accidentée. Marcel y trouva la mort à 21 ans, laissant son frère Louis, de 5 ans son aîné, continuer seul la carrière industrielle que l'on sait.

dotées de bornes milliaires, à partir du pont sur la Creuse à Port-de-Piles, au toisé 142 100 environ, compté par l'itinéraire depuis Paris par Orléans, Blois, la route sur la levée rive droite de la Loire, et Tours. Dans la Généralité de Tours, entre celles d'Orléans et de Poitiers, aucune borne milliaire ne subsiste. Sans doute, aucune ne fut jamais implantée.

Les bornes milliaires de la Généralité de Poitiers sont de section carrée, légèrement tronçonné pyramidal, de 16 pouces de côté à mi-hauteur et de 3 pieds 9 pouces de haut (122 cm), avec des chiffres de 5 pouces de hauteur. Elles ne comportent pas de fleurs de lys, ni même d'emplacement pour une quelconque décoration.

Contrairement aux autres Généralités, ces bornes milliaires sont positionnées à droite en parcourant la voie dans le sens de la chiffraison croissante, en tournant le dos à Paris.

Une belle série de ces bornes est encore en place sur la route de Bordeaux (RN 10) dans la traversée du département de la Vienne et on trouve sur la route de Niort (RN 11), dans le département des Deux-Sèvres après La Crèche, la milliaire 202, la borne connue la plus éloignée de Paris (393,7 km).

## Distance entre les bornes milliaires

### ■ La toise et le mètre

L'adoption par le décret de l'Assemblée nationale Constituante du 26 mars 1791, de la longueur du quart du méridien terrestre comme base du nouveau système de mesures, dont le mètre devait en être la dix-millionième partie, allait nécessiter d'importantes mesures géodésiques, exécutées par Delambre et Méchain. Après la fin des mesures et des calculs de Delambre en 1798, la valeur de la distance du pôle boréal à l'équateur fut arrêtée à 5 130 740 toises et donc le mètre à 0,5130740 toise. La longueur définitive du mètre fut ainsi définie par la loi du 19 frimaire an VIII (10 décembre 1799) à 3 pieds, 0 pouce et 11,296 lignes.

Cette loi fixait ainsi le rapport inverse : 1 toise = 1,9490366 mètre.

### ■ Espacement des bornes milliaires

L'espacement des bornes milliaires est donc théoriquement d'un peu plus de 1949 mètres.

Cet espacement a été contrôlé par des mesures différentielles de position à la précision centimétrique, au moyen de stations de relèvement sur les satellites artificiels de la constellation GPS. Elles ont été exécutées le 24 juin 1997 en Seine-et-Marne, entre les bornes milliaires 16, 18, 19 et 21 de la route rectiligne et quasiment plate entre Lieusaint et Melun, aujourd'hui Route Nationale n° 6, soit sur 5 000 toises, où la distance mesurée a été de 9 744,98 m soit 4 999,90 toises (écart de - 0,10 toise, soit - 0,20 m). Ce résultat est parfait et l'on peut même être admiratif devant la précision d'implantation des bornes milliaires, il y a plus de 200 ans (*voir revue XYZ 75 de juin 1998*).

On peut être tenté d'utiliser le bornage kilométrique qui a été établi au XIX<sup>e</sup> siècle, à partir de 1853. Il suffit à priori, de relever le point kilométrique des bornes milliaires successives et, si

l'on change de département, de tenir compte du point kilométrique de la limite départementale. Toutefois, il y a lieu aussi de considérer les rectifications de parcours entre le tracé initial des routes royales et l'itinéraire des routes au XIX<sup>e</sup> siècle, au moment de leur bornage kilométrique vers 1853.

Cette méthode s'avère parfois décevante. En effet, la distance séparant les bornes kilométriques, théoriquement de 1 000 mètres, peut en différer sensiblement et d'une façon constante sur une distance assez grande, même en dehors des déviations des villes ou villages construites au XX<sup>e</sup> siècle, où il est de règle de raccourcir ou d'allonger les distances séparant les bornes kilométriques de la déviation, pour rattraper et répartir les différences de parcours. On peut noter par exemple des espacements réguliers de 1005 mètres entre les bornes kilométriques entre Mormant et Maison-Rouge-en-Brie (RN 19) ou dans toute la traversée du département du Loir-et-Cher sur la RN 20, réduisant de ce fait la distance "apparente" entre les bornes milliaires à 1 939 mètres.

## les bornes milliaires répertoriées

Les bornes milliaires encore visibles sont rares dans Paris et aux alentours immédiats, et plus rares sont celles encore en place, en raison de l'urbanisation. Plus de 250 bornes milliaires sont répertoriées, dont 130 dans le seul département de Seine-et-Marne.

On est ainsi amené à classer les bornes milliaires suivant leur éloignement de Paris.

### ■ dans l'ancien département de la Seine

Ces bornes milliaires sont peu nombreuses mais sont en place sauf indication contraire. Les seules connues sont :

- BM 4 à Pantin, avenue du Général Leclerc (D115), le long du cimetière parisien,
- BM 4 dans le Bois de Vincennes, avenue de Nogent (RN34),
- BM 3 à Charenton, rue de Paris (RN5)
- BM 3 à Arcueil, avenue Aristide Briand (RN20), enlevée il y a quelques années, lors de l'aménagement d'un centre commercial,
- BM 5 à Clamart, avenue du Général de Gaulle (D906), récemment déplacée,
- BM 1 à Paris, rue de Vaugirard (RN189),
- BM 4 déplacée à Vanves, avenue du Général de Gaulle,
- BM 6 à Châtenay-Malabry, avenue de la Division Leclerc (RN186, à 80 m à l'ouest du croisement avec D 63),
- BM 11 à Thiais, avenue de Versailles (RN186, 30 m à l'est de la rue Paul Vaillant-Couturier).

### ■ dans l'ancien département de Seine-et-Oise et dans les départements d'Eure-et-Loir et de l'Eure

Les bornes milliaires ne sont plus à leur place d'origine car elles ont été transformées en bornes kilométriques paires dans ces départements. On ne peut donc pas espérer retrouver de bornes milliaires encore en place, que très loin de Paris. Sont encore visibles, sauf indication contraire, les bornes mil-

liaires suivantes :

- BM 9 à la Pointe de Gournay (Gagny) (RN 34), devenue BK 18 puis mise dans le parc Émile Fouchard à Chelles (Seine et Marne),
- BM 11 à Marolles-en-Brie (RN 19), devenue BK 22,
- BM 16 à Arpajon (RN 20), devenue BK 32 en fait marquée 31,96 km c'est-à-dire BK 18 S & O,
- Quart milliaire à Étréchy, devenue la Bh 28,5 S & O,
- BM 22, devenue BK 44 (RN 20) en fait marquée 43,96 km c'est-à-dire BK 30 S & O à la sortie sud d'Étréchy, enlevée et déposée dans le parc de la DDE à Étampes, près de l'échangeur.
- Demi-milliaire 24 1/2 à Étampes (RN 20), devenue BK 49, c'est-à-dire BK 35 S & O.
- BM 14 et 15 entre la Croix de Villeroy (forêt de Sénart) (RN 6 ex 5) et Lieusaint, devenues les BK 28 et 30,
- BM 24 devenue BK 48, à La Queue-les-Yvelines (RN 12) et BM 26 devenue BK 50. Entre ces 2 bornes, une borne demi-milliaire est devenue BK 49 et deux bornes quart-milliaires sont devenues des bornes hectométriques 5 aux PK 48,5 et 49,5,
- BM 35 devenue BK 68, à Marolles (commune de Broué) (RN 12) en Eure-et-Loir,
- BM 4 devenue BK 8, à Saint Cloud (RN 185), rue Gounod face avenue des Chalets.

## ■ au-delà des limites de l'ancien département de Seine-et-Oise et des départements d'Eure-et-Loir et de l'Eure

Voici les bornes milliaires répertoriées :

- sur la RN 1 : BM 20 à Chambly (déplacée)
- sur la RN 16 : BM 17, 19, 22
- sur la RN 17 : BM 18 à 23
- sur la D932a (Oise) (ex RN32) : BM 24, 30
- sur la D 922 : par St-Witz, BM 18 entre Plailly et Mortefontaine et BM 19
- sur la RN 2 : BM 15, 24, 27, 31 à 34, 37, 39 à 41, 43, 44, 46, 47
- sur la RN 3 : BM 13, 15, 17, 20, 21, 23, 25 à 34, 36, 37
- sur la RN 36 : Meaux à May en M. : BM 25 à 31
- sur la RN 33 : BM 32, 34, 35, 39
- sur la RN 34 : BM 10, 12 à 14, 17, 19 à 28, 31, 32, 36, 37, 41, 44
- sur la RN 4 : BM 12 (abattue), 21 (disparue récemment), 22 à Fontenay-Trésigny, 25 déplacée à Rosay et 27 sur D2
- sur la RN 19 : BM 14 à 20, 22, 24 à 53, 55, 57 à 59
- sur l'ancienne RN 5 : BM 16, 18, 19, 21, 24
- sur la RN 7 : BM 20, 25, 27, 28, 31 (Obélisque), 35 à 38, 41 à 43, 45 et sur D225 (Nemours) BM 40 à 42
- sur la RN 472 : BM 22 à Voves
- sur la D 403 (Nemours - Beaumont du Gatinais) : BM 40 à 44, 46 à 48
- sur la RN 20 : BM 48, 54, 57, 75, 83, 98, 103, 104, 106
- sur la RN 152 : entre Fontainebleau et Orléans : BM 36 à 38, 40, 41
- sur la RN 152 : entre Orléans et Blois : BM 62 à 68, 75, 79, 84
- sur la route de Paris au Mans par Dreux, Rémalard et Bellême : sur la D 920 (ex RN 880, ex GC 39 ) ont été déplacées, changées de côté pour devenir des bornes kilométriques

paires : BM77 à 81 (BK10 à 2), et sur la D 938 vers Le Mans (ex RN 138 bis), sont en place : BM 82 à Bellême, encastrée, BM 84, BM 85 (borne demi-milliaire), BM 86 et BM 87.

- sur la RN 10 (dépt Vienne) : 145 à 148, 151, 152, 156, 158, 159, 161 à 163, 166, 174, 184, 185, 187, 189 à 191, 194
- sur la RN 11 : (Vienne) 175, 177, 184, 185, 187, 188, (2 Sèvres) BM 195, 198, 199, 202

## Le point zéro

Le 22 avril 1769, par lettres patentes, le roi Louis XV donne force de loi à une coutume, en décidant que les nouvelles routes royales seraient toisées en prenant pour origine, le parvis de la cathédrale Notre-Dame de Paris. Le parvis venait d'être agrandi vers 1750, par la reconstruction due à l'architecte Boffrand d'un nouvel hospice des Enfants Trouvés. Un point précis fut situé à l'intersection de l'axe de la façade de la cathédrale, rue Neuve Notre-Dame, et de la ligne joignant rue du Marché Palu, les milieux des deux ponts voisins, le Petit-Pont sur le petit bras de la Seine et le Pont Notre-Dame sur le grand bras. Ce point se situerait donc à 150 mètres de la façade de la cathédrale, rue de la Cité actuelle, devant l'entrée de la Préfecture de Police.

La confirmation précise de la position de ce point de départ n'est pas chose aisée de nos jours. Dès l'abord, des discordances flagrantes sont constatées pour les bornes milliaires les plus proches du centre de Paris, entre leur chiffraison en milliers de toises, et leur position kilométrique sur les routes nationales dont l'origine est aussi sur le parvis de Notre-Dame. C'est ainsi que :

- la borne milliaire 4 dans le bois de Vincennes, donc située à 7,8 km de l'origine de son toisé, est sur la RN 34, au point kilométrique 8,4,
- la borne milliaire 3 à Charenton, donc située à 5,85 km de l'origine de son toisé, est sur la RN 5, au point kilométrique 6,5,
- la borne milliaire 3 à Arcueil, donc située à 5,85 km de l'origine de son toisé, était sur la RN 20 avant son enlèvement, au point kilométrique 6,150 env.,
- la borne milliaire 1 à Paris, rue de Vaugirard, donc située à 1,95 km de l'origine de son toisé, est sur la RN 189, au point kilométrique 2,330.

Bien que minimes, quelques centaines de mètres tout au plus, ces écarts ne peuvent en aucune sorte, s'expliquer par des différences de parcours entre routes royales et routes nationales dans la Capitale. Mais le plus troublant est qu'ils sont tous dans le même sens. Quelle que soit la direction, les bornes milliaires citées semblent, en empruntant les rues de l'époque, toujours trop loin du parvis de Notre-Dame.

Pour expliquer cette incompatibilité toujours dans le même sens, certains auteurs ont supposé (Larousse mensuel n°215 janvier 1925, page 667), "que la numérotation des bornes, dans Paris, avait été faite à vol d'oiseau, de 1000 en 1000 toises depuis le parvis". Nous avons vu que l'éloignement à Notre-Dame, de la borne milliaire 1 située rue de Vaugirard, est en effet très exactement de 1000 toises à vol

d'oiseau. L'étude des emplacements des bornes milliaires les plus proches de Paris confirme cette hypothèse. On notera toutefois que la mesure "à vol d'oiseau" n'a pu être réalisée que grâce à l'existence d'un plan de Paris précis.

## Les particularités

### ■ Les fleurs de lys martelées :

Les bornes milliaires portaient toutes une fleur de lys. À la révolution, un décret de la Convention incita les citoyens à faire disparaître toutes traces de royauté. Les fleurs de lys furent alors souvent martelées, laissant l'ovale vide de tout symbole. Néanmoins, quelques bornes milliaires ont conservé leur fleur de lys. Parmi les plus belles qui ont été préservées, on peut citer :

- BM 22 sur la route de Coulommiers, 500 mètres après le passage sous l'autoroute A4
- BM 25 sur la route de Châlons, à Trilport
- BM 26 sur la route de Melun à Fontainebleau, 120 mètres après le carrefour de la Table du Roi
- BM 25 sur la route de Provins, 2 km avant Mormant
- BM 30 sur la route de Provins, 2 km après la raffinerie de Grandpuits

### ■ Les bonnets phrygiens :

Mais parfois sur certaines bornes milliaires, l'emblème royal est remplacé dans son ovale, par un bonnet phrygien en relief :

- BM 27 à Lumigny (Seine-et-Marne) sur la D 20, à 1,1 km au nord du croisement avec la D 402. La borne est légèrement penchée et porte un repère de nivellement Bourdalouë
- BM 28, sur la D 402, transplantée devant l'entrée du château de La Fortelle
- BM 32 et 33 sur la D 94 à Crouy-sur-Ourcq, entre May-en-Multien et le Château de Gevres-le-Duc
- BM 40, sur la D 225 à Nemours, sur la route de Chéroy

Certains ont voulu y voir l'action de citoyens à l'ardeur républicaine affirmée, qui auraient non seulement martelé une ancienne fleur de lys, mais refouillé l'ovale encore davantage pour en laisser ressortir un bonnet phrygien en relief.

Cela n'apparaît pas vraisemblable au vu des considérations suivantes :

- le bonnet phrygien n'est pas plus enfoncé dans son ovale que la fleur de lys classique et il est tout aussi soigneusement sculpté, ce qui relève plutôt d'un travail d'artiste en atelier que d'une réalisation sur le terrain.
- les itinéraires précités, dotés de bornes à bonnet phrygien, sont tous à caractère secondaire et on n'y rencontre aucune borne à fleur de lys ; à contrario, aucune borne à bonnet phrygien n'est répertoriée sur les grands itinéraires dotés de bornes à fleur de lys.
- le toisé de ces itinéraires secondaires, n'a pu être entrepris qu'après celui des routes principales, puisque reprenant à leur embranchement, la distance depuis Paris, et on constate qu'après une bifurcation, si des bornes "républicaines" prennent parfois la suite de bornes fleurdelisées, le contraire n'est jamais observé.
- enfin, si le mètre naquit d'une décision de la Convention du

1<sup>er</sup> août 1793, la toise resta en usage pendant toute la période révolutionnaire et encore longtemps après, et le bornage kilométrique des routes ne fut adopté qu'en 1853, comme déjà dit ci-dessus.

On est donc logiquement fondé à penser que le bornage des routes, inachevé à la Révolution et toujours en cours d'ailleurs du fait du développement continu du réseau, fut vraisemblablement poursuivi après 1793 sur les routes secondaires de la Généralité de Paris, par un bornage toujours en toise, mais avec des bornes milliaires réalisées d'emblée avec bonnet phrygien.



**Fig. 14 :** La borne milliaire 32, sur la D94 à Crouy-sur-Ourcq, marquée du bonnet phrygien

### ■ La conservation des bornes milliaires :

Mais malgré les vicissitudes du temps, le plus bel exemple de conservation d'ensemble est sur la route de Troyes (RN 19). Il est remarquable que sur les quarante bornes milliaires qui jalonnaient l'itinéraire entre Brie-Comte-Robert (BM 14) et jusqu'au-delà de Nogent-sur-Seine (BM 53), toutes soient encore présentes de nos jours, à l'exception seulement des BM 21, 23 et 33, le fût de cette dernière étant dans le fossé. Ce bel ensemble avait d'ailleurs attiré en 1975, la convoitise d'un célèbre collectionneur de voitures anciennes de Mulhouse qui souhaitait orner l'entrée de son musée d'une allée bornée. Ce fut de justesse, après la publication le 20 janvier 1976 dans La République de Seine-et-Marne, d'un article de René-Charles Plancke, plus tard rédacteur en chef de la revue "Notre Département, La Seine et Marne" que la cession des bornes par les Ponts et Chaussées, fut refusée.

Mais malgré leur poids, certaines bornes furent déplacées.

- Dans le meilleur des cas, elles furent réimplantées sur la même voie :

En plus du cas des bornes milliaires situées dans l'ancien département de Seine-et-Oise, qui ont été transformées en bornes kilométriques paires comme nous l'avons vu, on peut citer encore quelques autres exemples de déplacement sur la même voie, telles les BM 42, 43 et 44 à Provins, D'autres furent carrément enlevées et replacées ailleurs, généralement dans des jardins publics. Par exemple : BM 5 à Clamart, BM 9, transformée en BK 18 de la RN 34 à Gagny, mise dans le jardin public à Chelles, BM 22 à Meaux, BM 34 à Coulommiers contre la chapelle des Capucins. BM 79 à Mer (Loir et Cher) sur la route d'Orléans

à Blois, placée dans le parc de la Corbillière, ainsi que BM 45 devant l'église d'Avon près de Fontainebleau, déplacée de 30 km ! BM 46 à Artenay, contre l'église, déplacée de 7 km ! BM 48 à Dordives, placée au centre d'un rond-point fleuri, au sud de l'agglomération.

Objets inanimés, avez-vous donc une âme ? aurait dit le poète. Ce qui est certain, c'est que les bornes qui ont été animées par un déplacement intempestif, n'en ont plus. Elles ne marquent plus rien. En quelque sorte, on peut dire qu'elles sont mortes, alors que celles restées en place et qui ont gardé toute leur signification, sont toujours vivantes. Il en serait de même d'un cadran solaire mis au musée. Ces quelques exemples montrent l'intérêt qu'il y aurait de classer in situ toutes ces bornes à l'Inventaire Supplémentaire des Monuments Historiques.

## ■ La toponymie des lieux-dits :

Le nom donné à certains lieux-dits, semble bien refléter parfois la présence d'une de ces grandes bornes, par exemple :

- la "Haute Borne", autour de la BM 31, à l'entrée de La Ferté-sous-Jouarre sur la RN 3 et autour de la BM 43, à 2 km au sud de Toury, sur la RN 20.
- la "Demi-Lieue", autour de la BM 40, à 2 km au sud de Nemours sur l'actuelle RN 7, et de la BM 19, à Osny, à 5 km au nord-est de Pontoise, sur l'ancienne RN 15,
- la "Fleur-de-lys", près de la BM 14, à Brie-Comte-Robert, sur la RN 19,
- la "Borne", autour de la BM 34, à 2 km au nord d'Angerville, sur la RN 20,
- le "Champ de la borne", à la hauteur de la BM 186, à 3,5 km au nord de Couhé, sur la RN 10 (Vienne)

On note à l'appui de cette présomption, que ces lieux-dits sont tous contigus à la route royale et tous du côté de la route portant la borne milliaire.

## ■ Les limites départementales :

Après la création des départements, la matérialisation des limites départementales fut rendue obligatoire par décret du 11 février 1813. Il semble bien que cette délimitation s'appuya alors sur certaines bornes milliaires. On peut citer :

- BM 7 entre les anciens départements de Seine et de Seine-et-Oise, sur la route de Paris à Orléans (RN 20), aujourd'hui entre les départements des Hauts-de-Seine et de l'Essonne, c'est-à-dire entre les communes d'Antony et de Massy, borne aujourd'hui disparue mais qui se trouvait à l'angle sud de l'avenue Léon Jouhaux,
- BM 48 entre les départements de Seine-et-Marne et du Loiret, sur la route départementale D 403, de Nemours à Beaumont-du-Gâtinais,
- BM 75 entre les départements du Loiret et du Loir-et-Cher, sur la route d'Orléans à Blois, aujourd'hui RN 152.

On remarque que les bornes limites de départements, contrairement aux bornes milliaires, sont généralement à droite en venant de Paris. Or précisément, dans les trois cas ci-dessus, la borne départementale est à gauche. ●



**Fig. 15 :** La borne milliaire 75 et la borne marquant la limite départementale Loiret - Loir-et-Cher, côte à côte sur la route d'Orléans à Blois

## Bibliographie

- Atlas de Trudaine** – Archives Nationales, série F 14 octobre, fichiers 8443 à 8449, 8473, 8475
- Georges Reverdy** – *L'histoire des routes de France, du Moyen-âge à la Révolution* (Presses de l'École nationale des Ponts et Chaussées 1997)
- Jean Mesqui** – *Les routes dans la Brie et la Champagne occidentale* (Revue Générale des routes et aérodromes 1980)
- Revue bimestrielle "Notre Département La Seine-et-Marne"** n° 1 à 47 (Éditions Amattéis, 77350 Le Mée-sur-Seine 1988-1996)
- Jean Rousseau** – *La poste aux chevaux en Seine-et-Marne et dans la région Est de Paris* (id 1994)
- J.-M. Goger** – *La politique routière en France de 1716 à 1815*. Thèse de doctorat dactylographiée. Paris, École des Hautes Études en Sciences sociales 1988.
- A. Hugues** – *Les routes de Seine-et-Marne avant 1789*, Melun 1897

## Crédits photographiques et remerciements

- fig. 1 : Gérard ROBINEAU (AFT 1901)
- fig. 4 : DDE de Seine et Marne (subdivision de Fontainebleau) et Jean ALLEMAND (AFT 2004)
- fig. 5 : carte postale ancienne
- fig. 6 : Archives départementales du Loiret
- fig. 7 : Archives Nationales
- fig. 8 : Pierre VINCENT
- fig. autres par l'auteur

# La Chine s'éveille

■ Paul COURBON

*La Chine se réveille, d'un réveil éclatant qui succède à la longue période d'isolement née de la guerre et du stupide antagonisme est-ouest. C'est la première fois que je viens en Chine. Pourtant, je me rends compte des profonds changements qui sont intervenus depuis peu. Partout, de grands bâtiments neufs à la belle architecture, des chaussées et autoroutes nouvelles ou en construction, des vieux quartiers en destruction.*

L'ouverture sur le monde et au secteur privé est une véritable révolution. Les Chinois, si longtemps repliés sur eux-mêmes, veulent tout savoir de l'occident et posent une foule de questions. Ils font venir de nombreux experts pour se mettre au courant. Dans l'avion Paris-Pékin, nous sommes trois experts français de l'association ECTI (Professionnels Seniors Bénévoles). L'un qui s'occupe d'organisation du tourisme, l'autre des systèmes de filtrage dans l'industrie et moi, en tant que topographe. Dans la petite ville de Xian Yang (400 000 habitants !), je rencontre à l'hôtel un Autrichien expert en gestion, un vétérinaire allemand et une Américaine d'origine chinoise experte en management de logiciels !

## Histoire d'une expertise

La Chine a remarquablement organisé des structures pour faire appel aux experts étrangers et les accueillir. Ce sont les "Associations for International Exchange of Personnel" (AIEP) antennes locales de la "China Association for International Exchange of Personnel" (CAIEP), elle-même organe exécutif de l'association gouvernementale SAFEA (State Administration of Foreign Experts Affairs)

Le district de Qin dù (Province de Shaanxi), dont Xian Yang est le chef-lieu, demandait un expert en GPS avec application aux Systèmes d'information géographique (SIG). Ce fut pour moi l'occasion de remettre le pied à l'étrier. Si j'estimais avoir de bonnes

connaissances en GPS, ce n'était pas le cas pour les SIG. Pendant trois mois, je travaillais consciencieusement sur les logiciels Géoconcept et Mapinfo. J'en profitais aussi pour m'entraîner sur Autocad. Bien m'en prit ! Mon intervention devait se faire en juin. Du fait de la pneumonie atypique elle fut reportée "à plus tard". En juillet, on m'avertit de mon départ pour le 18 août.

L'accueil à Xian Yang est très sympathique et amical. Il y a là les représentants du "Foreign Intelligence Exchanging Office" et du service topographique du District de Qin dù ainsi que Mlle Chi Zheng, charmante interprète de français mise à ma disposition. On me conduit au meilleur hôtel de la ville, le Caihong Hotel (Hôtel de l'Arc-en-Ciel), un très bon trois étoiles, où un excellent repas d'accueil a été organisé à mon attention.

## Les difficultés de l'interprétariat

Si en France on demandait au profane d'une technique de servir d'interprète entre deux spécialistes, cela risquerait de poser de gros problèmes. C'est la difficulté de l'interprétariat !

On m'a attribué une charmante interprète ayant moins de quatre ans d'apprentissage de notre langue et il me faut des trésors de patience, d'ingéniosité et de pédagogie pour essayer de faire passer le message. Heureusement, elle possède un excellent dictionnaire Larousse français-chinois qui donne la définition des mots en français avant leur traduction chinoise. Cela me permet d'éviter certaines confusions dues aux différents sens que peut avoir un même mot.

## ■ Les pièges de la gestuelle

Si un geste peut avoir la même signification dans deux cultures différentes, un autre peut être interprété d'une toute



Remise d'un cadeau par le président du district de Qin dù lors du repas d'adieu.

autre manière! Comme je l'ai appris plus tard à mes dépens, les Chinois peuvent compter de un à dix en se servant des cinq doigts d'une seule main. Ouvrir le pouce et l'index signifie huit ! Pour indiquer deux, il faut ouvrir l'index et le majeur. De même, ouvrir le pouce seul ne signifie pas un, mais dix ! J'évite de me servir de mes doigts pour ponctuer un chiffre durant mes cours !

## ■ L'intervention demandée et l'intervention réelle

Je pense que les demandeurs ont de multiples problèmes et l'on aborde très vite d'autres sujets que ceux figurant sur la demande officielle. Pour être un bon expert il faut avoir de bonnes connaissances en tout, ce qui devient de plus en plus difficile avec la spécialisation requise par les techniques modernes. Les gens de ma génération, même s'ils s'y sont mis (sur le tard en général), sont rarement des virtuoses de l'informatique !

On a attendu mon arrivée pour faire le choix d'un GPS. Les représentants de deux sociétés ont été convoqués. Au vu de l'emploi et du déroulement du logiciel de calcul, je conseille le South 9 600 de construction chinoise. D'ailleurs, après les essais : détermination de points dont nous connaissions déjà les coordonnées, le South 9 600 se révèle le plus convaincant. Je préfère ne pas parler du prix de ces appareils qui ferait rêver les géomètres européens ! Un seul inconvénient, le contrôleur, le logiciel de calcul et le mode d'emploi sont écrits en caractères chinois !

Au cours des démonstrations, je suis surpris de constater que les démonstrateurs chinois n'utilisent pas notre

schéma en étoile pour les observations de points GPS. Ils utilisent systématiquement deux récepteurs fixes placés sur deux points connus, avec un ou deux récepteurs itinérants. Cela assure la précision m'assurent-ils. Lors des calculs, ils refusent de faire un essai avec le schéma en étoile dessiné dans la notice d'emploi de leur propre GPS, même à titre d'essai pour voir la différence. D'ailleurs leur logiciel de calcul permet un schéma avec deux points fixes et donne une figure composée de triangles.

Mes affaires se compliquent quand il faut passer au SIG et à Autocad ! "Apprenez-nous" ! Mais, il faut démarrer à zéro et n'ayant que sept jours et demi de travail au total, c'est un peu juste ! Première difficulté : avoir accès aux documents cartographiques dont dispose le district : une carte 1/10 000 déjà en place sur un logiciel Mapgis, un 1/25 000 surchargé des projets et extensions urbaines en cours et quelques 1/500 correspondant à des acquisitions foncières faites par le district. Pas de mode d'emploi du Mapgis dont je ne peux deviner les possibilités. Problème de taille : la barre d'outils et les boîtes de dialogue sont écrits en caractères chinois ! Heureusement, avant de partir en Chine, j'ai envoyé un e-mail à l'interprète avec un court lexique des mots à chercher en informatique. Par chance, elle a un ordinateur et fait une traduction correcte ! J'étais curieux de voir les claviers des ordinateurs chinois. Surprise, ils sont comme les nôtres, mais en version anglaise ! Dans le logiciel GPS, le vendeur tape les noms des points en caractères latins. A la fin du mot, il y a une conversion automatique en caractères chinois. Dans autocad, il faut faire appel à une fonction identique à "insertion des caractères spéciaux" dans Word. Ce n'est pas pratique, mais ça va vite, l'exception culturelle mérite des complications !

Je fais quelques démonstrations convaincantes avec le Mapinfo de mon portable. Nous en venons à parler du transfert d'Autocad sur Mapinfo et c'est là que je prends conscience du problème. Deux logiciels autocad sont installés sur leurs ordinateurs, mais ce sont des versions bâtarde, sans mode d'emploi et non compatibles avec Mapinfo ! Ils sont vifs en informatique, car ils saisissent et appliquent vite ce

que je dis. Mais sans mode d'emploi ils ont trop de lacunes. D'ailleurs, ils reportent encore leurs plans 1/500 à la main. Nous voyons de nombreuses fonctions essentielles qu'ils ne connaissaient pas et nous étudions les problèmes de compatibilité et de transfert de dossiers. Nous dessinons leur dernier levé sur l'écran de l'ordinateur dans un système de coordonnées UTM.

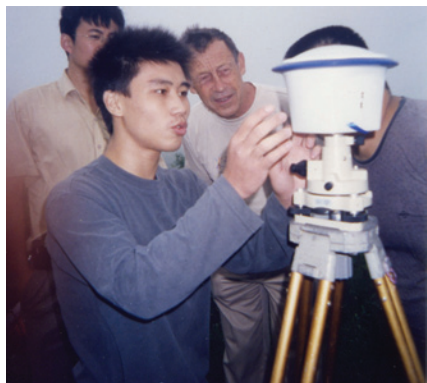
Maintenant, le cheval est lancé, on me pose de nombreuses questions sur la topographie. J'apprends à deux d'entre eux à faire les graphiques d'intersection pour les auscultations. Deux autres m'attaquent sur ma tasse de thé : les levés souterrains, car il y a de nombreuses mines de charbon non loin de là. Satisfaction énorme, ils comprennent très vite.

J'ai d'autres surprises, telle cette découverte surprenante. En consultant un fichier de points en coordonnées UTM, je m'aperçois que les X ont une valeur qui correspond à celle des Y. Quand je demande s'il n'y a pas eu inversion, on me répond qu'en Chine, l'axe des Y correspond à notre axe des X ! Il est dit à l'interprète : "c'est un vrai expert pour s'en être aperçu si vite". Sacrée gymnastique quand il fallut reporter des points sur Autocad....

## En guise de conclusion

Pays de contrastes qui a des fusées performantes et qui est en train de constituer son réseau de satellites GPS, qui a deux constructeurs de GPS, est à la pointe du progrès dans de nombreux domaines et semble très en retard dans d'autres. Cependant, ce retard va se combler. Il y aura quelques dérapages, faux pas ou douloureuses remises en cause prévisibles dans l'évolution à venir, mais attention lorsque la Chine atteindra les sommets, les autres pays vont souffrir.

Je retiens un peuple qui a soif d'ouverture et de savoir et qui m'a reçu d'une manière à la fois somptueuse, gentille et pleine de prévenances. Les adieux à l'aéroport aux cours desquels me furent remis plusieurs cadeaux m'ont beaucoup touché. Je suis heureux de ma modeste contribution et des liens amicaux que j'ai pu nouer. ●



Essai du GPS chinois South 9600, le contrôleur est incorporé au récepteur.

# L'eau doit bien couler...

■ François BODIN Président de GSF

*Il n'y a à priori rien de commun entre la ruche bourdonnante d'une capitale commerciale du Moyen-Orient, un coin de brousse d'Afrique Noire, un village du centre de Madagascar ou une zone semi-désertique d'Afrique du Nord ...*

*Et pourtant les bénévoles de G.S.F. ou d'ESGT-International y viennent majoritairement pour aider à régler un problème d'eau.*

**I**ci trop abondante et là trop rare, ailleurs trop souillée, stagnante ou réservoir à moustique, l'eau constitue bien le défi principal de nombre de pays de la ceinture tropicale.

L'exemple de Songhaï au Bénin montre pourtant qu'au travers du cycle de l'eau maîtrisé en y ajoutant une pincée de réflexion, une dose de techniques simples ayant fait leurs preuves en Europe, épicé de l'enthousiasme des acteurs locaux et expatriés, il n'y a pas besoin de fortunes financières pour aboutir à un résultat significatif.

Travailler ensemble sur un projet n'est pas toujours facile, le dialogue s'appuyant sur nos différences de culture pouvant être long à équilibrer ; c'est également pour nous, bénévoles de G.S.F. ou d'ESGT-International, la découverte de la richesse d'un séjour de travail immergé dans le pays d'accueil, la

constatation qu'au delà des problèmes d'eau et de nivellement qui en conditionnent l'écoulement ou la retenue, restent des visages plus souvent souriants que graves, reflets de qualités de cœur que la vie citadine occidentale cache trop souvent.

Le poète, en Occident, trouve sa raison de vivre en regardant autour de lui "tous ces gens à rendre heureux"... A côté du grillot ou du conteur africain, le topographe européen arrive, en partageant sa seule petite technique, à semer également quelques graines de bonheur.

Vous qui lisez ces lignes, sachez que nous recherchons pour le premier semestre 2004 quelques volontaires pour assurer à Cotonou des cours techniques (SIG, topo appliquée à l'hydraulique, etc...), soit par la participation de professionnels soit par le biais de travaux de fin d'études pour des étudiants des écoles d'ingénieurs françaises... N'hésitez pas à devenir des semeurs de bonheur ! ●



# André Maigne :

■ Jean-Pierre MAILLARD

*La construction du viaduc de Millau place l'autoroute A75 sous les feux de l'actualité. Cet ouvrage d'art complètera la collection des ponts du Massif central qui s'enorgueillit notamment de celui de Garabit sur la Truyère, une aire de service de l'A75 permettant d'ailleurs de l'admirer à loisir.*

**L**a grande arche de fer de ce dernier contribue grandement aux gloires de Gustave Eiffel comme à celle de la Haute-Auvergne et à sa capitale : Saint-Flour.

## Le Chemin d'art à Saint-Flour

Cité médiévale perchée sur une table basaltique Saint-Flour est une sous-préfecture du Cantal dont l'activité est centrée sur l'agriculture de montagne et le tourisme.

Depuis dix ans, la cité des vents se distingue également par un festival d'art contemporain "Chemin d'art" qui a été

créé en 1994 sur l'initiative d'André Maigne. La manifestation propose gracieusement au regard des visiteurs, tout au long de l'été, la découverte d'œuvres d'artistes disposées au cœur de la ville historique.

Les œuvres sont présentées aussi bien à l'intérieur des bâtiments publics qu'à l'extérieur, les plasticiens étant invités à tenir compte du lieu dans leur réalisation. Le Chemin d'art invite donc à une flânerie à travers la ville qui joue le rôle d'écrit. A défaut d'appel à un conférencier, le public est guidé par un dépliant présentant un itinéraire de visite et, au sol, par un fléchage au pochoir.

Par ce jeu de piste, les organisateurs démontrent que l'art contemporain peut parfaitement s'intégrer à l'architecture ancienne valorisant du même coup la création artistique d'aujourd'hui et les richesses culturelles du passé. Depuis l'origine, plus de soixante artistes français et étrangers ont déjà exposé et certaines de leurs pièces sont restées in situ, prémices d'une collection permanente significative.

Mise en service à l'occasion du Chemin d'art 2003 la fontaine des Agials s'inscrit dans cette perspective.

## La fontaine des Agials

Mieux que personne, André Maigne peut présenter sa réalisation de pierre, de laiton et d'eau effectuée en collaboration avec l'architecte Daniel Kahane. "Cette fontaine est un hommage à la pierre de Saint-Flour ou plutôt aux deux



André Maigne

# La fontaine des Agials

*pierres locales. La ville de Saint-Flour se trouve en effet à la limite de régions géologiquement différentes, l'une primaire avec le granite, l'autre tertiaire avec le balsate. Le revêtement de la fontaine est réalisé en balsate sablé. La boule intérieure est en granite blanc.*

*La boule de pierre est présentée au centre du bassin, reposant délicatement sur l'eau, comme en apesanteur. Elle est taillée dans un matériel lourd, mais semble effleurer la surface de l'eau sans s'enfoncer d'un centimètre. Le système de support est invisible malgré une eau limpide et peu profonde.*

*Elle est auréolée de jets de diverses formes : des jets puissants qui forment une sorte de voûte et tout près d'elle, un voile d'eau en forme de cloche qui la recouvre sans la toucher. Bien que complètement entourée d'eau, elle est en principe complètement protégée et sèche.*

*Le programme se renouvelle toutes les dix minutes, ce qui donne à la fontaine un aspect toujours renouvelé. D'abord, les jets et la cloche d'eau apparaissent séparément puis ensemble. Enfin les jets s'arrêtent et la boule de granite apparaît seule en lévitation."*

La géométrie a servi André Maigne de bout en bout : la quasi carré du bassin, la sphère dont la rondeur renvoie à l'image de l'univers, la parabole des jets, la forme parapluie du voile d'eau, alentour les huit sièges presque cubiques posés en quinconce invitant à la pause. De même le dessin du support de la boule a été calculé de façon à ce qu'elle n'apparaisse pas au regard. La partie immergée est ainsi cachée par la confusion du reflet du volume de pierre avec, après réfraction, l'image du support. Cette impression est renforcée par l'eau du bassin au repos qui, par un effet de miroir, dédouble l'ensemble par symétrie. Les mensurations soulignent l'échelle humaine de la réalisation : l'emprise de l'ouvrage a une surface exactement égale à 10 m<sup>2</sup>, la sphère un

diamètre de 80 cm et les jets s'élèvent jusqu'à 2,50 m

Le blanc-gris du granite de la boule s'oppose au gris-brun du basalte. La pierre de Bouzentès fière de son origine volcanique est perçue sous deux nuances selon qu'elle est sèche ou mouillée, un moyen supplémentaire de montrer le caractère changeant du travail d'André Maigne. Le blanc de l'eau donne une touche lumineuse à l'ensemble qui s'intègre dans la palette des couleurs sanfloraines. Pour sa part le voile conforte l'impression d'une boule hors de l'attraction terrestre dont les deux tonnes ne demandent qu'à s'envoler. N'est-ce pas non plus une façon inconsciente de souligner l'origine du mot "agial" qui vient d'une déformation du mot "jal", coq en occitan local ?

Implantée sur une placette, la fontaine est encadrée par une entrée de parking et un escalier. C'est peu dire que l'intervention plastique valorise l'endroit confirmant, s'il en était besoin l'intérêt de l'art dans la ville.

Dans le n° 96 d' XYZ, Art et Géométrie présentait la fontaine d'Agam à la Défense. Avec celle des Agials voilà deux fontaines qui se suivent et ne se ressemblent pas. Elles ont cependant en commun de magnifier la présence de l'eau dans la ville et de constituer des îlots de fraîcheur pendant la canicule. Cette dernière explique sans aucun doute l'intérêt particulier porté ce dernier été aux fontaines qu'elles soient travaux d'artistes ou non !

## André Maigne

André Maigne est tout à la fois un ancien professeur de dessin et d'arts plastiques, un organisateur d'expositions et un artiste lui-même. Né en 1931 à Allanche dans le Cantal il réside à Saint-Flour où il se manifeste aussi par son action culturelle, citoyen actif au service de sa ville puisque le créateur du



André Maigne

"Chemin d'art" n'a jamais cessé d'en être l'animateur.

Il fait partie d'un groupe d'artistes internationaux dénommé AiNIN (Artists in Nature International Network) qui travaille dans le même sens que lui.

Sa démarche avant tout conceptuelle s'exprime plus par des installations que par des sculptures figées. Ses réalisations se veulent ludiques puisqu'il invite le spectateur au déplacement et qu'il joue avec la lumière. Souvent éphémères, on a pu les trouver et on les trouve non seulement à Saint-Flour et en Auvergne, mais au-delà des frontières régionales à Brest, à Nîmes, au Pré Saint Gervais, à Pontivy et jusqu'en Australie.

Au travers du Chemin d'art l'esthète Georges Pompidou aurait certainement apprécié la promotion de l'art contemporain dans la ville dont il a été député avant d'être Premier ministre puis président de la République.

Nul doute qu'il se réjouirait également de voir le monument de la place du foirail signé Etienne Hajdu, érigé en 1976 en son honneur désormais devenu, lui aussi, un repère sur le circuit du Chemin d'art ! ●