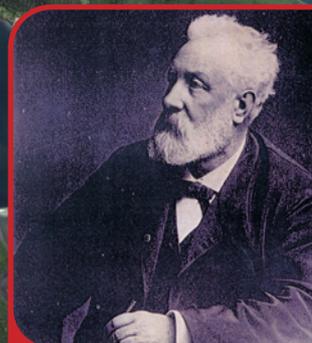


AVZ

Éditée par l'
Association
Française de
Topographie
n° 104

Le cadastre brésilien perspectives d'évolution

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



**Jules Verne
et la géodésie**

Directeur des publications

André Bailly
Ingénieur Géomètre ETP

Directeur adjoint des publications

Emmanuel Natchitz
Enseignant-Chercheur ESTP

Rédaction et administration XYZ

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

Rédacteur en chef

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

Comité de Rédaction

Pierre Grussenmeyer
Professeur des universités
INSA de Strasbourg

Tania Landes
Maître de Conférences
INSA de Strasbourg

Stéphane Durand
Enseignant-Chercheur
ESGT Le Mans

Responsable du site internet

Tania Landes

Publicité

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

Conception et maquette

Dorothée Picard

Abonnements: Evelyne Mesnis

Autre publication: L'annuaire de l'AFT

IMPRIMERIE MODERNE USHA

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

Dépôt légal

3^e trimestre 2005 ISSN 0290-9057
N° CPPAP: 0106 G 80866

Tirage de ce numéro: 1600 ex

Abonnement annuel

France CEE: 73 €
Etranger (avion, frais compris): 76 €
Les règlements payés par chèques
payables sur une banque située hors de
France doivent être majorés de 10 €
Le numéro: 20 €
Le bulletin d'adhésion est en p. 83
Membre du SPCS Syndicat de la Presse
Culturelle et Scientifique

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

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

Membre de la FIG (Fédération Internationale des Géomètres)

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

Courriel: info@aftopo.org • Site Internet: <http://www.aftopo.org>

■ Editorial 5**■ Info-Topo**

> Les informations de la profession 7

■ Manifestation

> 1^{er} Forum de Topographie
le 17 mars 2005 - La table ronde,
animée par M. Kasser 18

> 3D ARCH 2005 Mestre-Venise, 22-24 août
Matthieu DEVEAU - Lionel PÉNARD 20

■ SIG

> Les produits géographiques du futur
dans la vie des citoyens
Laurent POLIDORI 22

■ Photogrammétrie

> Photogrammétrie et archéologie sous-marine
profonde - Le cas de l'épave étrusque Grand
Ribaud F (2^e partie)
Pierre DRAP - Luc LONG 25

■ Cadastre

> Le Cadastre brésilien Perspectives d'évolution
2005 l'année du Brésil en France
Camille BOURGUIGNON
Alzir Felipe B. ANTUNES
Andrea F. TENÓRIO CARNEIRO 35

■ Nouvelles Technologies

> Naviguer dans le monde sans fil
Nathan PUGH - Carl THOMPSON
Daniel WALLACE 41

■ Métrologie

> Le métrologue et le topomètre
Alain MARTIN-RABAUD 45

■ Photogrammétrie

> Problèmes relatifs aux ombres d'objets
élevés sur les photographies aériennes
Raymond D'HOLLANDER 51

■ Histoire

> Jules Verne et la géodésie
Suzanne DÉBARBAT 55

> Des Longitudes et des Mers :
Science et Progrès (3/3)
Frédéric BRETAR 61

■ Carnet de voyage

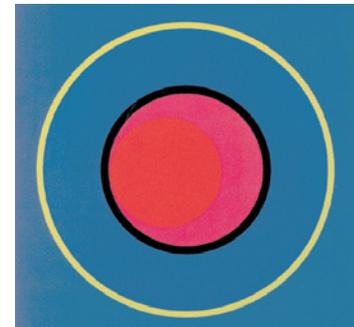
> Merci les perses, adieu l'Iran...
Souvenirs d'une "brillante" et brûlante mission
Robert CHEVALIER 69

■ Topo vécue

> Voyage technique en Grèce des élèves
ingénieurs Topo de l'INSA de Strasbourg
Gilbert FERHAT 73

■ GSF

> Ny voky tsy mahaleo ny tsaroana
François BODIN 77

■ Art et Géométrie

> Geneviève Claisse : Le cercle de la galerie
Jean-Pierre MAILLARD 78

■ Livres 81

Pour la recherche de nos annonceurs
consulter la page 81.

La Terre entière vue du ciel

Depuis quelques mois, les usagers d'Internet amoureux de géographie ont vu la mise en ligne de sites tout à fait remarquables, parmi lesquels : Google Maps (www.maps.google.com), Google Earth, World Wind de la NASA, et peut-être d'autres encore. Vous partez d'une image de la Terre entière, vous choisissez une région, vous choisissez le type d'image à afficher, et si vous avez choisi de l'imagerie spatiale, vous pouvez zoomer entièrement à votre guise, et de manière extraordinaire. Dans quelques sites on atteint un pixel inférieur au mètre et le reste du temps, on atteint tout de même la dizaine de mètres. Seule ombre au tableau, on peut parfois choisir aussi une carte comme résultat, et jusqu'ici je n'ai rien trouvé de bien satisfaisant, au moins sur l'Europe : il s'agit probablement d'une étape à venir, pas forcément très facile puisque pour chaque producteur de carte il existe un copyright différent à gérer. Et puis on tombe de temps en temps sur des projections dont le moins qu'on puisse dire est qu'elles ne sont pas très évoluées, avec des degrés de longitude égaux à ceux en latitude, que seuls les béotiens des SIG nous infligent encore de temps en temps : les techniques géographiques élémentaires ne sont donc pas toujours au rendez-vous.

Mais pour revenir à l'imagerie spatiale, quelles extraordinaires excursions ne pouvons nous pas faire maintenant depuis notre ordinateur, sans bouger de chez nous ! Traverser l'Afrique, du Maroc à Djibouti ou d'Alexandrie au Cap, explorer les zones désertiques, regarder l'Antarctique, faire quelques milliers de km en un rien de temps : c'est encore mieux que si nous regardions le sol depuis la station spatiale, hormis le manque fraîcheur des données, car il n'y a aucun nuage sur les images qui ont été retenues, et on peut s'attarder à volonté sur un site. Et pour le géologue, c'est aussi une véritable bénédiction : on en voit enfin autant de la Terre que de Mars ou de Vénus, il était temps !

Ne boudons pas notre plaisir de regarder notre planète dans ses moindres détails, et ayons une pensée émue pour les modèles économiques adoptés depuis longtemps par le gouvernement des États-Unis pour leurs administrations, qui permettent de mettre sur la place publique de pareils trésors...

Michel Kasser

Les produits géographiques du futur dans la vie des citoyens

■ Laurent POLIDORI

Les métiers sont comme les espèces vivantes : certains naissent, d'autres s'éteignent. Déjà bien vivant au temps des pharaons, le métier de géomètre existera tant que des sociétés se partageront 150 millions de kilomètres carrés de terres émergées, partage sans cesse remis en cause. Depuis des millénaires, le métier de géomètre a donc toujours été, si j'ose dire, un métier d'avenir. A ce titre, il n'est pas inutile de se demander en quoi les techniques géographiques du futur, pour peu que l'on soit capable de les entrevoir aujourd'hui, vont affecter la vie de chacun d'entre nous. Je limiterai mon propos au cas du citoyen, personnage en vogue à l'époque où Delambre et Méchain mesuraient la méridienne, personnage générique mais excluant délibérément les acteurs professionnels - industriels, scientifiques, politiques etc.

Observons tout d'abord que les produits géographiques font leur apparition à tout moment dans la vie du citoyen. Les transports, la météo, le tourisme sont consommateurs d'information géographique, et l'accès facilité à cette information, combiné à la possibilité de se localiser,

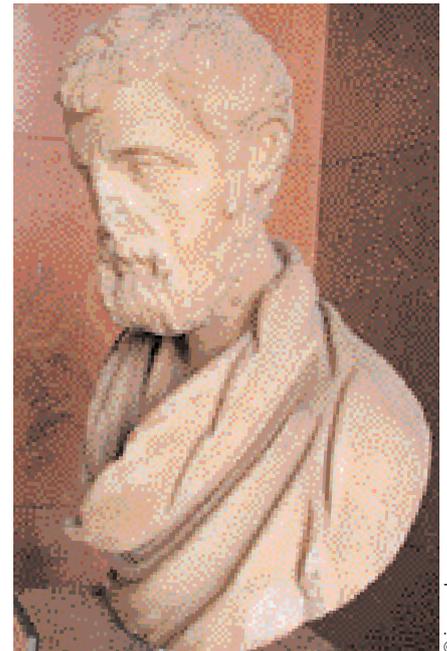
libérera le citoyen-explorateur d'un nombre croissant de contraintes. Et en cas de catastrophe naturelle, on peut attendre de ces nouvelles techniques qu'elles guident les secours et facilitent la mise à jour et la diffusion d'un état des lieux en temps réel, notamment lorsque les moyens de transport et de communication auront été coupés par une inondation, un séisme ou un incendie.

La Terre n'a plus de secret pour le citoyen

La photographie aérienne n'est pas seulement un instrument de mesure. Elle offre un formidable moyen de communication entre les citoyens à propos de leur environnement, voire une pièce à conviction qui pourra s'avérer salutaire face à des soucis d'ordre foncier ou immobilier.

Précisons que n'importe quel écolier peut lire une photographie aérienne, alors que la capacité de surmonter l'abstraction d'une carte semble être l'apanage des premiers de classe. D'ailleurs, l'usage croissant de ces images dans l'enseignement de disciplines comme la physique, la géographie et les sciences de la nature, tend à favoriser l'interdisciplinarité en ébranlant les cloisons, généralement très hermétiques, entre ces enseignements.

La réalité virtuelle, grande consommatrice de photogrammétrie, trouve des applications dans les jeux vidéo mais aussi dans l'éducation et la culture, en offrant au citoyen sédentaire des promenades virtuelles insolites : un temple, une grotte, un squelette ou le système solaire dévoileront ainsi leurs formes.



Hérodote : citoyen athénien et géographe

Citons encore le domaine de la santé. L'imagerie médicale et la photogrammétrie font désormais partie de l'outillage du chirurgien et offrent au citoyen malade des diagnostics plus sûrs. Une localisation précise peut faciliter des interventions sanitaires dans des sites isolés, et l'épidémiologie, qui propose une approche géographique de la santé, fait un usage croissant de la cartographie et de l'observation de la Terre.

Des blocages d'ordre sociologique

Cependant, un certain nombre de blocages, de nature sociologique plutôt que technique, limitent encore l'appropriation de ces techniques par la société civile.

Le libre accès de tous à la carte, indissociable du sentiment géographique, semble être un privilège réservé aux démocraties. Il n'est pas surprenant que la géographie ait été fondée par des citoyens athéniens. La carte est secrète à l'époque des grandes découvertes. En France, la première grande couverture cartographique survient au Siècle des Lumières.

Pourtant, si l'on est progressivement passé de cartes grossières et confidentielles à des cartes précises en vente libre, si la carte à plat est aujourd'hui relayée par des images numériques en couleur, ces produits tendent à prendre la forme de gigantesques bases de données mieux adaptées au besoin de services techniques centraux qu'au plaisir du randonneur.

L'accès à l'information, favorisé par l'augmentation des débits de transmission, doit resté mesuré. D'une part, l'expérience montre qu'en réclamant de la bande passante pour des régions isolées, on commence par les inonder de modèles culturels venus d'ailleurs, comme au temps des grandes missions d'évangélisation.

D'autre part, la surinformation peut être un facteur d'indécision. Ainsi, les mesures de déformation obtenues par télémétrie laser, GPS ou interférométrie radar sur des sites géologique-ment instables, sont présentées un peu vite comme pouvant prévenir risque, et le décideur, aux prises avec une responsabilité de plus en plus lourde et avec une perception accrue du risque par la société, semble ne plus avoir aucune excuse pour sa difficulté à prendre une décision, tant il est abondamment informé.

Par ailleurs, la complexité de ces nouveaux produits les rend peu accessibles à l'entendement des citoyens et détourne pour l'instant l'attention des utilisateurs qualifiés vers des préoccupations purement technologiques.

Ainsi, les projets d'aménagement ayant recours aux systèmes d'information géographique consacrent beaucoup plus d'effort à la résolution de problèmes informatiques dans l'intimité des services techniques, qu'au raisonnement géographique et au dialogue avec les citoyens.

Les grands programmes de sur-

veillance de l'environnement, inspirés par des traités internationaux et faisant un usage abondant et globalisé des satellites de géodésie et d'observation de la Terre, voient les hommes aux prises avec les éléments naturels : sécheresse, volcans, tsunamis etc., mais la misère, plus difficile à modéliser car mettant les hommes aux prises avec eux-mêmes, semble susciter moins d'intérêt.

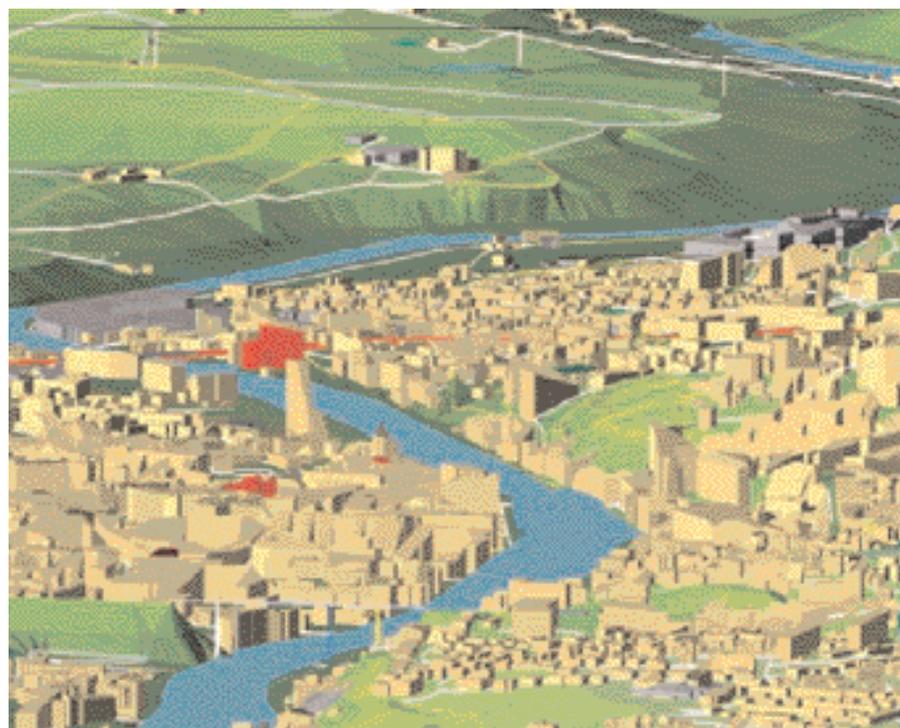
Ainsi, une information géographique accessible mais non pléthorique, le maintien d'une offre "grand public" aux côtés d'une offre "grands clients", une déontologie raffermie chez les fournisseurs de mesures, une prise en compte plus large des problèmes sociaux dans la surveillance de l'environnement, pourraient conduire, dans le futur, à un usage meilleur des produits géographiques par les citoyens.

Conclusion

En guise de conclusion, je rappellerai l'un des plus célèbres mythes de l'antiquité. Dans ses Métamorphoses, Ovide raconte l'histoire de Pygmalion, un sculpteur qui tailla dans la pierre le corps d'une femme et tomba éperdument amoureux de son œuvre, absurde situation dont Aphrodite le libéra en donnant la vie à la statue. Le sculpteur put alors poser ses outils et se délecter du fruit de son travail. Puisse le mythe de Pygmalion survivre en chacun de nous : après avoir mesuré notre planète, n'oublions pas de nous en délecter ! ●

contact

Laurent POLIDORI
directeur de recherche à l'IRD
(polidori@cayenne.ird.fr)
Vice-président de la SFPT



Une représentation du monde à l'échelle du citoyen : exemple de la BD Topo® de l'IGN (extrait sur Laval).

Photogrammétrie et archéologie sous-marine profonde

Le cas de l'épave étrusque Grand Ribaud F

■ Pierre DRAP - Luc LONG

Après avoir examiné les problèmes et les besoins des archéologues sous-marins qui ont entrepris l'étude de l'épave étrusque Grand Ribaud F, en 2000, 2001 et 2002, située au large de Giens (Var, France) par 61 m de fond, nous allons vérifier, dans cette deuxième partie, comment la photogrammétrie peut générer des représentations 3D suffisamment précises pour servir désormais de base à l'étude rigoureuse du site.

PHOTOGRAMMÉTRIE

Adaptation au milieu sous-marin

■ Prises de vues

Si l'utilisation d'engins automatisés est relativement rare en archéologie sous-marine, le mécénat prodigué sur l'épave étrusque par la Comex, inventeur du site, n'était possible que sur une période relativement courte. Ainsi, après le départ du Minibex, les archéologues ont troqué les écrans de contrôle d'un poste de commandement confortable, contre la vision

embuée du masque de plongée et les aléas de "l'ivresse des profondeurs". De fait, les immersions à partir de L'Archéonaute, à 61 m, le fond au niveau du bois, se limitaient à moins de 15 minutes par jour et par personne. En outre, comprimée sous le sable et le chargement, une vase volatile obscurcissait la vision au moindre mouvement. Du coup, un simple ramassage d'objets laissait les plongeurs dans le noir absolu et un battement de palme pouvait être fatal aux prises de vues. De même, dévaser le site revenait à travailler en aveugle sans pouvoir attendre l'éclaircie.

Dans de telles conditions, sises à l'extrême limite de la plongée professionnelle à l'air, établir un plan topographique précis du site selon les méthodes conventionnelles s'avérait d'emblée comme une tâche très difficile, voire impossible à réaliser.

Nous avons donc opté pour une méthode photogrammétrique numérique légère en utilisant, pour la campagne d'août 2000, un appareil photographique numérique non métrique, Nikon D1, embarqué dans un caisson étanche fixé sur la barre technique du sous-marin *Rémora 2000* (Comex). Les éclairages halogènes étaient également fixés sur la barre technique. Lors de la campagne d'octobre 2001 les prises de

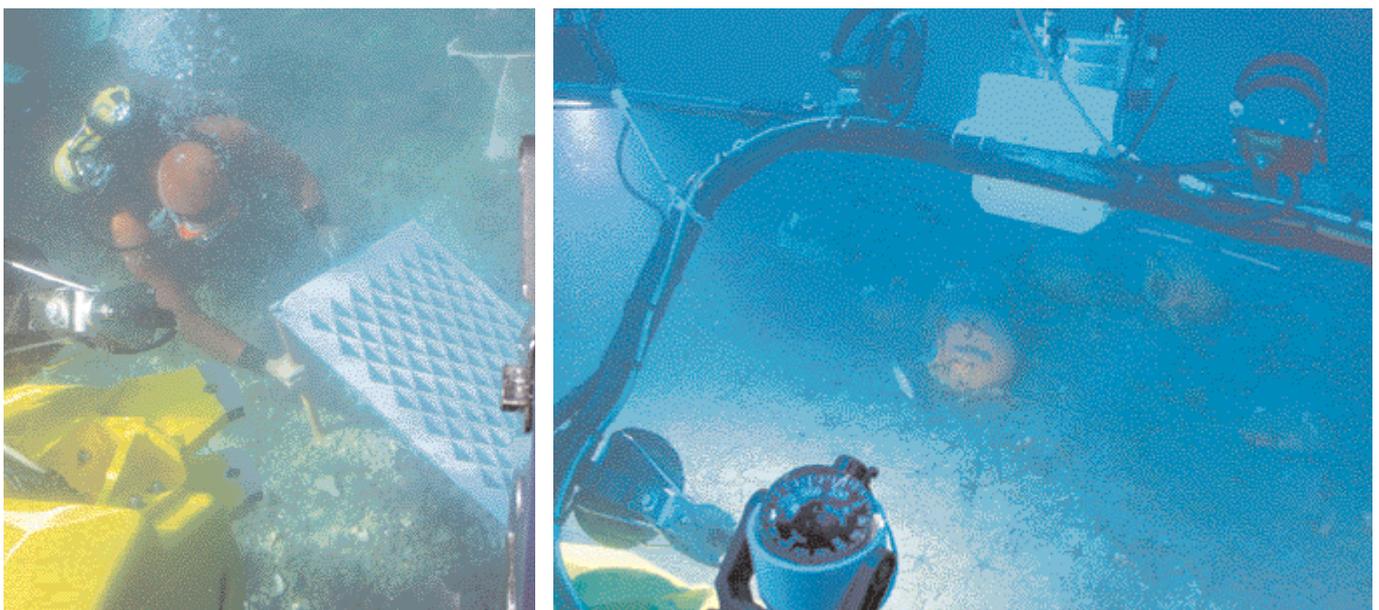


Figure 1. Vue de l'intérieur du sous-marin. Vue de gauche, un plongeur positionne la mire de calibration, vue de droite, l'appareil de prise de vue est situé à l'extérieur, sur la barre technique, dans le caisson étanche blanc. L'axe optique est vertical.

■ ■ ■ vues furent effectuées par un plongeur à l'aide d'un Nikon Coolpix, protégé dans un caisson Ikelite équipé de deux flashes.

■ Calibration

La calibration des cameras dans un contexte multimédia, c'est-à-dire quand les rayons lumineux traversent plusieurs milieux caractérisés par des indices de réfraction différents, est un problème clairement identifié depuis plus de 50 ans ([ASP, 1980] page 838). Nous renvoyons le lecteur aux travaux de Hans-Gerd Mass pour un bon aperçu de l'état de la question en ce domaine [Maas, 2000]. Le problème n'est pas trivial, le faisceau lumineux passant au travers des différents dioptries (eau - verre - air) subit une réfraction en fonction de l'angle d'incidence.

Quelques solutions, plus ou moins complexes ont été mises au point, généralement interactives pour les plus rigoureuses, [Kwon, Lindley, 2000.] [Maas, 2000]. Même si Hans-Gerd Mass propose une solution simplifiée c'est toujours dans le cas le plus "simple" de la photogrammétrie multi-

média : seulement trois média, l'objet à mesurer dans le liquide et une lame à face parallèle entre l'objet et le capteur situé lui dans l'air. Y.-H. Kwon donne, dans le cas particulier d'un ensemble de points de contrôle, une représentation de cette distorsion "pin-cushion distortion", visible sur la figure ci-à gauche [Kwon, 1998].

Dans le cadre de ce projet, un des facteurs incontournables est de donner aux archéologues un outil de photogrammétrie qu'ils

pourront utiliser eux-mêmes avec une intervention réduite des photogrammètres. L'idée est d'utiliser un logiciel du commerce, grand public et sérieux, d'un coût modeste.

Notre choix s'est porté sur Photomodeler, principalement à cause de son module de calibration particulièrement convivial. Les "distorsions" induites par l'aspect multimédia seront assimilées à des distorsions radiales, bien modélisées par le logiciel. Nous considérons l'ensemble caisson + appareil comme indéformable et la calibration est conduite comme si nous étions dans l'air. On peut voir sur la figure 1 la grille de calibration de Photomodeler V4, mise en place par un plongeur, sous l'appareil de prise de vue, solidaire du sous-marin.

■ Orientations

Comme nous l'avons déjà signalé, la prise de vue, en 2000, a été faite par un survol à basse altitude depuis le sous-marin *Rémora 2000* (Comex), puis plus simplement à l'aide d'un plongeur en 2001 et 2002. Les conditions difficiles de prise de vue et d'équipement du site nous ont conduits à minimiser les contraintes. Un ensemble de règles graduées, à partir de cylindres de PVC, maintenues entre elles par un câble fut déposé selon l'axe longitudinal de l'épave. Quelques flotteurs furent disposés de manière irrégulière pour indiquer la verticale. Les cibles supportées par ces flotteurs ont été mesurées et la verticale a pu être ainsi obtenue par moyenne. Les contraintes photographiques imposées au plongeur chargé des prises de vues restaient minimales : bandes plus ou moins parallèles, "bon" recouvrement. On ne pouvait guère être exigeant avec un opérateur, non photogrammètre, intervenant durant 10 minutes à 60 ou 61 m de fond, quelquefois sous l'emprise de la narcose à l'azote. La surabondance des photos constituait alors une relative sécurité lors de cette phase photographique.

Le site étudié s'étend approximativement sur une zone de 20 x 10 m qui a été couverte grâce à une soixantaine de photos lors de la campagne 2000 (sous-marin *Rémora 2000*, Nikon D1 et optique de 14 mm). En revanche, avec un plon-

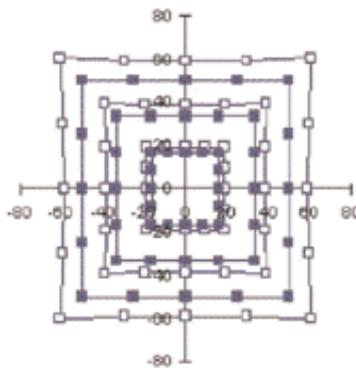


Figure 2. Coordonnées des points réfractés et non réfractés répartis sur trois cadres. [Kwon, 1998].

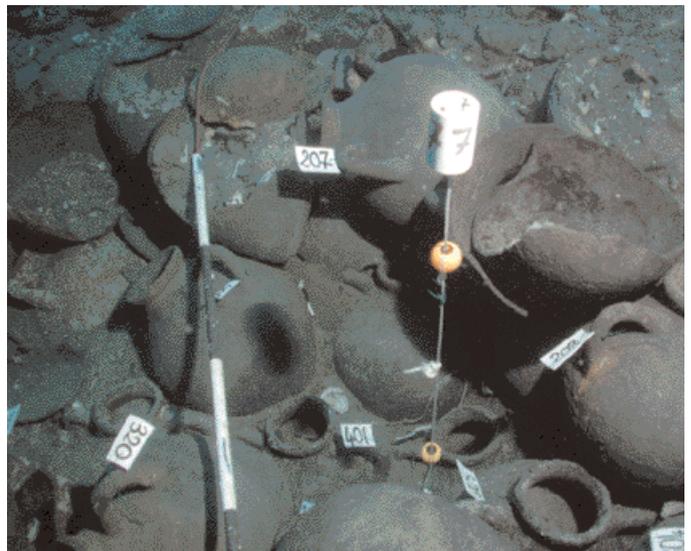
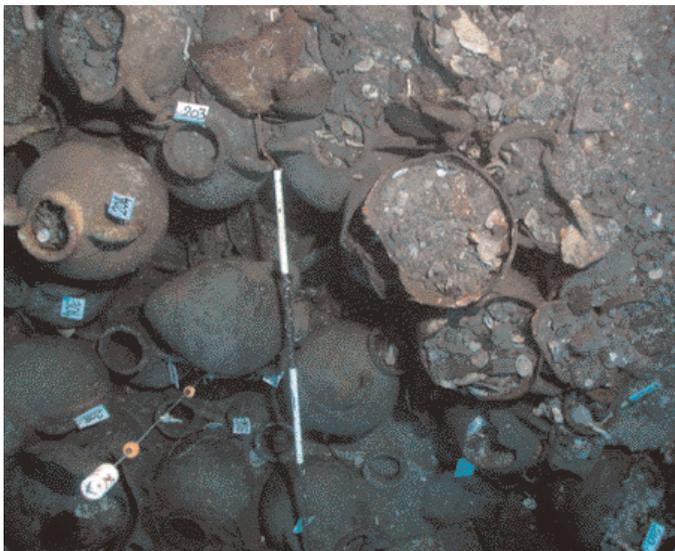


Figure 3. Prise de vues du site, 2001, on voit les flotteurs destinés à fournir une indication sur la verticale et les règles de mise à l'échelle.

Photos : © F. Bassemayoussé

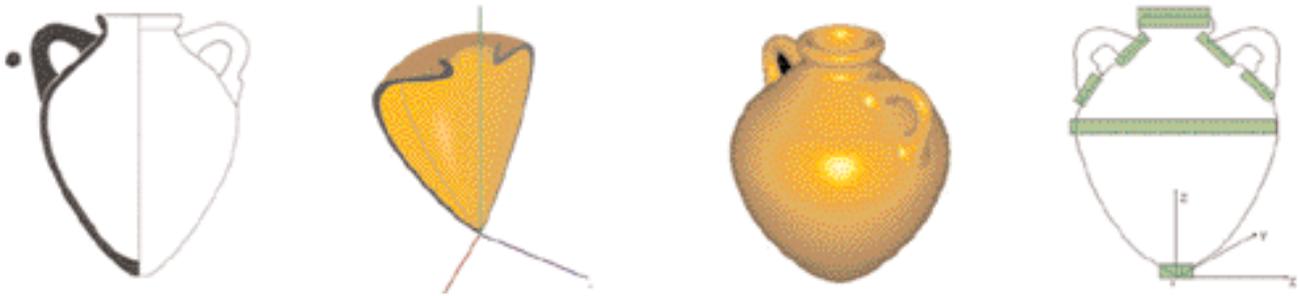


Figure 4. De gauche à droite : le modèle graphique élaboré par les archéologues, puis représentation numérique de ce modèle, enfin cinq zones d'une amphore sur lesquelles le relevé est effectué pour obtenir des faits de mesure.

geur équipé d'un simple *Coolpix*, le même nombre de photos fut nécessaire en 2001 pour couvrir seulement le sondage.

La fouille archéologique demeurant par nature une opération destructrice, à l'issue de la numérotation et les prises de vue, d'autres équipes de plongeurs se livrèrent au dévasage puis au démontage et à la récupération des amphores de la cargaison. Au préalable, un ensemble de corps morts, constitué de blocs de béton ou de métal, avait été déposé autour du site pour rattacher les différents types de relevés à un même système de référence. Les résidus d'adaptation sont à l'intérieur du centimètre.

Le relevé des amphores

■ Les différentes sources

Dans ce contexte, la mesure et la gestion des amphores de l'épave sont basées sur trois sources de données fortement incomplètes. La première représente le modèle théorique de l'amphore. Elle contient les normes géométriques nécessaires à la représentation graphique des récipients, les valeurs par défaut décrivant des dimensions caractéristiques de ces objets. Ces données évoluent lors de l'ajout d'un nouvel individu dans la base. La deuxième source est alimentée par le relevé photogrammétrique des objets basé sur les photographies prises lors des fouilles. L'information de la troisième source provient des mesures effectuées en laboratoire sur ces mêmes amphores, une fois qu'elles ont été récupérées. Dans ce travail, nous ne mentionnerons pas cette troisième source d'information. [Drap, Seinturier, Long. 2003]

La première source : le modèle théorique

Cette source s'implique dans l'expression graphique liée à la connaissance experte des archéologues (S1). Elle découle d'un modèle généré par l'observation des amphores. Les classes réunissent des informations de diverses natures sur les objets étudiés : la description géométrique de leur morphologie sous la forme d'un ensemble d'attributs géométriques, la description des faits possibles (observations et mesures possibles sur les objets) et la description des règles de calcul nécessaires pour évaluer les attributs géométriques en recourant aux observations effectuées.

La diversité des objets manipulés par l'archéologue et la complexité géométrique de leurs surfaces nous ont conduits à rechercher leurs caractéristiques morphologiques stables afin

d'y effectuer les mesures nécessaires à l'étude. Ces caractéristiques géométriques sont également décrites dans le modèle. Une série de primitives géométriques simples est utilisée pour approximer ces caractéristiques morphologiques. Elle est employée comme interface entre la mesure photogrammétrique et le modèle théorique. La description géométrique de la classe comporte une liste des attributs, la définition de la position et de l'orientation (translation, matrice de rotation) et la définition des caractéristiques géométriques : taille, diamètre du col, diamètre de la panse, etc. Pour chaque attribut représentant les caractéristiques géométriques de l'objet la valeur de l'attribut de classe est la valeur moyenne des attributs de l'individu déjà observés de cette classe.

La description des faits indique l'existence ou l'absence d'information observée, par exemple l'existence de points mesurés sur le col ou sur le fond. Les faits peuvent également représenter la présence d'information déduite, comme l'existence d'un cercle calculé sur les points mesurés sur le col. Les règles de calcul sont élaborées par le photogrammètre. Celles-ci permettent de calculer les attributs géométriques des objets en utilisant les faits et les valeurs par défauts des attributs, par exemple, Règle N :

S'il y a des points mesurés sur le fond de l'amphore et que le calcul du cercle du col a convergé, alors l'axe OZ de l'amphore sera déterminé par le bipoint (barycentre des points du fond, centre du cercle des points du col).

Ces règles de calcul sont employées par le système expert qui est, dans ce projet, le mécanisme de la déduction. Il convient de noter que les informations issues de cette première source de données sont sujettes à évolution. Chaque nouvelle amphore modifie les valeurs des attributs de cette source. En outre les règles des calculs, qui représentent la connaissance experte du photogrammètre, peuvent changer d'un photogrammètre à l'autre.

■ Le lien avec la photogrammétrie

Un ensemble de primitives géométriques simples servent à approximer ces particularités morphologiques et sont utilisées comme interfaces entre la mesure photogrammétrique et le modèle sous-jacent. La finalité de la mesure pouvant être double :

- détermination des positions et orientations des objets dans le référentiel général du navire ; il s'agit ici de mesurer un objet dont la morphologie générale nous est donnée a priori. Dans le cas présent, le module de mesure est prévu pour la

- ■ ■ mesure des amphores de PY4-GRF1 à 4. C'est-à-dire les quatre classes d'amphores isolées, descendantes de la classe Py 4, sans tenir compte des quelques amphores de type Py 5, des quatre massaliètes, de l'amphore grecque d'Égée septentrionale et des deux ou trois grecques de Calabre de cette épave. La spécificité de la mesure de ces classes tient essentiellement aux valeurs par défaut qui diffèrent, la forme générale restant identique.
- Les mesures donnant lieu au calcul des positions et orientations de l'amphore peuvent également servir à déterminer des caractéristiques intrinsèques de l'amphore, données qui sont généralement mesurées par une autre méthode quand l'amphore est remontée à la surface. Une détection de conflit entre la mesure photogrammétrique et ces données extérieures est mise en place sans toutefois qu'une décision soit prise par le système. Ces problèmes de fusion de données hétérogènes de détection de faute et d'incohérences, de mise à jour et de révision de données ne seront pas abordés dans cet article. Nous travaillons sur ces sujets dans le cadre d'une thèse de doctorat de M. Julien Seinturier, co-encadré par Mme Odile Papini, professeur à l'université de Toulon et du Var [Papini, 2001] et plus généralement avec Mme Camilla Schwind [Schwind 2003].

La mesure photogrammétrique est supportée par quelques points stratégiques de l'amphore (pointillé sur le schéma Figure 4, à droite). Cinq zones servent à définir, de façon redondante, les paramètres de définition du référentiel de l'amphore. Si la mesure s'avère impossible sur certaines parties, le mécanisme de détermination du référentiel utilise les relations entre amphores (si elles existent) ou des valeurs par défaut. Le problème d'inférence de valeurs fondées sur des données incomplètes ou devant être remise en cause est fréquent en archéologie. On peut consulter avec intérêt les travaux de Claire Reeler qui utilise la logique floue pour formaliser cette incertitude ([Reeler, 1996-1], [Reeler, 1996-2]).

Les informations contenues dans la source S1 vont au delà des aspects géométriques. Un ensemble de données non gra-

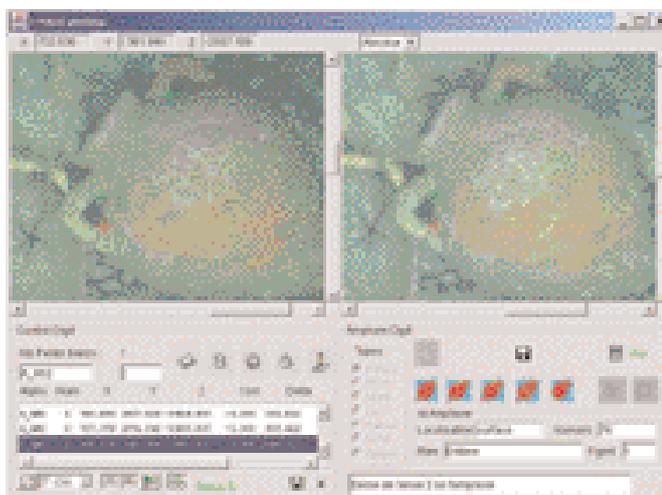


Figure 5. Interface de saisie d'amphore dans l'Arpenteur. La saisie se fait conformément à un modèle théorique et est connectée à une base de données distante.

phiques (bibliographie, iconographie) entrant dans la définition du "modèle" ne seront pas traitées dans cet article.

La seconde source : le relevé photogrammétrique

La seconde source de données (S2) provient des mesures photogrammétriques obtenues à l'aide des photographies prises sur le site. Ces informations sont de trois types : position et orientation des photographies dans le référentiel général du site, position et orientation des amphores identifiées et mesurées, détermination de quelques attributs morphologiques. Pour chaque amphore observée sur au moins deux photographies, l'archéologue identifie le type de l'amphore et choisit une classe suggérée par le système, issue de la première source de données (S1). Une instance est créée et nommée de façon univoque, l'utilisateur peut alors commencer la phase de mesure. Les mesures ne peuvent être faites que sur les primitives géométriques définies dans le modèle (source S1). La morphologie complète de l'amphore sera déduite de ces primitives géométriques. Ces mesures sont fortement incomplètes car les amphores ne sont vues que partiellement sur les photographies et par ailleurs beaucoup d'entre elles sont en parties brisées ou envasées. Le rôle du système expert et de la phase de déduction sera de compléter ces observations et, après la fusion des sources S1 et S2, de proposer un modèle complet de chaque instance.

Fusion de données

L'obtention d'une représentation 3D complète de l'amphore passe par la fusion des mesures photogrammétriques (S2) et du modèle théorique (S1). Ces deux sources de données fournissent l'information sur les zones remarquables des amphores, définies par l'archéologue. La méthode de fusion est fournie par inférence sur les sources de données et produit une liste d'actions à réaliser. Dans un second temps, la fusion est effectuée selon les actions correspondantes aux faits générés.

Création de la base de croyances (KB)

KB est la représentation logique de l'état des données présentes dans les sources S1 et S2. Elle se compose de deux sous-ensembles : la base de faits, issue de S2 et de S1, pour les valeurs par défaut et la base de règles, issue de S1. On met en place une base de faits donnant des informations sur les données présentes dans S1 et S2. Pour cela, un fait est associé à chaque donnée présente dans les sources. Cette méthode est une simple application de l'hypothèse du monde clos souvent utilisée dans le domaine des bases de données. Exemple : considérons que S1 contienne une hauteur ainsi que le diamètre de panse d'une amphore et que S2 contienne les mesures de la panse et d'une des anses. La base de croyances KB contiendra alors les faits S1height, S1bellyradius, S2belly, S2handle1, chacun déterminant l'existence de données dans la source spécifiée. On complète ensuite KB avec une base de règles qui permettra d'indiquer comment fusionner les sources. Les règles utilisent les faits de la base de croyances pour en générer de nouveaux, ceux-ci représentant les actions à effectuer pour la fusion. Une règle peut être décrite comme une expression *si... alors...*, par exemple : *si fait1 et fait2 alors action3*.

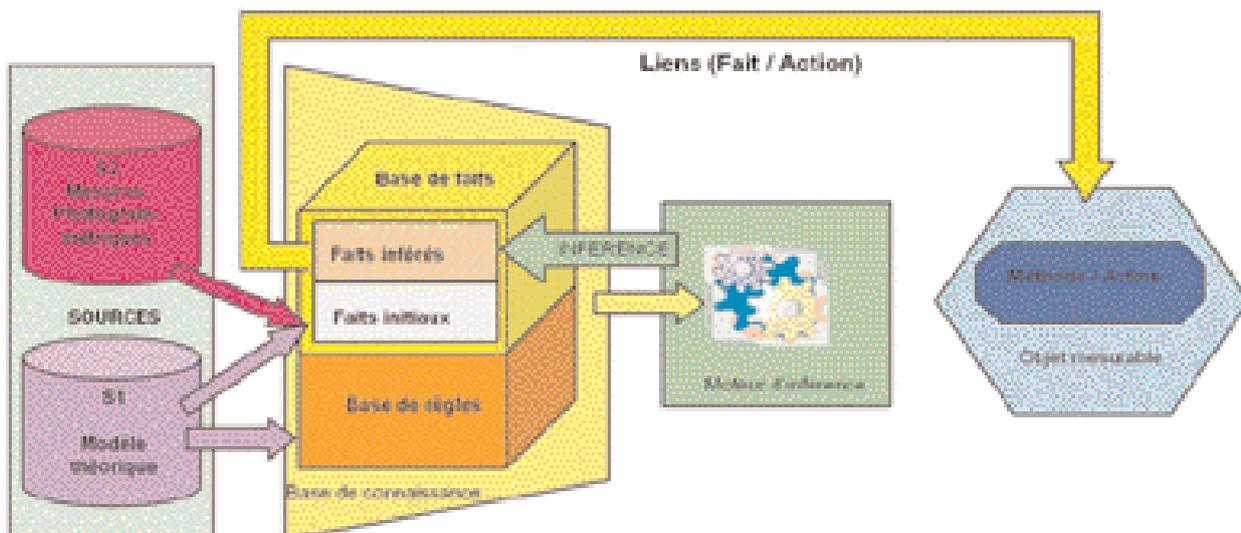


Figure 6. Des sources de données à la représentation complète de l'objet : Fonctionnement du Système Expert.

Technique de fusion des sources

Une fois la base de croyances construite, un système permettant la saturation de la base de faits doit être mis en place. Saturer la base de faits consiste à déduire tous les faits possibles à partir des règles. La technique utilisée pour cela est l'inférence en chaînage avant dont le moteur Jess (Java Expert System) [JESS, 2001] permet l'utilisation. A la fin de l'inférence, la base de croyance contient de nouveaux faits représentant les actions à mener pour procéder à la fusion des deux sources. En pratique, l'utilisation de Jess est possible uniquement grâce à un adaptateur entre la base de croyance, contenue dans un document XML, et les objets JAVA utilisés par Jess. Cet adaptateur est constitué d'un analyseur XML remplissant deux managers : un manager de formules logiques (pour les règles) et un manager de faits. La phase d'inférence est initialisée avec les deux managers passés en paramètres au moteur d'inférence. Une fois cette

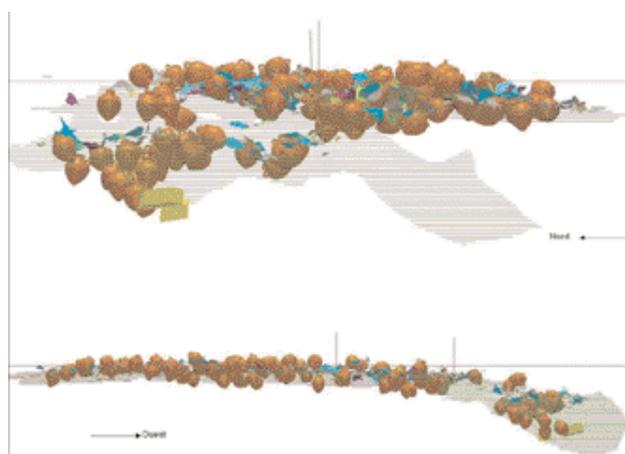


Figure 7. Représentation du site après les campagnes 2000 et 2001. Rendu des amphores avec MicroStation.

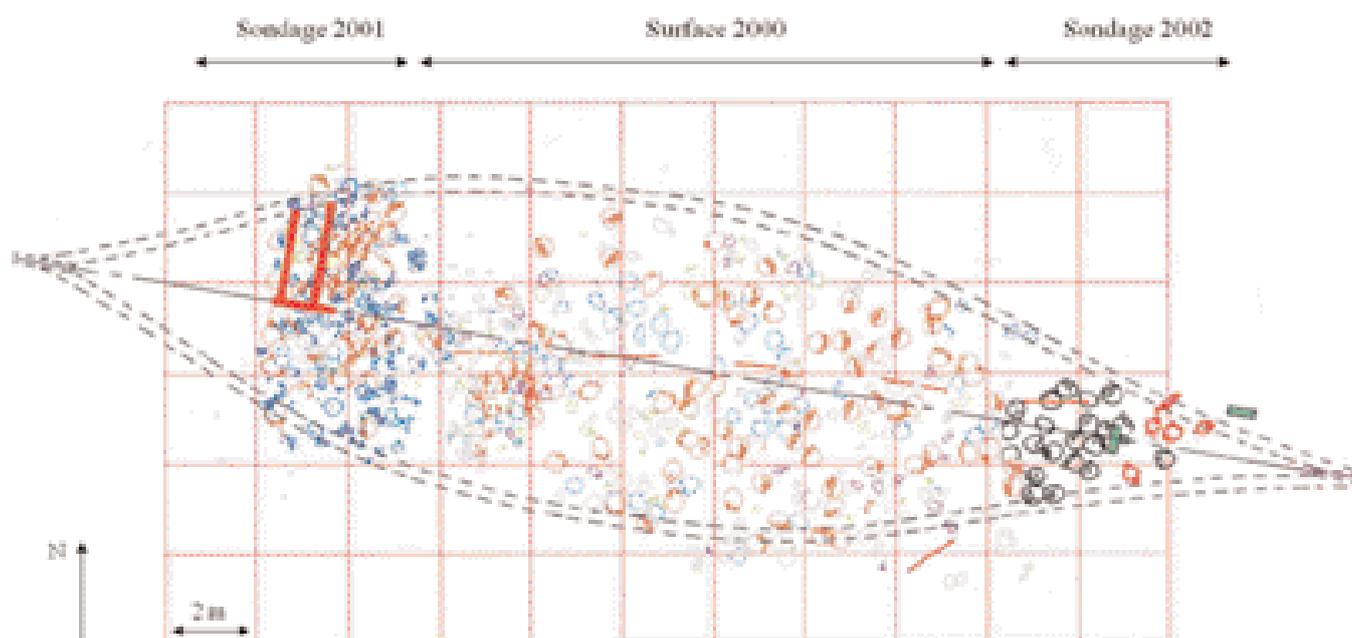


Figure 8. Sur la base des relevés des campagnes 2000, 2001 et 2002, une hypothèse de positionnement du navire

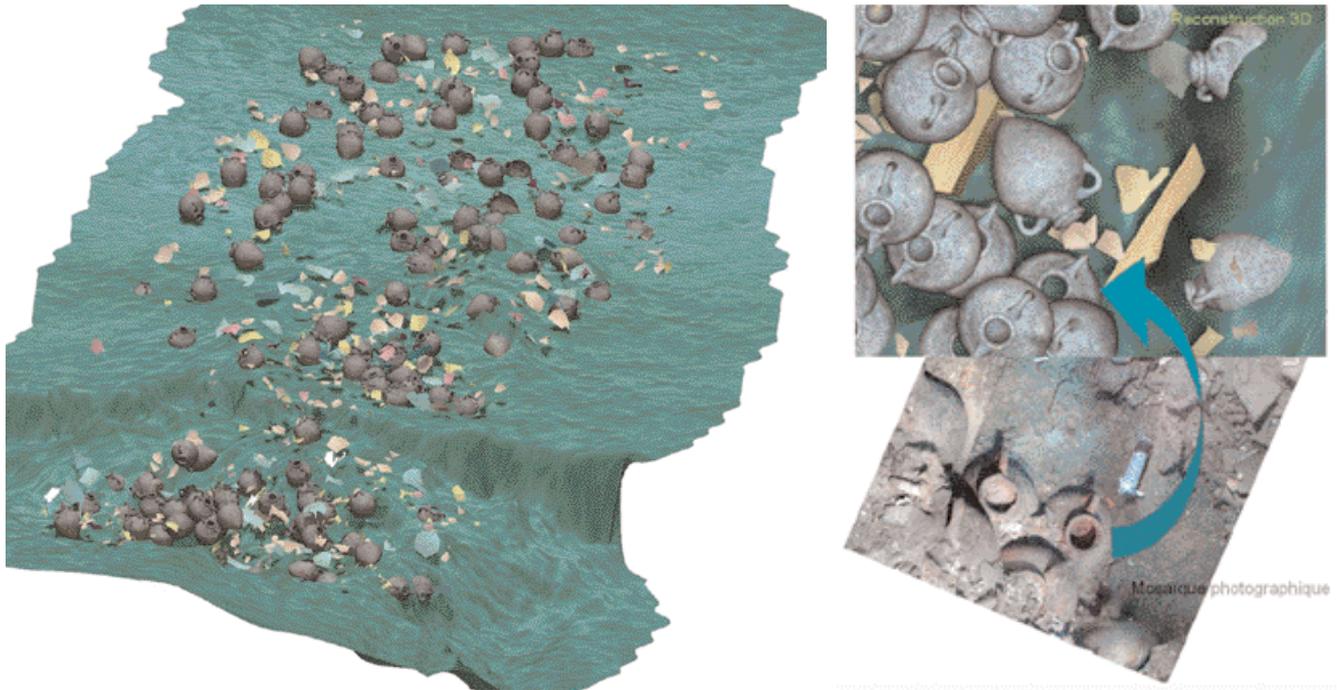


Figure 9. Vue générale du site et des différents sondages effectués (2000-2002). Représentation Microstation.

phase terminée, le manager de faits contient les faits initiaux complétés par les faits d'actions nouvellement inférés durant la saturation. La fusion par action est en fait le pont entre l'ensemble de faits produit par l'inférence de Jess et l'ensemble d'actions à accomplir sur l'objet de l'étude. Du point de vue de l'implantation, les instances sont des objets Java et l'appel du système expert se fait via une méthode générique: `logicalRestitution`. Une action est, dans ce contexte, une simple méthode Java que l'objet étudié appelle grâce au nom du fait d'action correspondant. Le principe sous-jacent étant que tous les objets mesurables de la hiérarchie possèdent un ensemble de méthodes élémentaires qui permettent le calcul de primitives géométriques comme le calcul de barycentre, de rotation, de translation, etc. Chaque action est associée à un fait homologue dans le modèle théorique (S1) et produit par l'inférence du système expert.

Résultats

Cette approche nous permet d'obtenir, malgré une vision partielle des amphores, une représentation de la cargaison relativement proche de la réalité, du moins de l'ensemble dégradé par le temps qui en résulte. Nous obtenons deux types de résultats, une forme textuelle, structurée en XML et un ensemble de représentations graphiques, directement généré par les instances Java: fichiers VRML et MicroStation™. Ces fichiers XML contrôlent toute l'information que nous possédons sur les objets mesurés et calculés: les photographies sur lesquelles ils sont vus, les caractéristiques géométriques calculées ou inférées par le système expert, la liste des faits mesurés, calculés ou inférés, les diverses remarques faites par les archéologues, etc. Le système permet d'atteindre les informations numériques de l'objet depuis sa représentation graphique afin par exemple de connaître l'origine d'un attribut (calcul sur des mesures photogrammétriques ou déduction depuis le modèle théorique).

Les visualisations tridimensionnelles proposées aux archéologues apportent une vision globale du site impossible à obtenir autrement: toutes les amphores sont visibles sur la même image depuis le début de la fouille. Les archéologues sous-marins retiennent effectivement du site une vision parcellaire toujours limitée à quelques mètres carrés dans un constant nuage de sédiment en suspension. Ici, ils peuvent du coup observer et mesurer les différentes couches d'amphores et utiliser les résultats graphiques obtenus pour échafauder de nouvelles hypothèses. Compte tenu des mauvaises conditions de travail sur l'épave, il était par exemple difficile de déterminer avec précision pendant la fouille le nombre de couches d'amphores superposées. A cette fin, en 2001, une tranchée transversale avait été implantée au niveau de la deuxième règle, à l'ouest, sur 2 m de large pour 5 m de long. Quatre pieds équipaient le ventilateur blaster qui émulsionnait le sable sur 3 à 4 m². Pour pouvoir dévaser toute la zone sélectionnée cet appareil, alimenté depuis la surface, fut déplacé à plusieurs reprises. Le dégagement des amphores en escalier et leur récupération par les plongeurs, ainsi qu'à l'aide d'une ventouse équipant le sous-marin, laissait percevoir l'enchevêtrement des couches de récipients auxquels il fallait ajouter ceux relevés en surface l'année précédente. Après le démontage, sont apparues au fond de la tranchée, à 1,6 m dans le sédiment, deux membrures et la carlingue du navire. Toutefois, lors de ces sondages, la forme même de l'excavation, en entonnoir étagé, et la chute constante de sable et de tessons ne facilitaient pas le comptage direct des objets. En outre, beaucoup d'amphores fissurées par le long séjour marin, s'étaient rapidement disloquées une fois dégagées, ce qui contrariait notre interprétation. Ignorant tout de la forme de la carène, le nombre exact des couches dans cette partie de la cargaison constituait cependant une information majeure pour le calcul du tonnage du navire. Les observations faites in situ, le dépouillement des premières images et les

reconstitutions à terre, par empilement des récipients, laissaient envisager l'existence à peu près certaine de quatre couches et probablement de cinq. Mais les premières restitutions photogrammétriques de ce secteur et la reconstruction de la cargaison dans le sondage démontrent assez nettement aujourd'hui l'existence d'une sixième couche. Sur la figure 7 en haut, complétée par la figure 9, à droite, on distingue les deux amphores disposées en fond de cale entre les deux membrures du navire. Imbriquée juste au dessus prend naissance la deuxième couche, avec parfois un récipient un peu plus haut que les autres puisque son pied repose sur le sommet de la membrure. Si la troisième couche est disposée verticalement comme les précédentes, les amphores de la quatrième et de la cinquième couche sont plus ou moins couchées. Enfin sous la surface du sable, la sixième couche est de nouveau clairement verticale. On considère dans cette interprétation que les 114 amphores de surface, relevées en 2000, se sont désolidarisées de la sixième couche durant le choc lorsque le bateau a touché le fond, au moment du naufrage.

Ainsi, si l'on tient compte des dimensions du navire, de l'emprise au sol du chargement (évaluée au minimum à 80 ou 70 m² en surface et à 60 ou 50 m² en fond de cale) et des premières restitutions 3D de la cargaison, qui doivent nécessairement intégrer les espaces perdus dans lesquels s'inséraient les structures du navire (mâts, épontilles, carlingues...), nous sommes enclins à penser que l'épave renfermait au moins un millier d'amphores, soit une charge d'une quarantaine de tonnes. Les quatre cents amphores déjà prélevées à ce jour, à la fois à la surface du site et dans les sondages, confortent ces estimations. Elles doivent être considérées comme minimales puisque ces excavations, implantées au total sur environ 30 m², ne couvrent en gros qu'un tiers du gisement.

■ Conclusions sur le relevé et la modélisation

Nous avons présenté un outil de représentation et de mise en scène des hypothèses archéologiques fondé sur une confrontation de mesures objectives et d'hypothèses. Un des objectifs décrit dans cet article est la visualisation de scènes déduites d'un minimum de points mesurés. Les aspects génériques des développements nous permettent d'étendre cette approche à d'autres types d'objets, en particulier des objets purement architecturaux.

Nous avons associé, avec l'aide de Jess, un moteur d'inférence à une base de connaissance d'objets mesurés dans un Système Expert capable d'assister la phase de mesure de ces objets et d'en produire une représentation idéale. Outre l'intérêt non négligeable d'utiliser des algorithmes d'inférence, l'utilisation d'un système expert apporte un niveau élevé d'abstraction dans la représentation de la connaissance d'objets mesurables. L'intérêt majeur du procédé, de notre point de vue, est l'insertion de connaissance associée à la géométrie des objets mesurés.

Cet outil permet à l'expert archéologue de faire un relevé photogrammétrique sans être un expert en photogrammétrie. Le rôle d'expert, ici, est plus d'insérer de la connaissance dans le système que de mesurer les caractéristiques géométriques de l'objet.

PUBLICATION DES RÉSULTATS: LE CHOIX XML

Le projet s'inscrit dans une histoire. L'informatisation d'une fouille archéologique implique une remise en cause importante des outils et méthodes utilisés auparavant. Les prémices du projet datent d'une demande de collaboration faite par le DRASSM auprès du MAP pour la réalisation d'une campagne de photogrammétrie sous-marine sur l'épave étrusque. L'occasion d'une collaboration plus riche et d'un projet plus global a donc été saisie dès ce moment. Les divers outils, à différents niveaux de développement, existaient au MAP-gamsau [Drap & Grussenmeyer, 2000], les interrogations sur le lien entre relevé photogrammétrique, représentation 3D et base de données, étaient déjà présentes ([Drap, Hartmann-Virnich, Grussenmeyer, 2000]). Il restait à synthétiser l'expérience et à proposer un modèle coopératif pour l'équipe tout en développant les outils de photogrammétrie et l'application au milieu sous-marin. Le projet a reposé très tôt sur le choix d'XML comme langage de structuration et de sauvegarde des données, qu'il s'agisse des données internes au système, photogrammétrie et configuration générale, ou des données archéologiques.

De fait, XML ([XML, 2000],) est un format d'échange de données autorisant une forte interopérabilité entre logiciels et équipes diverses. Depuis 1999, ces standards de communication se répandent dans le milieu informatique et dans des domaines connexes à la photogrammétrie comme les Systèmes d'Informations Géographiques, (GIS en anglais). Le Consortium OpenGIS a élaboré plusieurs spécifications pour définir les structures de données, par exemple les transformations de coordonnées [OpenGIS, 2001]. Dans un autre contexte, plus archéologique, l'Oriental Institute de l'Université de Chicago [XSTAR, 2004] développe le format Xstar pour la structuration de données archéologiques en XML. Enfin, notre dernier centre d'intérêt est la représentation 2D et 3D. En 2D le format SVG, Scalable Vector Graphic) permet de combiner en XML données raster et vectorielles ([SVG, 2001]). En 3D, le consortium VRML (Virtual Reality Modeling Language) est passé du stade des recommandations à celui de la standardisation (voir [VRML, 1997]). Il débouche maintenant sur un format de représentation de données géométriques entièrement en XML: X3D (voir [WEB_3D, 2004]).

Comme on a pu le voir dans la première partie de l'article, sur la figure 1, l'ensemble des données mesurées est formalisé en XML et les interfaces d'accès à ces données utilisent des



Figure 10. Orthophoto géoréférencée et superposition des artefacts mesurés. Interface SVG d'accès aux données archéologiques enregistrées dans les différents fichiers XML.

- formats graphiques XML (SVG et X3D). Cette cohérence des formats pour la représentation des données textuelles, raster et 3D, permet la génération à la volée de code X3D ou l'accès aux données textuelles depuis une interface SVG. On peut voir sur la Figure 10 l'orthophoto du site, géoréférencée avec une représentation graphique 2D de l'ensemble des artefacts en SVG, générée automatiquement. Ces développements entrent dans un projet plus vaste ISA-PX, (Information System for Archaeology, Photogrammetry and XML) dans la partie SVGX, et l'interrogation est développée par Anne Durand, ingénieur de Recherche au MAP.

DÉVELOPPEMENTS EN COURS ET EN PROJET

Visualisation et interaction

L'intérêt de la visualisation d'une maquette 3D pour l'archéologie à l'échelle de l'édifice n'est plus à démontrer (Paul Reilly dès 1990 dans un article intitulé *Towards a virtual archaeology* publié lors des rencontres CAA – *Computer Applications in Archaeology* – à Southampton décrivait clairement l'intérêt de l'élaboration d'un modèle 3D et de sa visualisation). Depuis cet aspect a été largement étudié et de nombreuses études théoriques sur la reconstruction du passé ont été menées à bien. (Voir à ce propos la synthèse de Juan A. Barceló [Barceló, 2000]).

■ SVG, une interface légère, simple et conviviale

SVG, acronyme de Scalable Vector Graphic, ([SVG, 2001]), permet de publier dynamiquement sur le web, grâce à un visualisateur gratuit (sur le site de Adobe) des données raster et vectorielles. L'interface est très intéressante, l'aspect XML permet la transformation à la volée d'informations, mais ne résiste pas à une trop grande quantité de données. Cette limite est vraiment pénalisante et limite son utilisation à des cas particuliers.

■ Les limites de VRML

Le langage de description de scène 3D VRML est bien adapté à une visualisation rapide et simplifiée. Couplé à un langage de script tel que PHP, il permet également un interfaçage simple et efficace vers un SGBD relationnel dans le sens de la consultation. Dans ces limites d'utilisation, il remplit parfaitement son office et de nombreux projets de recherche l'utilisent (par exemple le projet d'un musée virtuel dédié à l'évolution d'une ville, développé par Maria Elena BonFigli et Antonella Guidazzoli [BonFigli, Guidazzoli, 2000] ou bien avec une solide interface JAVA 2D, les travaux pédagogiques sur les SIG de Kate Moore, Jason Dykes et Jo Wood, Université de Leicester, [Moore, Dykes, Wood, 1997]). Néanmoins, VRML souffre d'un manque de portabilité (aucun visualisateur performant et gratuit n'a été développé pour les systèmes unix) et manque énormément de souplesse quant à la mise à jour dynamique du modèle 3D. La scène est décrite dans un fichier et les liens vers l'extérieur (URL vers un SGBD par exemple) sont également codés dans le fichier. La modification dynamique du contenu d'une scène VRML est une opération lourde, très peu portable et limitée dans ses possibilités.

■ Les apports de X3D

X3D souffre des mêmes défauts que son "ancêtre" immédiat le VRML, mais il est nettement plus récent. En outre, les visualisateurs gratuits ne sont pas encore à la hauteur de ceux développés pour le VRML. Cependant, X3D est du XML pur et autorise à ce titre toutes les transformations et requêtes possibles en XML. Par exemple, il est possible de passer de la représentation globale des données en XML à une représentation graphique 3D par une simple transformation XSL.

■ L'ouverture de JAVA 3D

Depuis la version 2 de Java (Java 1.2 et 1.3), une bibliothèque graphique 3D est mise à disposition. Comme VRML, JAVA 3D propose un graphe de scène et une structure claire de l'espace représenté. Les concepteurs de JAVA 3D sont impliqués dans le développement de VRML et proposent un ensemble de ponts et traducteurs entre ces formats (principalement dans le sens VRML/Java3D). Les avantages évidents de JAVA 3D sur VRML résident en deux points :

- JAVA 3D est une bibliothèque JAVA et peut donc être utilisée directement depuis le langage de développement du modèle. Le lien entre représentation graphique et modèle devient alors intime et il est possible d'envisager facilement un lien bidirectionnel entre le modèle objet et sa représentation graphique, donc entre un gestionnaire d'objet persistant, l'objet acteur et sa représentation graphique.
- La visualisation d'une scène n'est plus liée à un outil de rendu 3D rare et peu portable et ne dépend plus que de la présence de la bibliothèque JAVA 3D sur la machine hôte. JAVA 3D est distribué pour la grande majorité des systèmes informatiques actuels.

■ Les CAD

Les méthodes de visualisation présentées jusqu'ici permettent un accès dynamique et interactif aux données 3D ainsi qu'aux données textuelles liées mais ne permettent pas une étude métrique des scènes représentées. Les besoins des archéologues ne se limitent pas à la visualisation mais recourent également les problèmes d'élaboration de plan, de courbe de niveaux, de cubature, etc. Nous générons donc dans le même temps un fichier représentant la même scène mais dans le format du logiciel MicroStation de Bentley.

■ Conclusions sur la représentation graphique

Le choix d'un ou de plusieurs formats graphiques de représentation est toujours problématique. Actuellement, nous utilisons de façon systématique quatre formats différents : SVG, VRML, X3D et Microstation, occasionnellement JAVA 3D.

Aucun n'est pleinement satisfaisant. La contrainte majeure réside dans le fait que les fichiers doivent pouvoir être générés automatiquement par programme, le format doit donc être connu et stable. Ce dernier aspect, la stabilité, nous a conduit à écarter définitivement DXF. JAVA3D semblait être une solution originale et satisfaisante mais les difficultés d'installation pour des non informaticiens en font un outil limité à une petite communauté. De plus chaque tentative d'adoption d'un nouveau format est coûteuse en temps.

Fusion de données

Le contexte des connaissances spatiales implique la gestion de différents types de données, provenant de différentes sources caractérisées par des degrés de confiance divers. ([Shi, 2000], [Peled, Raizman, 2000]) Ces données sont de qualités très inégales, incomplètes, incertaines et peuvent entrer en contradiction, elles conduisent à la définition d'une stratégie d'agrégation ou de fusion. Un certain nombre de travaux ont été réalisés, dans les domaines de la représentation des connaissances, d'aide à la décision ou encore des bases de données, cependant les opérations de fusion proposées ne sont pas réversibles, ce qui reste problématique dans les applications réelles.

La seconde partie de ce travail est l'étude de la réversibilité pour la fusion de sources multiples, elle pourra être abordée en deux temps :

- D'un point de vue théorique, il s'agira, tout d'abord d'étudier la réversibilité des opérateurs de fusion présents dans la littérature et de proposer des méthodes de fusion réversibles efficaces. Cette étude pourra s'appuyer sur les travaux effectués sur la réversibilité des opérateurs de révision, en particulier avec une représentation de pré-ordres par des polyômes [Papini, 2001].
- D'un point de vue pratique, il s'agira d'étudier la mise en œuvre des opérations de fusion réversibles par l'adaptation des algorithmes existants pour la fusion non réversible et/ou la proposition de nouveaux algorithmes efficaces pour réaliser la fusion réversible.

Cet aspect du problème est développé dans le cadre de la thèse de M. Julien Seinturier, co-encadré par Mme Odile Papini et Pierre Drap.

Conclusion

Comme P. Pomey l'avait déjà signalé, il y a vingt ans [Pomey 1985], les épaves profondes ont toutes les chances d'être mieux conservées que les autres. A cette époque, l'épave romaine Bénat 4 découverte par 328 m de fond, à l'est de Toulon, inaugurait une longue liste de navires antiques qui ont tous échappé aux récifs destructeurs et atteint le fond sans gros dommage. Le pourcentage de fracturation des amphores de cette épave restait visiblement très limité et la forme du bateau encore perceptible. Il fut ainsi relativement aisé, lors d'une plongée d'expertise avec la soucoupe Cyana (Ifremer) en 1981, de localiser en marge du chargement les objets du bord disposés à l'arrière du navire. Sur l'épave *Arles 4*, découverte par la même soucoupe plongeante en 1989, à 662 m de fond, face au grand Rhône, les ancres du navire étaient parfaitement décelables à l'avant d'un énorme chargement d'amphores de Bétique (Andalousie). Phénomène extrêmement rare, une partie des membrures du navire, sans doute hors de portée des vers xylophages à cette profondeur, dépassaient encore du sédiment. Si le chargement de l'épave Bénat 4 ne comprenait qu'un seul type d'amphores, l'organisation sur deux couches de celles de l'épave *Arles 4*, réparties en cinq zones au dessus d'une cargaison de galettes de cuivre, restait également très compréhensible. Par miracle, certains réci-

pients présentaient encore des cartouches à inscriptions peintes, parfaitement visibles en pleine eau.

La démonstration était donc faite que les épaves profondes, situées généralement au large où se combinent divers facteurs très favorables à la conservation des matériaux habituellement périssables (obscurité, basse température, faible taux d'oxygène) pouvaient échapper aux organismes marins les plus redoutables. Une autre qualité et non la moindre résidait dans leur lisibilité directe, qui permettait de comprendre avec plus de facilité là qu'ailleurs l'agencement d'un navire sans entreprendre de trop gros travaux de dévasage le plus souvent irréalisables par les méthodes traditionnelles. Situées au delà des zones d'herbier, épargnées par le concrétionnement et par la sédimentation toujours très forte près des côtes, ces vestiges du passé étaient pour une fois offerts sans difficulté à l'analyse des scientifiques. C'est ainsi que l'épave *Grand Ribaud F*, riche par sa cargaison propre et par l'extrême rareté des bateaux étrusques d'époque archaïque, présentait un enjeu considérable pour la recherche archéologique et scientifique. Située à la limite de la plongée professionnelle et déclarée par la Comex, dont le PDG, Henri-Germain Delauze consentait à développer sur ce site un mécénat technologique, elle pouvait se prêter à une fouille novatrice, partiellement automatisée, et apporter dans le même temps des informations précieuses sur le commerce archaïque entre l'Italie et la Gaule. Mais la fouille d'une épave ou d'un site archéologique quelconque, quelle que soit sa profondeur, a toujours conduit les scientifiques à transposer l'objet de leur recherche, inexorablement détruit ou dégradé au fur et à mesure de l'étude – c'est ainsi le cas lorsque l'on démonte, on l'a vu, une à une les couches d'amphores – sous forme de données inventoriées et de représentations graphiques et spatiales. Si tout un arsenal d'outils, de supports et de techniques avaient permis jusque-là, dans cette capture de l'information, de garder une trace fidèle des gisements disparus, sous forme de liste, de plan, de calque, de coupe, de reconstitution 2D, les progrès technologiques et les avancées de la photographie et de l'informatique autorisent depuis ces dernières années la mise au point et la reconstitution de nouvelles représentations. A partir de l'enregistrement informatisé de toutes les données de la fouille, l'archéologue est désormais capable d'obtenir des représentations tridimensionnelles précises, et d'interagir dans des fac-similés fidèles construits au plus près du terrain et visualisable à l'aide de logiciels désormais courants. Ainsi, pouvons-nous considérer comme le faisait encore récemment Jean Leclant que *"désormais les techniques les plus modernes, avec toutes leurs promesses d'avenir, participent à la quête ardente de l'homme vers son passé"* ([Leclant 1996] page 7).

Mais au-delà du procédé de photogrammétrie sous marine appliqué lors de cette expérience à l'épave étrusque, il faut retenir la notion de modèle à partir duquel furent générés les fac-similés des artefacts issus d'un nombre restreint de points mesurés qui fournissent leurs positions, orientations et paramètres géométriques. C'est-à-dire que l'ensemble homogène des amphores composant la cargaison a été modélisé à partir d'un concept, enrichi de la lecture de chaque objet, avec ses mensurations et ses caractéristiques propres. C'est par ce

- ■ ■ principe rationalisant que l'archéologue a pu visualiser l'ensemble d'un site dont il n'avait acquis jusque là sur le terrain qu'une vision parcellaire.

Ainsi, les archéologues sous-marins pourront-ils, dans l'avenir, renoncer de plus en plus fréquemment à leur agilité innée d'homme-grenouille pour concentrer leurs efforts à bord d'un poste de commandement flottant, véritable "technocosme archéomatique" "Là, face à un écran de contrôle, ils actionneront tour à tour les commandes d'un engin de dévasage automatique, d'un bras télémanipulateur et d'un système d'enregistrement tridimensionnel restitué par ordinateur, avant de s'immerger dans le fac simile virtuel du gisement. Dans le même temps, la diffusion sur le net des ces précieuses informations recueillera l'avis éclairé, à l'autre bout de la planète, des meilleurs spécialistes. Ainsi, à la différence du commandant Cousteau et de son équipe qui, en 1952 à Marseille, avaient fouillé sans s'en apercevoir deux épaves romaines superposées, au pied du récif du Grand Congloué, ils pourront analyser immédiatement la situation et orienter au mieux la recherche de terrain, avec l'assurance de conserver une copie fidèle et intacte du site. ●

Références bibliographiques

[Drap, Hartmann-Virnich, Grussenmeyer, 2000] Pierre Drap, Andreas Hartmann-Virnich, Pierre Grussenmeyer, *Photogrammetric stone-by-stone survey and archaeological knowledge, an application on the romanesque priory church notre-dame d'aleyrac*, VAST - Euroconference on Virtual Archaeology, Arezzo (Italy) 24 au 24 novembre 2000, (actes à venir)

[Drap & Grussenmeyer, 2000] Pierre Drap & Pierre Grussenmeyer, *A digital photogrammetric workstation on the web*, Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol 55 N° 1. Official publication of the International Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), ELSEVIER février 2000, pp.48-58.

[Drap, Seinturier, Long, 2003] Pierre Drap, Julien Seinturier, Luc Long, "Archaeological 3D Modelling using digital photogrammetry and Expert System. The case study of Etruscan amphorae", The Sixth International Conference on Computer Graphics and Artificial Intelligence Limoges (FRANCE) 14 au 14 mai 2003.

[Leclant, 1996] Jean Leclant, *conception Maurizio Forte, Archéologie virtuelle, Le passé retrouvé*, Arthaud, 1996, 295 p.

[Maas, 2000] Hans-Gerd Maas, "New developments in Multimedia Photogrammetry" Institute of Geodesy and Photogrammetry, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich.

[Moore, Dykes, Wood, 1997] Kate Moore, Jason Dykes et Jo Wood, *Using Java to interact with geo-referenced VRML within a Virtual Field Course*, ICA, Visualisation Commission meeting, Stockholm, Suède, 1997

[JESS, 2001] "JESS, The Java Expert System Shell" E.J. Friedman-Hill, September 2001 <http://www.sandia.gov/jess>

[Papini, 2001] Odile Papini "Iterated revision operations stemming from the history of fan agent's observations" Frontiers of Belief Revision M.-A. Williams and H. Rott eds. Applied logic series. 22. Kluwer Academic publishers. Pages 279-301. 2001.

[Pomey, 1985] Patrice Pomey, *Perspectives d'avenir pour l'archéologie sous-marine: l'archéologie en eau profonde*, in : Deuxième Journées d'Etude sur la Plongée Scientifique, Bulletin de l'institut Océanographique de Monaco, 4, 1985, p. 59-74.

[Kwon, 1998] Young-Hoo Kwon
<http://kwon3D.com/theory/dlt/refr.html>

[Kwon, Lindley, 2000.] Young-Hoo Kwon, & Lindley, S.L. *Applicability of the localized-calibration methods in underwater motion analysis*. XVIII International Symposium on Biomechanics in Sports. Article consultable ici :

<http://www.education.ed.ac.uk/swim/papers2000/kl2.html>

[Peled, Raizman, 2000] A. Peled, Y. Raizman, *Three-dimensional digital photogrammetric update of the israeli national gis data base*, XIXth Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), Geoinformation for all, Amsterdam 16-23 July 2000. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol XXXIII, Tome IV-3, pp 443, 448.

[Reeler, 1996 - 1] Claire Reeler, *Fuzzy Logic, Neural Networks and the Analysis of pa Sites, Applications of GIS: Proceedings of Colloquium II*, UISPP XIIIth Congress, Forli, Italy, September 1996 Johnson, I. & North, M. (eds) 1997. Sydney University Archaeological Methods Series 5.

[Reeler, 1996 - 2] Claire Reeler, *Beyond GIS: Artificial Intelligence in Archaeology, Applications of GIS: Proceedings of Colloquium II*, UISPP XIIIth Congress, Forli, Italy, September 1996 Johnson, I. & North, M. (eds) 1997. Sydney University Archaeological Methods Series 5.

[Schwind, 2003] Camilla Schwind, "Inconsistent Query Answering from Weighted Causal Databases 1st International Workshop on Knowledge Representation and Approximate Reasoning" (KRAR'2003), Olsztyn, Pologne, 16-18 Mai 2003.

[Shi, 2000] Zhongchao Shi, *GIS database revision -the problems and solutions*, XIXth Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), Geoinformation for all, Amsterdam 16-23 July 2000. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Working Group IC WG IV/III.2, pp 494-501.

[OpenGIS, 2005] *Implementation Specification: Coordinate Transformation Services (Revision 1.00)* Open GIS Consortium, Inc., OpenGIS Project Document 01-009. 12 January 2001. <http://www.opengis.org/techno/implementation.htm>.

[SVG, 2001] *Scalable Vector Graphics (SVG) 1.0 Specification*, W3C Recommendation 04 September 2001, Jon Ferraiolo, <http://www.w3.org/TR/SVG/>

[WEB_3D, 2004] Web 3D Consortium, Open Standards for Real-Time 3D Communication, <http://www.web3d.org/index.html>

[XML, 2000] Extensible Markup Language (XML) 1.0 (Second Edition), W3C Recommendation 6 October 2000, Tim Bray, Jean Paoli, C. M. Sperberg-McQueen, Eve Maler, <http://www.w3.org/TR/REC-xml>

[XSTAR, 2004]
<http://oi.uchicago.edu/OI/PROJ/XSTAR/XSTAR.html>

Contacts

Pierre DRAP

MAP UMR CNRS 694, Ecole d'Architecture,
184 avenue de Luminy, 13288 Marseille Cedex 09, France
Pierre.Drap@gamsau.archi.fr

Luc LONG

D.R.A.S.S.M, Département des Recherches Archéologiques
Subaquatiques et Sous-Marines, Fort Saint-Jean, 13235
Marseille 02, France
Luc.Long@culture.gouv.fr

Le Cadastre brésilien

Perspectives d'évolution

2005 l'année du Brésil en France

■ Camille BOURGUIGNON - Alzir Felipe B. ANTUNES - Andrea F. TENÓRIO CARNEIRO

La structure politique brésilienne s'articule autour de trois niveaux : l'Union, l'Etat et la municipalité. Alors que le cadastre fiscal urbain est géré par les quelque 5 560 municipalités, le Secrétariat de la Recette Fédérale (SRF) est chargé depuis 1990 d'organiser le levé de l'Impôt Territorial Rural (ITR). Le Secrétariat du Patrimoine de l'Union est responsable de la gestion du domaine de l'Union. De plus, dans le cadre de la réforme agraire, l'Institut National de la Colonisation et de la Réforme Agraire (INCRA) réalise, indépendamment, le recensement des propriétés rurales. Enfin, les Registres Immobiliers municipaux, gérés de manière autonome, garantissent la propriété aussi bien urbaine que rurale. Particulièrement complexe et incapable de générer une information fiable, transparente et cohérente, le système actuel est source de nombreuses critiques. Le cadastre brésilien reste fortement marqué par le projet de réforme agraire initié en 1964 dans un pays encore rural. Or, considérant que, aujourd'hui, plus de 80 % de la population se situe dans les zones urbaines, l'administration de ces terres est devenue l'un des principaux enjeux du développement brésilien. Elle est nécessaire, notamment, afin de repenser le développement urbain qui est actuellement source de ségrégation spatiale et marginalisation. Associant une présentation générale du cadastre brésilien à une étude de cas, cette analyse met en évidence la nécessité d'une réforme progressive de l'administration foncière brésilienne afin, notamment, de respecter les nouvelles directives fédérales régissant le développement urbain et la gestion des finances publiques.

■ mots-clés

Cadastre urbain et rural, information foncière, municipalités, Brésil

Les origines du déséquilibre foncier brésilien

En 1500, lorsque les Portugais atteignirent le littoral du futur Brésil, ces terres furent incorporées au patrimoine de la Couronne portugaise. Ainsi, comme l'a fait remarquer (Andrea F. Tenório Carneiro, 2003), la première forme de propriété au Brésil fut publique. Pour en assurer son administration, ce territoire fut divisé en 14 capitaineries héréditaires, immenses bandes de terres confiées à des seigneurs portugais. Les terres furent ensuite distribuées sous forme de Sesmarias. Créé au Portugal en 1435 afin de mettre fin aux problèmes d'insuffisance alimentaire, ce système reposait sur la confiscation des terres improductives en vue de leur redistribution. Lorsqu'il fut transposé au Brésil en 1536, il fut considéré comme un moyen d'organiser la colonisation rapide des terres et ainsi d'affirmer la suprématie portugaise. Alors

qu'au Portugal il s'agissait de concessions temporaires de petites propriétés, il prit au Brésil la forme de concessions permanentes de vastes domaines. Ainsi, le système des Sesmarias servit le minifundium au Portugal, mais fut à l'origine du latifundium au Brésil. Durant les siècles suivants, les choix politiques renforcèrent ce modèle, favorisant l'établissement d'une structure foncière déséquilibrée, caractérisée par la concentration des terres entre les mains d'un faible nombre d'individus.

Une approche régionale de la structure foncière laisse transparaître une certaine hétérogénéité. Une étude de Cardim (1998) permet d'établir un lien direct entre la variation spatiale de ce déséquilibre et l'évolution des politiques d'occupation du territoire. Ainsi, pour ne citer que deux exemples, les déséquilibres les plus importants sont observés dans les régions les plus anciennement occupées, le Nordeste et la partie littorale de

la région Sudeste, contrairement à la région Sud dont l'occupation fut initiée à la fin du XIX^e. Ainsi, la résolution de ces déséquilibres passe par la définition de directives régionales, capables de prendre en compte ces différences.

La nécessité de procéder à un rééquilibrage fut au cœur du débat politique des années 1950 et aboutit en 1964 à un projet de réforme agraire dont le rôle est fondamental pour comprendre la scission cadastre urbain/cadastre rural caractérisant l'administration foncière brésilienne.

Le Cadastre rural brésilien

En 1964, le Statut de la Terre établit le cadre institutionnel et légal en vue de la réalisation de la réforme agraire. Celle-ci devait être effectuée par le biais de la désappropriation des terres improductives et de leur redistribution sous forme d'exploitations familiales. Cette loi

■ ■ ■ donna naissance à l'IBRA et l'INDA dont les responsabilités étaient, au-delà de mener à bien cette réforme, d'organiser la levée de l'ITR. C'est dans ce contexte que fut initié le premier recensement de la propriété rurale à l'échelle fédérale. Depuis 1972, l'INCRA, issu de la fusion de l'IBRA et l'INDA en 1970, procède à l'enregistrement de l'ensemble des propriétés rurales du pays au sein du Système National du Cadastre Rural (SNCR). En 1990, la responsabilité de l'ITR fut transférée vers le SRF. Le cadastre de l'INCRA perdit ainsi sa finalité fiscale. Si le SRF et l'INCRA devaient travailler conjointement, les difficultés administratives empêchèrent toute réelle coopération et donnèrent naissance à deux systèmes autonomes. De nature déclaratoire et en l'absence de normes strictes, l'information recensée dans le SNCR souffre d'un manque de fiabilité. Empêchant tout réel contrôle de l'évolution du parcellaire, cette situation est favorable à l'appropriation illégale qui est reconnue par l'INCRA comme étant *"l'un des instruments les plus puissants de concentration foncière dans le milieu rural brésilien"*.

En 2001, la loi 10.267, plus connue sous le nom de Système Public de Registre des Terres, posa les conditions minimales nécessaires pour garantir une plus grande fiabilité aux données de l'INCRA. Outre l'adoption de normes strictes, par exemple le rattachement obligatoire au Système Géodésique Brésilien, cette loi donna naissance à l'Annotation de Responsabilité Technique. Dès lors, les professionnels habilités pour réaliser les levés sont passibles de poursuites judiciaires en cas d'identification d'irrégularités au cours du processus de délimitation. Enfin, la reconnaissance de toute propriété rurale de plus de 100 hectares auprès des services notariés nécessite l'établissement d'un plan géoréférencé.

Le SNCR et les registres immobiliers sont gérés de manière autonome. La mise en cohérence des données de ces deux systèmes est uniquement assurée par l'obligation de présentation du Certificat de Cadastre des Immeubles Ruraux, émis par l'INCRA, auprès des services notariés. Le Système Public de Registre des Terres souhaite mettre fin à ce cloisonnement en

systematisant les échanges d'informations entre ces deux institutions à travers la création d'un Cadastre National des Immeubles Ruraux (CNIR). En assurant une plus grande fiabilité des données, ces mesures devraient renforcer la capacité de l'administration foncière brésilienne à combattre le phénomène d'appropriation illégale des terres, à minimiser les actes de corruption et, par conséquent, à accorder une plus grande transparence et crédibilité aux Registres Notariés.

Le cadastre rural de l'INCRA est issu du projet de réforme agraire initié dans un Brésil rural. L'urbanisation du pays durant la seconde moitié du XX^e siècle a fortement modifié les enjeux fonciers et oblige à accorder une attention grandissante à l'administration foncière urbaine. Si les zones urbaines et industrielles ne représentent que 7 % du territoire, elles concentrent plus de 80 % de la population.

Le Cadastre urbain brésilien

Le cadastre urbain est géré à l'échelon local et n'est l'objet d'aucune directive nationale. Principalement considéré comme un outil de collecte des impôts fonciers municipaux (Impôt Foncier et Territorial Urbain - IPTU et Impôt sur la Transmission des Immeubles Inter vivants - ITBI), il est réalisé de manière autonome par les préfectures. Cependant, le Brésil se composant de 5 560 municipalités aux réalités socio-économiques hétérogènes, celles-ci ne possèdent pas les mêmes capacités à mettre en place un tel système.

Renforçant le processus de décentralisation initié au début des années 1980, la Constitution Fédérale de 1988 confia aux municipalités la responsabilité du développement urbain et leur offrit, à cet effet, une grande autonomie juridique et financière. Cependant, cette responsabilisation souffrit d'un manque d'encadrement et, à la fin du XX^e siècle, l'appareil politique municipal brésilien souffrait d'un haut niveau de corruption et d'endettement, et se trouvait incapable d'organiser le développement urbain.

En 2000, la Loi des Responsabilités Fiscales (LRF), vint combler le vide législatif qui avait permis la dérive des

finances publiques brésiliennes. La LRF posa les bases nécessaires à la définition d'une nouvelle culture de gestion des ressources publiques organisée autour des notions de transparence, discipline et responsabilisation. Limitant le recours aux financements externes, cette loi oblige les municipalités à développer leur capacité à générer leurs propres ressources au travers, notamment, de leurs attributions fiscales.

La loi n° 10.257 du 10 juillet 2001, ou Statut de la Ville, donne naissance à de nouveaux instruments juridiques devant être utilisés par les municipalités pour la planification et l'implémentation des politiques urbaines. Le Statut de la Ville impose une organisation plus stricte de l'utilisation du sol. Outre l'obligation de définition d'un plan directeur pour les villes de plus de 20 000 habitants, le Statut de la Ville crée un outil permettant de combattre la spéculation foncière urbaine: l'IPTU progressif. La spéculation foncière est un problème chronique des zones urbaines. Les immeubles abandonnés constituent un élément récurrent du paysage urbain brésilien. D'un autre côté, des millions d'individus vivent dans des conditions précaires. Dès lors, les propriétaires ne respectant pas les obligations légales de parcellement, d'édification ou d'utilisation de la terre urbaine, s'exposent à une augmentation rapide de la valeur de l'IPTU. Enfin, à l'issue de 5 années de recouvrement de l'IPTU progressif, les pouvoirs publics municipaux peuvent procéder à la désappropriation du bien en effectuant le paiement de l'indemnisation en titres de dette publique.

L'application effective de ces mesures dépend avant tout de la capacité de l'administration foncière municipale à contrôler l'évolution du parcellaire. De plus, le cadastre municipal occupe une place centrale au sein du processus d'organisation et de gestion des espaces urbains. Or, en l'absence de directive nationale, il reste fonction des capacités locales. Alors que certaines municipalités ont su se doter d'une administration foncière efficiente, d'autres sont confrontées à de sévères dysfonctionnements.

Etude de cas : le Cadastre de Paranaguá - PR

■ Problématique

Bien que l'occupation de l'Etat du Paraná soit récente, Paranaguá fut l'un des premiers centres de colonisation du Sud du Brésil. Cœur historique du Paraná, sa prospérité a longtemps reposé sur les activités portuaires. Cependant, leur évolution au cours de la seconde moitié du XX^e siècle a considérablement réduit les besoins de main-d'œuvre, engendrant une véritable scission entre le port, le second port du Brésil, et la ville, souffrant d'importants dysfonctionnements économiques et sociaux. Malgré cela, Paranaguá est la principale zone d'activité de la région littorale de l'Etat du Paraná et, bien que les opportunités d'emploi y soient minimales, elle constituait pour beaucoup la seule alternative lorsque les conditions de vie devenaient trop difficiles dans les campagnes. Ainsi, sa population est passée de 17 728 habitants en 1960 à 141 635 en 2004. Arrivés sans ressources et en l'absence de perspectives de travail, une grande partie de ces immigrants s'installa illégalement sur les terres disponibles. L'incapacité

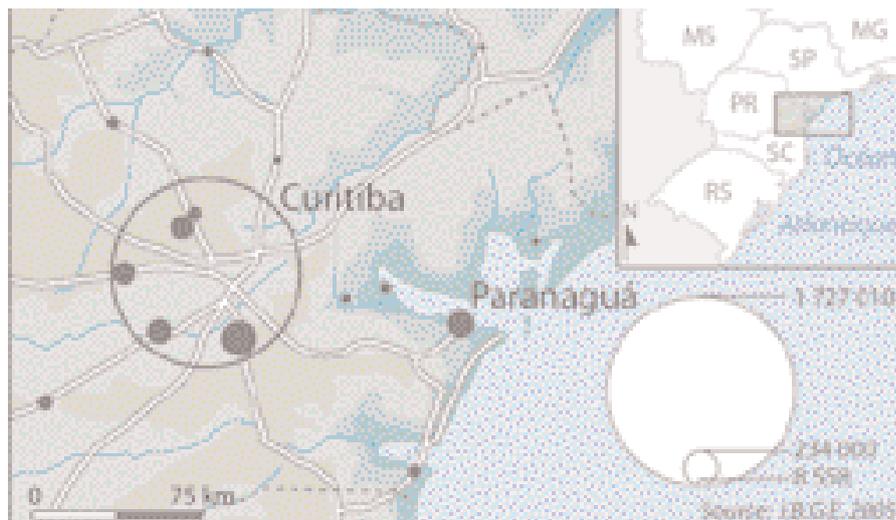


Figure 1 : Localisation de la municipalité de Paranaguá

des pouvoirs publics locaux à organiser la croissance urbaine fait que ce phénomène a pris une ampleur considérable. Aujourd'hui, près de 12 650 immeubles y seraient en situation irrégulière, soit 20,2 % des immeubles urbains. Compte tenu des dysfonctionnements de l'administration foncière municipale, l'estimation même de ce phénomène est délicate. Le système cadastral recensait 37 576 immeubles en mars 2005 alors que dans la réalité il y en aurait 25 000 supplémentaires.

A partir des années 1980, face à une exploitation de plus en plus agressive de l'espace, une série de dispositifs furent définis afin de protéger l'écosystème forestier de la région littorale. Ainsi, la croissance urbaine désorganisée de Paranaguá entre aujourd'hui en conflit avec les mesures environnementales strictes régissant la gestion de cet espace. Nécessitant l'intervention des trois sphères décisionnelles brésiliennes, le traitement du problème des occupations illégales est complexe. D'après la législation brésilienne, en l'absence de preuve de propriété antérieure au 31 décembre 1864, les îles océaniques et les terres se trouvant à une distance inférieure à 50 mètres de la ligne de marée sont la propriété de l'Union. Celle-ci peut accorder un droit d'occupation temporaire, sur une base annuelle, ou indéterminé, l'affleurement, qui est dans les deux cas conditionné par le paiement d'un impôt appelé "laudêmio". Enfin seules les propriétés jouissant du droit d'affleurement sont inscrites auprès du Registre des Immeubles.

La zone d'occupation illégale de l'île des Valadares (Figure 2), initialement habitée par des communautés de pêcheurs, est aujourd'hui occupée par plus de 25 000 personnes. En tant qu'île maritime, elle intègre le patrimoine de l'Union. Cependant, l'occupation de ces terres remontant parfois à plusieurs générations, les habitants actuels s'en considèrent propriétaires et refusent l'attribution d'un simple droit d'occupation. La reconnaissance de la propriété entre habitants de l'île

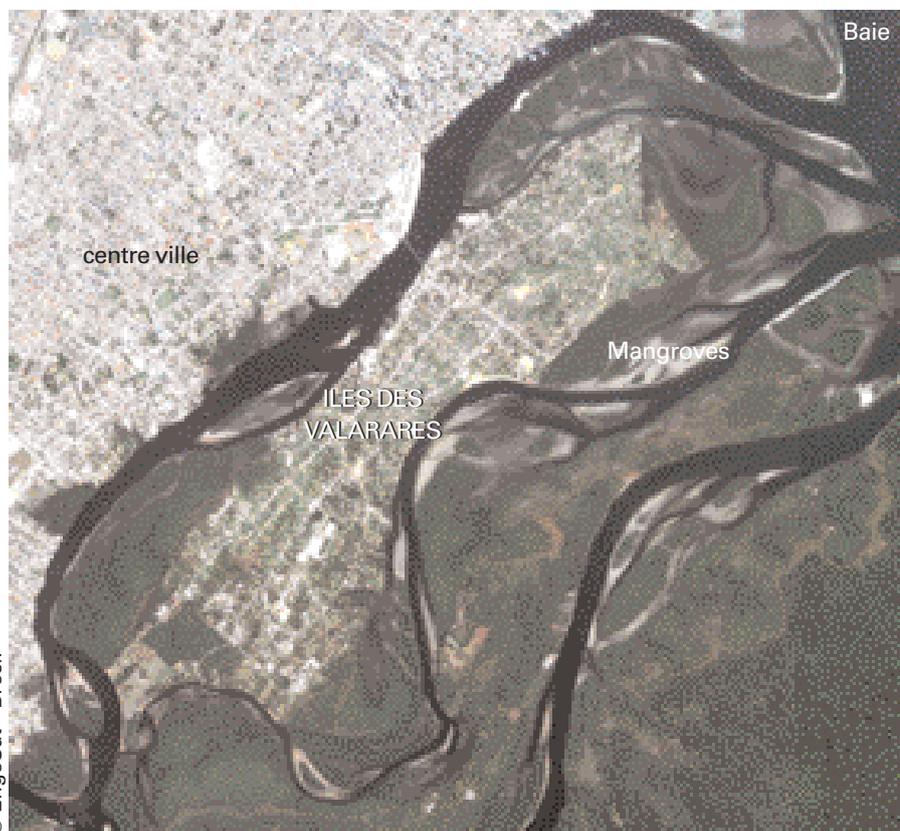


Figure 2 : Ile des Valadares, Paranaguá

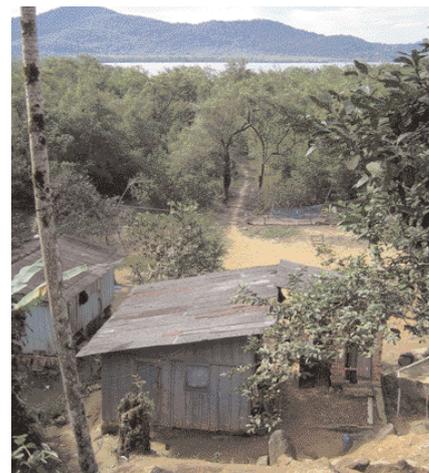
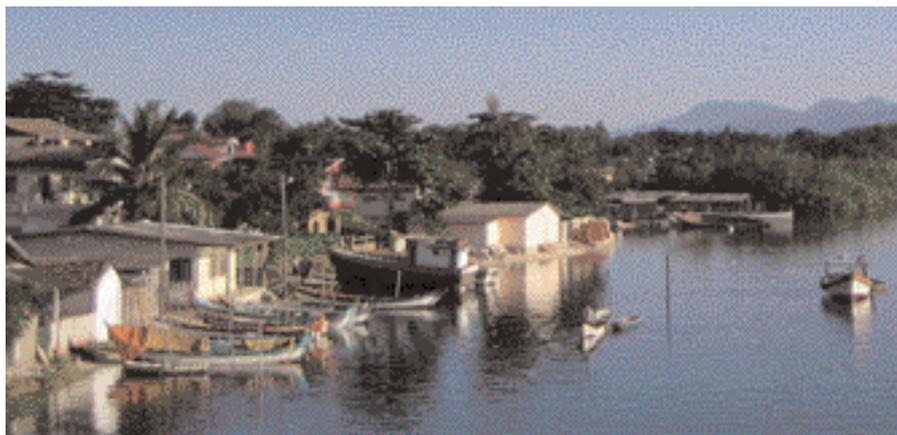


Figure 3 : L'occupation désorganisée de l'espace

■ ■ ■ prévaut et l'inexistence juridique de ces terres n'a pas empêché le développement d'un marché immobilier. Bien que ce système soit précaire, l'occupation est la principale garantie de la propriété, les conflits sont rares. Les transactions n'y sont reconnues qu'à travers la rédaction d'un acte de vente et achat. Ainsi, ces propriétés ne sont pas enregistrées auprès du Registre Immobilier et une partie infime apparaît dans le système cadastral municipal. La situation est actuellement paralysée. Que ce soit par protestation ou par manque de ressources, la grande majorité des habitants de l'île ne paye pas les impôts municipaux (Figure 3).

Bien que la situation n'ait toujours pas été régularisée, l'ensemble de l'île est pourvu en eau et électricité, on y dénombre quatre écoles, la municipalité y a récemment aménagé les principaux axes de circulation et y organise la collecte des déchets. L'amélioration des conditions de vie, la proximité du centre-ville et le cadre de vie agréable, en font un lieu de résidence de plus en plus prisé et, par conséquent, un haut lieu de la spéculation foncière. Parallèlement à l'aménagement de l'île, qui reste insuffisant, la municipalité doit développer sa capacité à administrer cet espace et, avant tout, à contrôler la dynamique foncière.

■ Dysfonctionnements de l'administration foncière municipale brésilienne

Paranaguá, tout comme la majorité des municipalités brésiliennes, manque de données cartographiques fiables. Par exemple, les données topographiques

au 1/2000 de la zone urbaine étant issues d'une prise de vue aérienne de 1996, elles sont aujourd'hui désactualisées. Plus généralement, c'est la désactualisation de l'ensemble des données cadastrales et cartographiques qui pose problème. Alors que certaines zones sont décrites par une information obsolète, d'autres sont tout simplement inexistantes. Par exemple, l'île des Valadares n'apparaît pas sur le plan d'îlots, ou encore, la municipalité ne possède pas une carte à jour recensant l'ensemble des rues. Pourtant ces documents sont essentiels. Les croquis de propriété sont rapidement réalisés au dos du Bulletin d'Information Cadastral et, n'étant pas mis à jour, ils ont généralement perdu toute valeur.

L'absence de connaissance des responsables locaux en matière de cadastre, et plus généralement de cartographie, se traduit par un manque d'initiatives. Considérant le "re-cadastrage" général comme étant le principal moyen d'actualiser l'information, ils se sont trouvés incapables de mettre en place des processus de mise à jour continue. Le dernier re-cadastrage général ayant été réalisé en 1998 par des stagiaires insuffisamment formés, l'information cadastrale municipale actuellement disponible est totalement désactualisée.

La partie textuelle des données cadastrales est gérée informatiquement et sert de base au calcul de la valeur des impôts fonciers. Cependant, obsolète et en amont du système, elle pollue l'ensemble des opérations en aval. La valeur de l'IPTU est donc source de nombreuses critiques car ne correspondant pas à la "réalité foncière". Le

cadastre municipal, en tant qu'outil fiscal, se heurte à un problème social. L'IPTU est un impôt impersonnel, c'est-à-dire fonction des caractéristiques des biens fonciers. Ce mode de calcul sous-entend l'existence d'une corrélation positive entre la valeur des immeubles et la capacité financière des propriétaires. Or cette situation ne se vérifie pas au Brésil où de nombreux propriétaires sont aussi démunis. Ainsi, le mode de calcul actuel, en plus d'être à long terme un facteur de ségrégation spatiale, est à l'origine de l'endettement des contribuables les plus pauvres. Les procédures juridiques, longues et coûteuses, sont à charge des contribuables, et ne font qu'empirer leur situation financière. Cette question est complexe mais primordiale dans un pays où la répartition des richesses est reconnue comme l'une des plus inégalitaires au monde.

Enfin le manque de connaissances foncières est un obstacle à la réalisation d'activités de planification et, plus généralement, à la mise en place d'un développement urbain durable. Les dysfonctionnements de l'administration foncière municipale interdisent tout contrôle de l'évolution du parcellaire urbain. Bien que les zones d'occupations illégales aient une dynamique foncière considérable, les transactions sont uniquement reconnues au niveau individuel. En plus d'être favorable à la spéculation foncière, cette situation préjudicie aux capacités financières municipales : échappant au pouvoir public, ces transactions ne sont pas assujetties à l'ITBI.

Si l'absence de relation entre l'INCRA et la préfecture de Paranaguá peut s'expliquer par le fait que, en tant que zone

de protection environnementale, elle n'est pas un enjeu de la réforme agraire, cette situation se vérifie dans la majorité des municipalités. Le manque de communication entre la préfecture, l'INCRA, et les services notariés rend difficile le croisement des données qui est pourtant fondamental pour, entre autres, s'assurer de leur cohérence. De même, en l'absence d'une information fiable délivrée par les services publics, les gestionnaires de réseaux ont développé leurs propres systèmes qu'ils gèrent de manière autonome.

Bien que l'étude de Paranaguá ne représente qu'un cas sur 5 560, elle a mis en évidence un certain nombre de dysfonctionnements qui furent aussi soulevés par une étude de l'Université Fédérale de Recife ayant abouti à une proposition de réforme progressive du cadastre brésilien.

Proposition de réforme progressive du cadastre pour la réalité brésilienne

L'administration foncière brésilienne souffre de lourdeurs de fonctionnement s'expliquant avant tout par la complexité de sa structure organisationnelle. Or, comme le font remarquer (Kaufmann et Steudler, 1998) dans leur définition du "cadastre du futur", il est fondamental de privilégier la légèreté et la flexibilité de manière à répondre aux besoins évoluant des sociétés. Les acteurs doivent être clairement identifiés et la communication au sein de ce système rapide.

La complexité du système brésilien réside, d'une part, dans le nombre d'acteurs et, d'autre part, dans le fait qu'ils agissent à différents niveaux de la sphère décisionnelle. En l'absence de directives communes, les initiatives aussi bien locales, régionales que fédérales restent isolées et donnent ainsi naissance à une grande diversité de situations. La simplification du système actuel et la mise en cohérence de l'ensemble de ces activités s'inscrivent dans un processus long mais nécessaire afin de mettre fin au manque de fiabilité et de transparence dont souffre l'administration foncière brésilienne. Par conséquent, il est nécessaire de

favoriser les actions permettant la constitution progressive d'un cadastre standardisé principalement autour de trois points :

- L'acquisition de données spatiales précises et cohérentes sur l'ensemble du territoire ;
- La standardisation des systèmes de gestion cadastraux ;
- La standardisation des données cadastrales.

■ L'acquisition des données spatiales

Le réseau géodésique brésilien actuel ne permet pas l'acquisition d'une information spatiale précise sur l'ensemble du territoire. La densification de ce réseau est donc une activité devant être considérée en amont de toute évolution et comme un pas fondamental vers la définition d'un cadastre standardisé. L'Association Brésilienne des Normes Techniques (ABNT) a déjà défini la norme NBR 14.116 en vue de la constitution de réseaux géodésiques municipaux. Cependant leur réalisation se heurte à l'inégalité des capacités financières municipales. De plus, les bénéfices d'un tel projet étant indirects et à moyen ou long terme, il n'est pas considéré comme une priorité pour les responsables locaux.

Une solution consisterait à procéder à la densification hiérarchique et progressive du réseau fédéral existant. L'établissement d'un premier niveau de densification pourrait être obtenu grâce à la constitution systématique de réseaux d'Etat. Ensuite, autour de cette structure, un deuxième niveau de densification serait progressivement formé par la création des réseaux municipaux.

La réalisation de ce projet nécessite dans un premier temps le renforcement des capacités techniques, financières et humaines des organes d'Etat de la Terre qui auraient à charge la réalisation du réseau d'Etat. Les bénéfices d'une telle évolution se rencontreraient à tous les niveaux de l'administration brésilienne. Par exemple, outre le respect des nouvelles exigences de géoréférencement de l'INCRA, il participerait au processus d'enregistrement des terres publiques actuellement paralysé ou réalisé très lentement.

■ Les systèmes de gestion cadastraux

La gestion du cadastre rural étant une responsabilité fédérale, elle possède aujourd'hui un cadre légal et organisationnel cohérent sur l'ensemble du territoire. Le principal problème de l'INCRA reste sa difficulté à offrir des informations fiables. Un pas a été franchi en 2001 avec l'exigence de plans géoréférencés, cependant aucune mesure ne se réfère à l'organisation même de ces données. Leur intégration au sein d'un système national, ainsi que leur association systématique aux références des actes juridiques, constitueraient pourtant un réel gain pour l'administration foncière en termes de fiabilité et de cohérence.

A Paranaguá, tout comme dans de nombreuses municipalités, la gestion du cadastre urbain se heurte au manque de capacités humaines, financières et techniques. Les levés étant souvent réalisés par un personnel mal formé et mal équipé, les données récoltées sont imprécises. Une évolution méritant d'être considérée serait la création d'une structure indépendante dont les activités seraient entièrement dédiées aux opérations de levés. Par exemple, en s'inspirant du modèle allemand, son organisation pourrait se baser sur l'établissement de bureaux du cadastre où le géomètre-expert conférerait une reconnaissance publique aux documents assignés. Ces bureaux agiraient parallèlement aux registres immobiliers et aux préfectures, comme organes indépendants et complémentaires. Une fois de plus, une telle évolution passe par la définition d'une législation fédérale permettant la définition de directives générales.

Aussi bien du point de vue de la gestion que de la diffusion de l'information, le passage au format numérique est une étape clef. Cependant, afin de s'accompagner de réels gains, il doit être suffisamment pensé, ce qui n'a pas toujours été le cas dans les municipalités. Il est donc nécessaire d'encadrer le processus d'informatisation du cadastre à l'aide de normes et standards.

Enfin, le renforcement du système actuel passe par la définition et la

■ ■ ■ systématisation des échanges d'informations entre les responsables du cadastre et le registre immobilier. La gestion isolée de ces systèmes doit laisser place à une gestion concertée. Les expériences de certaines municipalités du Brésil telles que São Paulo, Santo André et Guarapuava, montrent que cette évolution est possible, qu'elle s'accompagne d'un allègement du fonctionnement et par conséquent d'une amélioration des services offerts aux utilisateurs.

Synthétisant la vision du système cadastral brésilien du futur, pourrait être reconsidérée la proposition, déjà soutenue en 1979 par Silva, de constituer un cadastre métropolitain. Basé sur l'association du Cadastre et du Registre Immobilier, il constituerait la base d'un système d'informations territoriales offrant une information géométrique et légale fiable et actualisée.

■ Standardisation des données cadastrales

Il n'existe aujourd'hui aucun modèle de référence pour l'organisation des bases de données cartographiques municipales. Cette lacune est un facteur favorisant l'hétérogénéité des situations et doit donc être comblée en vue de l'établissement d'un cadastre standardisé. Au-delà d'un support pour la structuration des bases de données cadastrales municipales, un tel document permettrait d'identifier les liens devant être observés entre les différents acteurs du cadastre. Ce modèle contiendrait un contenu minimal pouvant être défini comme associant :

- Informations géométriques : délimitation spatiale des parcelles et bâtiments ;
- Informations légales : identification du propriétaire, des droits et des obligations ;
- Informations descriptives : type d'utilisation, nature de la construction, etc.

Conclusion

Malgré l'existence d'intérêts communs unissant les acteurs du Cadastre brésilien, leur isolement est à l'origine de l'établissement d'une multitude de bases de données isolées. Engendrant

la duplication de l'information et incapable d'en assurer la cohérence, ce système est avant tout coûteux et ne garantit pas la fiabilité des informations.

Les récentes initiatives fédérales, le Statut de la Ville et le Cadastre National des Immeubles Ruraux, offrent un contexte favorable à un processus progressif de réforme de l'administration foncière brésilienne. Cependant, la définition de directives nationales reste indispensable afin d'inciter et d'orienter les initiatives issues des sphères décisionnelles inférieures. Les initiatives régionales et locales sont elles aussi fondamentales afin de prendre en compte la diversité des situations.

Les décisions futures doivent permettre la mise en cohérence des activités cadastrales en favorisant les échanges et la concertation. De plus, elles doivent s'accompagner du développement de capacités cadastrales aux différents niveaux de la sphère décisionnelle afin d'établir un réseau d'acteurs actifs, capables d'identifier les dysfonctionnements mais aussi de les résoudre. ●

Remerciements

Au Coursus de Pós-graduation en Sciences Géodésiques de Université Fédérale du Paraná – Curitiba, PR, Brésil – à la Préfecture Municipale de Paranaguá - PR, Brésil – au Ministère des Affaires Etrangères Français.

Contacts

Camille BOURGUIGNON, Université Fédérale du Paraná/Paris 1 Panthéon Sorbonne, cbourguignon@hotmail.com

Andrea F. TENÓRIO CARNEIRO, Université Fédérale du Pernambouco, aftc@ufpe.br

Alzir Felipe B. ANTUNES, Université Fédérale du Paraná, felipe@ufpr.br

Références

CARDIM, Silvia et al. *Análise da Estrutura Fundiária Brasileira*. In COBRAC. Anais. Florianópolis. 2003.

CARNEIRO, AFT *Cadastro Imobiliário e Registro de Imóveis Rurais*. Sergio Fabris editor. Porto Alegre 2003.

Constitution Fédérale de 1988.

KAUFMANN, J. et STEUDLER, D. *Cadastre 2014: Vision for future Cadastral System: FIG - Working group commission*. 1998.

INCRA - Livro Branco

Loi Fédérale n° 4.504 du 30 novembre 1964 - Estatuto da Terra.

Loi fédérale n° 10.257 du 10 juillet 2001 - Estatuto da Cidade.

MAGALHÃES Juraci Perez. "A propriedade territorial no Brasil e as terras do Distrito Federal". Rio de Janeiro: América Jurídica, 2003. 112p.

Sílvia Elisabeth DE C. S. CARDIM, Paulo DE TARSO LOGUERCIÓ VIEIRA, José Leopoldo RIBEIRO VIEGAS, "Análise da Estrutura Fundiária Brasileira", 1999, Rapport de Département d'Etudes Statistiques de l'INCRA.

SILVA, T. *Conceito de Cadastro Metropolitano*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. 1979.

ABSTRACT

KEY WORDS: Urban and rural cadastre, land tenure information, Municipalities, Brazil

This paper describes the current state of the Brazilian cadastral system. Brazil has approximately 5500 municipalities with different cadastral realities. However, many of them share similar problems such as the lack of a good spatial reference framework or the inability to maintain up to date land tenure information and, more broadly, cartographic databases. Lately, a study carried out in the coastal area of the State of Paraná, South Brazil, confirmed that municipalities lack reliable cadastral databases. This deficiency within the municipal land administration affects their capacity to address serious urban, social and environmental problems. Three recent laws, the "Fiscal Responsibility Law", the "Public Land Registry System" and the "City Statute", show a strong governmental will to improve the present cadastral system and consequently bring new perspectives. This study proposes the fundamental elements that should be considered when building a cadastral system which could be used in aligning Brazilian land policies to a sustainable development agenda.

Naviguer dans le monde sans fil

Un aperçu de l'influence exercée par la technologie sans fil sur les topographes

■ Nathan PUGH - Carl THOMPSON - Daniel WALLACE

Sans fil ? Libre de tout câble ? Cellulaire ? Wi-fi ? Bluetooth ? De quoi s'agit-il exactement ? Quel en est l'effet sur les topographes ? Et comment ceux-ci peuvent-ils se préparer au monde sans fil ? Accompagnez-nous quelques instants dans un monde libre de tout câble et forgez-vous votre propre opinion. Gageons que vous ne souhaiterez pas en revenir ensuite aux câbles et autres équipements encombrants.

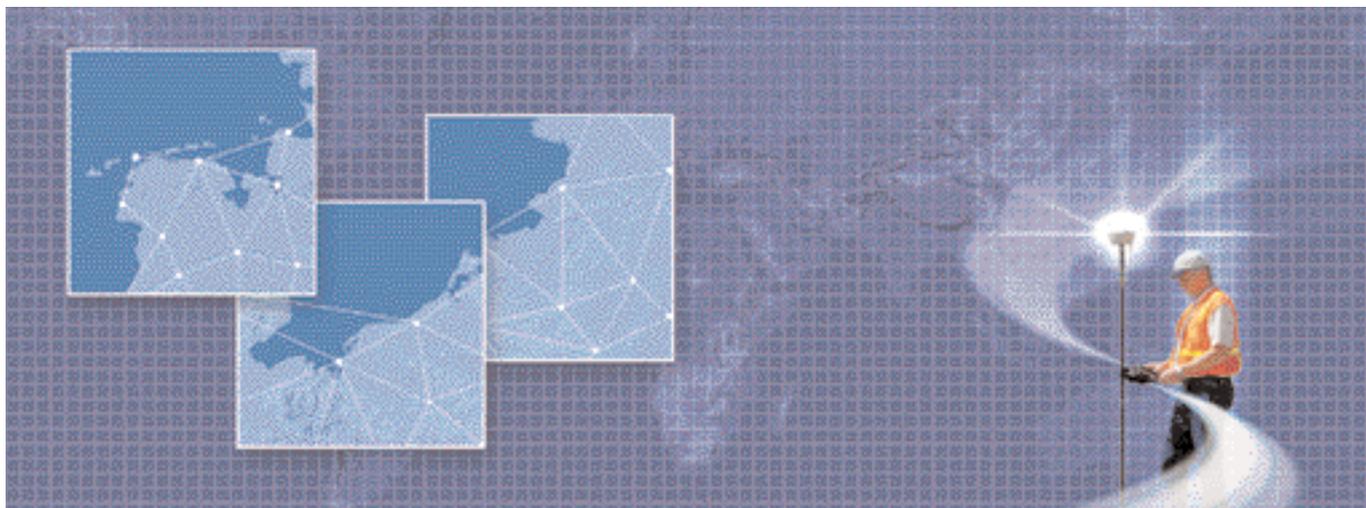
Aujourd'hui, les câbles de liaison aux équipements topographiques (ou autres) sont en passe de devenir les témoins d'une époque révolue. Comme toute avancée technologique, les liaisons sans fil sont sources de nombreux avantages pour les topographes dont une plus grande simplicité, un surcroît d'efficacité et une productivité accrue sur le chantier. Dorénavant, un géomètre peut emporter un équipement GPS sur le terrain sans pratiquement s'encombrer du moindre câble pour connecter le récepteur à l'enregistreur de données. Les mobiles GPS peuvent recevoir des données émises sur de longues distances par une station de référence GPS en utilisant un téléphone portable, sans faire intervenir aucun câble. Et les technologies d'infrastructure de pointe permettent désormais aux géomètres d'allonger cette distance tout en réduisant significativement l'influence de leur pire ennemi lorsqu'ils travaillent en RTK : l'erreur en ppm (parties par million). C'est un nouveau monde sans fil qui s'ouvre aux géomètres, riche de promesses pour eux.

Comment en est-on arrivé là ?

Des tambours et des signaux de fumée jusqu'à Internet et aux réseaux de communication sans fil actuels en passant par le télégraphe et le téléphone, les hommes ont inlassablement développé les moyens de communiquer entre eux sur de longues distances. Aujourd'hui, un nombre croissant de technologies de communication sans fil combine les avantages de la mobilité à ceux des réseaux filaires. La radio, le talkie-walkie, la téléphonie mobile, les services de type PCS (Personal Communication Services) et la technologie sans fil Bluetooth, de plus en plus utilisée, sont autant d'étapes sur la voie d'une communication plus efficace, affranchie des limites inhérentes aux liaisons filaires.

La communication sans fil utilise différentes fréquences radio :

- les radios émettant en modulation d'amplitude (MA) utilisent la bande hectométrique (530-1 700 kHz) ;
- les radios émettant en modulation de fréquence (MF) utilisent la bande métrique à très haute fréquence (VHF : 88-108 MHz) ;
- la plupart des radios utilisés en topographie émettent en ultra haute fréquence (UHF) dans la plage de 400 à 800 MHz ;
- les radios à spectre étalé utilisent trois bandes : celle de 902-928 MHz, celle de 2,4 GHz (bande ISM (Industrial, Scientific and Medical Devices) mondialement disponible) et celle de 5,7 GHz ;
- les téléphones portables utilisent la plage autour de 800 MHz et les PCS celle autour de 1900 MHz dans la bande UHF.



Les différentes bandes de fréquences présentent des avantages et des limitations qui se contrebalancent mutuellement. En effet, les fréquences les plus basses offrent aujourd'hui une portée supérieure aux fréquences élevées pour une communication de données efficace, mais elles sont plus sensibles aux interférences en raison de la densité plus forte des utilisateurs. En revanche, les largeurs de bandes sont supérieures aux fréquences élevées, d'où une transmission plus rapide des données, mais elles ne peuvent être utilisées que sur des portées plus courtes.

Le GPS est sans fil

Envisagé comme un service de radionavigation basé sur des satellites émetteurs, le GPS a d'emblée bénéficié du soutien appuyé des géomètres. Les premiers satellites GPS ont été lancés en 1978 et la constellation actuelle en comprend 28. Chaque satellite émet deux signaux radio, baptisés L1 et L2, parcourant près de 20200 kilomètres dans l'espace avant d'atteindre notre planète. Ces signaux intègrent des codes pseudo-aléatoires permettant aux récepteurs GPS de poursuivre simultanément des signaux différents et de délivrer, après calcul, des informations de position précises en tout point du globe et à tout moment.

Les signaux GPS actuels sont émis à des fréquences de 1575,42 MHz (L1) et de 1227,6 MHz (L2). Le programme de modernisation du GPS élaboré par le ministère de la défense des Etats-Unis (DOD) prévoit l'introduction de deux nouveaux signaux civils (et de deux nouvelles fréquences) dans un avenir proche. Le signal L2C, dont la mise en service devrait s'effectuer durant les douze prochains mois, sera radiodiffusé à un niveau d'intensité supérieur à celui de L2; le nouveau signal L5, émis à la fréquence de 1176,45 MHz, devrait être disponible en 2006 et délivrer une intensité d'un niveau supérieur à celle des autres signaux.

Le GPS constitue peut-être la technologie sans fil suprême pour les topographes, leur fournissant une précision et des possibilités d'application inimaginables il y a vingt ans encore. En fait, de nombreuses technologies sans fil "terrestres" sont utilisées en conjonction avec le GPS à base spatiale pour proposer des solutions topographiques allant du lever exécutable par une personne seule aux réseaux de stations de référence GPS de grande ampleur.

Des radios syntonisées

A ses débuts, au tournant du XX^e siècle, la radio était envisagée comme un télégraphe sans fil, assurant des liaisons de point à point impossibles à établir par des lignes usuelles. Son véritable essor est venu de sa capacité à diffuser simultanément des messages dans de multiples directions, d'abord en code télégraphique puis en mode audio.

Aujourd'hui, les topographes utilisent couramment des radios UHF et à spectre étalé pour des communications sans fil. Les radios UHF avec des fréquences allouées dans la bande de 400 à 800 MHz offrent une plus grande puissance et une portée supérieure aux radios à spectre étalé. Dans la plupart des pays, Etats-Unis inclus, les utilisateurs de radios UHF doivent obtenir une licence pour la fréquence qu'ils utilisent dans leur zone de travail.

Wi-fi

Les cafés et les salons des aéroports sont devenus de nouveaux bureaux. Grâce aux "Hotspots Wi-fi", Internet a délaissé nos bureaux ou nos domiciles pour des lieux plus inattendus comme la plage ou pourquoi pas, les camps de base de l'Everest ! Les analystes estiment que le nombre de "Hotspots" publics en Europe devrait dépasser 70 000 en 2008. Certains géomètres recourent déjà au GPRS, permettant l'accès à la messagerie électronique et à Internet par téléphone, tout en restant connecté en permanence sur le terrain. Dans un avenir désormais proche, l'UMTS (services de troisième génération ou 3G) verra l'avènement de nouvelles technologies de communication proposées par des opérateurs GSM à très haut débit.

Les radios à spectre étalé émettent sur trois bandes de fréquences : 902-928 MHz - 2,4 GHz et 5,7 GHz. Aucune licence n'est requise pour les radios à spectre étalé utilisant ces bandes de fréquences. Elles présentent aussi une consommation électrique plus faible et proposent des vitesses de transmission plus élevées que les radios UHF, leur portée étant toutefois moindre. Au lieu d'utiliser un canal fixe, les signaux à spectre étalé "sautent" au sein d'une gamme de fréquence étendue. Les radios émettrice et réceptrice synchronisent parfaitement leurs sauts de fréquences, générant des communications fiables au sein d'une gamme de fréquences étendue.

Et le portable arriva

Bien qu'elle n'ait fait son apparition qu'assez récemment dans le monde sans fil, la technologie du téléphone cellulaire en est déjà à sa quatrième génération, chacune plus rapide et plus performante que la précédente. Et le meilleur est à venir. La première génération, baptisée 1G, fondée sur la technologie cellulaire analogique ou AMPS (Advanced Mobile Phone System), s'est développée dans les années 1980.

La génération suivante, 2G, a vu l'avènement de la technologie numérique pour les communications vocales en téléphonie mobile. Apparue dans les années 1990, elle continue à être utilisée aujourd'hui. Les réseaux analogiques et numériques peuvent utiliser l'une des normes suivantes : GSM (Global System for Mobile Communication), CDMA (Code-Division Multiple Access) ou TDMA (Time-Division Multiple Access). A la technologie 2G succéda celle dite "2.5G" vers la fin des années 1990, permettant aux utilisateurs de transférer des données via un réseau sans fil en recourant à la méthode de la commutation de paquets (cf. encadré). La version 2.5G du GSM est le GPRS (General Packet Radio Service) et celle de CDMA est CDMA2000 1xRTT. La technologie 2.5G permet aux utilisateurs d'accéder à Internet via leur téléphone portable. La technologie 3G, actuellement testée sur des marchés pilotes et progressivement généralisée, propose même des vitesses de transmission plus élevées; elle devrait faciliter l'accès sur le terrain à des jeux de données d'une certaine ampleur, jusqu'alors réservés au bureau, via une connexion sans fil à Internet.

Le sans fil et Bluetooth

Au cours des deux dernières années, la technologie Bluetooth a gagné en popularité en permettant des connexions auto-

matiques sans fil à courte portée entre des composants numériques. Une norme ouverte d'avant-garde, Bluetooth, utilise la bande de fréquences ISM (compatibilité mondiale) pour rendre possible un transfert de données sans fil entre des équipements distants de moins de 10 mètres.

Les appareils Bluetooth sont des mini-émetteurs/récepteurs radio à courte portée. Plus qu'une simple solution radio, Bluetooth permet à des équipements de se détecter mutuellement et de communiquer sans intervention de l'utilisateur. Lorsque deux appareils Bluetooth parviennent à portée l'un de l'autre, ils se détectent automatiquement et engagent une "conversation" afin de déterminer s'ils sont configurés pour communiquer ensemble. Si c'est le cas, ils établissent un "piconet" (picoréseau) ou réseau personnel (PAN, personal area network). En l'espace de quelques secondes, ils sont en mesure de transférer des données à grande vitesse en utilisant un protocole de réseau, en l'absence de tout câble. Le PAN ne peut inclure que deux appareils; il peut également s'agir d'un réseau similaire à un réseau local (LAN, local area network) entre ordinateurs de bureau, mais à une échelle plus réduite, "personnelle". Et parce que Bluetooth utilise la technologie du saut de fréquences sur un spectre étalé, plusieurs équipements Bluetooth communiquant via des piconets différents peuvent évoluer dans une même zone sans interférer les uns avec les autres.

Tout cela est très positif pour les topographes qui peuvent faire leur choix parmi un large éventail de méthodes de communication sans fil, suivant le type d'application et la zone concernés. Qu'ils recourent à des instruments optiques ou à des systèmes GPS, les géomètres peuvent profiter des avantages qu'offrent les technologies proposées (radio, téléphonie mobile, Bluetooth) et rendre le transfert de données plus rapide, plus simple, plus rentable et potentiellement libre de tout câble. Voyons à présent comment les équipements topographiques en sont parvenus à ce stade.

Vers la topographie sans fil

Dans les années 1990, les instruments optiques de topographie ont commencé à utiliser la technologie radio sans fil pour permettre à différents composants d'un système de communiquer entre eux. Le premier équipement de topographie au monde utilisable par une seule personne, présenté en 1990, intégrait une liaison sans fil pour la transmission de données en temps réel entre l'instrument robotisé et le prisme. Cette liaison recourait à un modem radio permettant au géomètre de contrôler l'instrument et la saisie de données depuis le prisme.

En 1993, le GPS a été combiné à une liaison radio pour la transmission de données, dans le cadre du développement du premier système topographique GPS de type RTK (Real-Time Kinematic, cinématique en temps réel) au monde. L'introduction du RTK fit faire un bond énorme à la productivité en topographie, permettant aux géomètres d'atteindre une précision centimétrique sur le terrain et éliminant la nécessité de procéder à un post-traitement des données GPS. Le RTK recourt à une liaison en temps réel pour la transmission des données de correction GPS; le mobile accède aux données

Que peut cacher un nom ? Bluetooth

Si Bluetooth est une technologie d'avant-garde, le nom qui la désigne est vieux, lui, de plus d'un millénaire. Selon la légende, le roi du Danemark Harald Blatand (traduit par "Bluetooth" en anglais, soit "Dent bleue") rêvait d'unifier les contrées scandinaves et d'apporter la paix à cette région instable au X^e siècle. Et apparemment, ses dents n'étaient même pas bleues : son nom fait référence à la teinte sombre de sa chevelure, si noire qu'elle en semblait presque bleue - tranchant singulièrement avec la blondeur scandinave. Mille ans plus tard, l'entreprise suédoise Ericsson a choisi ce nom pour une nouvelle technologie visant à unifier les technologies de substitution aux câbles, à l'instar de Blatand, autrefois si désireux d'unifier la Scandinavie. C'est donc une page d'histoire qui se cache derrière ce nom.

émises par une station de référence via une liaison de données radio sans fil. Révolutionnaires lors de leur commercialisation, les systèmes initiaux nécessitaient jusqu'à six câbles différents pour relier entre eux les divers composants du mobile GPS.

En 1997, les solutions GPS RTK ne requéraient déjà plus qu'un seul câble. La première solution RTK "tout sur canne" comprenait un récepteur GPS intégré, une antenne GPS et un modem radio UHF; un seul câble reliait l'instrument à l'enregistreur de données. Grâce aux progrès accomplis par les technologies sans fil et topographique, l'équipement s'est peu à peu rapproché de l'objectif final, être dénué de tout câble. Les infrastructures de téléphonie mobile s'étant étendues au monde entier et les coûts afférents ayant décliné, nombreux sont les géomètres à avoir troqué la radio classique pour le téléphone portable comme lien sans fil. Plus compact et plus léger qu'un modem radio, ce dernier est en mesure de transmettre des données sur de longues distances, aussi longtemps que l'utilisateur reste dans les limites du réseau cellulaire. Cette technologie permet aussi aux topographes d'utiliser leurs téléphones portables pour se connecter à Internet. Et les contraintes en matière de licence et d'attribution de canaux pesant sur les radios classiques ne s'appliquent pas à eux.

La technologie Bluetooth a été introduite en 2002 sur les équipements topographiques, permettant aux géomètres d'utiliser une solution "tout sur canne" pour recevoir des corrections RTK en recourant à la technologie cellulaire et en s'affranchissant de tout câble. Ces mobiles RTK de pointe comprennent un récepteur GPS intégré, une antenne, une batterie et la technologie sans fil Bluetooth. Non seulement tout risque de s'empêtrer dans les câbles sur le terrain est dorénavant écarté, mais les utilisateurs peuvent aussi commander un instrument à distance dans un rayon d'environ 10 mètres. Bluetooth permet également à des utilisateurs de partager des données avec d'autres géomètres sur le terrain tout en poursuivant leur propre travail depuis le récepteur GPS. Et puisque Bluetooth est en mesure de connecter sans fil des utilisateurs à des téléphones portables, les géomètres peuvent se connecter sans fil à Internet pour envoyer et recevoir des fichiers de données à partir du bureau ou accéder à des sites de données topographiques.

■ ■ ■ Créer un monde topographique en réseau

La croissance incessante des infrastructures GPS mises en place dans le monde entier constitue la meilleure preuve des avantages que procure la technologie sans fil aux géomètres. Ces réseaux de stations de référence peuvent utiliser les possibilités offertes par tous les modes de communication sans fil (GPS, radio, téléphonie mobile et Bluetooth) pour proposer un large éventail d'options aux géomètres. Les réseaux de stations de référence GPS permettent aux topographes recourant à des mobiles GPS RTK d'accéder à des corrections RTK sans avoir à investir dans l'achat d'une station de référence, ce qui réduit d'autant le coût de leur équipement GPS. Et les possibilités des réseaux sont encore plus étendues si l'on y adjoint des logiciels performants.

En RTK classique, la précision et les performances décroissent à mesure que l'utilisateur s'éloigne d'une station de référence, en raison des influences exercées par l'ionosphère et la troposphère (généralement appelées l'erreur en ppm). Avec un réseau de stations de référence GPS et un logiciel délivrant une solution pleinement modélisée, l'utilisateur se connecte au système via une liaison sans fil. Le logiciel prend alors acte de sa position et lui permet de travailler comme si une station de référence - virtuelle - se trouvait à son voisinage immédiat. La conséquence en est que l'erreur en ppm est éliminée ou considérablement réduite, de sorte que les géomètres peuvent opérer à très grande distance des stations de référence physiques. Trimble a baptisé cette solution du nom de VRS (Virtual Reference Station, station de référence virtuelle); grâce à elle, les utilisateurs peuvent obtenir des précisions de niveau RTK sur des distances bien plus longues avec moins de stations de référence. Les utilisateurs peuvent également récupérer, via Internet, des données de correction GPS, stockées sur le site d'un centre de contrôle, en vue d'un post-traitement.

Certains réseaux de stations de référence GPS recourent à la technologie cellulaire en mode paquet, permettant aux administrateurs de réseaux GPS de fournir des corrections RTK via Internet tout en utilisant des protocoles de type AAA (*access, authentication and accounting*) intégrés pour savoir qui accède à leur système et à quelle fréquence. Sur le terrain, les utilisateurs accèdent alors aux données de correction RTK via un téléphone portable connecté à un mobile GPS. Et le protocole Internet signifie que les utilisateurs n'ont pas besoin d'être dans les limites de la portée de la radio comme ils le doivent dans le cas d'un émetteur radio RTK classique.

Dans le futur, les réseaux de stations de référence GPS étendus pourraient devenir, à l'image des réseaux cellulaires actuels, l'infrastructure fournissant les possibilités de topographie RTK aux géomètres, où qu'ils se trouvent sur la planète. Imaginez un monde dans lequel les géomètres n'auraient qu'à se saisir de leur mobile "tout en un" doté de la technologie Bluetooth, se rendre en n'importe quel point du globe et se connecter à un réseau de référence RTK puis à Internet via un téléphone portable: ni câbles ni station de référence supplémentaire. Où que l'on soit, il suffirait de se connecter pour se mettre au travail.

Le monde sans fil actuel a considérablement évolué par rapport à celui que connaissaient les géomètres voilà quelques décennies. Et les possibilités offertes par la communication sans fil procurent de sérieux avantages aux topographes: un surcroît d'efficacité, une productivité en hausse et une rentabilité accrue. Pour le géomètre, le monde sans fil est synonyme de nouvelles possibilités illimitées et potentiellement, de travaux topographiques ininterrompus. N'est-il pas riche de promesses?

Pourquoi en mode paquet ?

Jusqu'à la fin des années 1990, tous les réseaux de télécommunication utilisaient prioritairement la technologie de la commutation de circuits. Autrement dit, chaque appel créait un chemin, ou circuit, qui réservait un canal entre deux parties pour la durée de l'appel. Aujourd'hui, la commutation de paquets est en passe de devenir la norme en matière de communication de données, fournissant une méthode plus rentable pour la transmission de données via la technologie cellulaire. Avec la commutation de paquets, chaque appel envoie ses "paquets" de données sur tout circuit disponible et les réassemble dans l'ordre adéquat à destination. Des paquets d'autres appels utilisent les mêmes circuits, maximisant l'utilisation de la largeur de bande disponible. Les technologies CDPD (Cellular Digital Packet Data), GPRS, CDMA2000, Bluetooth (décrite ci-dessous) et 3G utilisent toutes la commutation de paquets. ●

Comité de rédaction : Nathan Pugh, Carl Thompson, Daniel Wallace - Trimble Rockies- Westminster USA.

Contact : Bernard Griesmar - Trimble France SAS
Tél. : 01 71 34 30 00
bernard_griesmar@trimble.com

ABSTRACT

Wireless? Cable-free? Cellular? Bluetooth? What is all this? How does it impact the surveyor? And how can a surveyor be prepared for the wireless world? Travel with us to a world without cables and judge for yourself. You may never return to cables, cords and bulky equipment again. Today, cables attached to surveying (and other) equipment are fast becoming a thing of the past. Like other technological advances, cable-free capabilities offer benefits for surveyors including fewer complications, less fuss, and greater efficiency and productivity on the job. Now, a surveyor can take a Global Positioning System (GPS) surveying unit in the field with virtually no cables connecting the receiver and data controller. GPS rovers can receive data from a GPS reference station over long distances using a cell phone and no cables. And leading infrastructure technology now allows surveyors to increase that distance while significantly reducing the RTK GPS surveyor's classical worst enemy: the PPM (parts per million) error. It's a new wireless world--and surveyors are embracing it.

Le métrologue et le topomètre

■ Alain MARTIN-RABAUD

Confronté depuis des années à l'intervention en milieu industriel avec des moyens issus de la géodésie, il m'a semblé intéressant d'avancer des explications au paradoxe suivant : comment, à partir d'une démarche qui semble les opposer, le métrologue et le topomètre peuvent-ils garantir et obtenir un niveau de fiabilité de leurs mesures aussi proche ? Nous tenterons dans cet article de mieux comprendre ces approches et d'en tirer quelques conclusions simples.

■ mots clés

métrologie, topométrie, fiabilité, incertitude, cahier des charges, mesure 3D

Quelques définitions

En consultant un dictionnaire, on découvre que la métrologie est la "science de la mesure". Peut-on se contenter de cette définition, très concise et donc forcément peu compréhensible.

Aimé Defix, professeur de métrologie à l'École Supérieure de Métrologie, définissait la métrologie comme étant "la recherche infinie d'une vérité insaisissable". Cette définition a l'avantage d'être très réaliste puisque le métrologue ne peut connaître avec certitude quelle est la valeur vraie de la grandeur qu'il mesure.

■ Deux citations permettent de préciser dans quel contexte se situe le travail du métrologue :

"Mesurer, c'est comparer une grandeur physique inconnue avec une grandeur de même nature prise comme référence, à l'aide d'un instrument. C'est exprimer le résultat de cette comparaison à l'aide d'une valeur numérique, associée à une unité qui rappelle la nature de la référence, et assortie d'une incertitude qui dépend à la fois des qualités de l'expérience effectuée et de la connaissance que l'on a de la référence et de ses conditions d'utilisation.

Les méthodes et conventions qui régissent la définition, l'évaluation et l'expression des résultats de mesure, unités et incertitudes sont partie intégrante du langage commun, à vocation universelle, de la métrologie"⁽¹⁾

"Chacun reçoit ou transmet quotidiennement des résultats de mesures : l'heure, la température extérieure, la vitesse de la voiture, le bruit dans la ville, l'indice de la qualité de l'air, etc. Tous ces chiffres donnent une impression de certitude, et pourtant aucune mesure n'est rigoureusement exacte. La métrologie propose les méthodes et les moyens d'y voir plus clair. Dans une société technologique, maîtriser la mesure est essentiel. Dans une société de communication, comprendre la mesure est fondamental. Dans une société de plus en plus concurrentielle, réglementer par la mesure est devenu vital."⁽²⁾

La référence du métrologue doit être le Vocabulaire International de la Métrologie (VIM)⁽³⁾. On y trouve la définition des différents termes utilisés dans ce métier : mesurage, mesurande, exactitude d'un instrument, répétabilité et reproductibilité d'une mesure, calibrage, ajustage, réglage, étalonnage, résolution, justesse, fidélité.

Curieusement pour le néophyte, le terme de précision y est banni, parce qu'il n'est pas assez... précis pour différencier l'exactitude d'un instrument, l'incertitude d'un mesurage ou la résolution d'un afficheur... De ce fait, nous n'utiliserons plus ce mot dans la suite de cet article.

■ La topométrie semble un mot moins courant. En voici deux définitions :

"Ensemble des travaux effectués pour procéder aux relevés métriques nécessaires à l'établissement d'une carte."⁽⁴⁾

"La topométrie :

- 1. phase d'un lever topographique ou d'une implantation qui fournit ou utilise les valeurs numériques de tous les éléments planimétriques et altimétriques*
- 2. technique de lever ou d'implantation à grande ou très grande échelle"⁽⁵⁾*

Mais les lecteurs de XYZ sont certainement plus coutumiers de ce terme que de la métrologie.

Approche métrologique d'une prestation de mesure

La difficulté d'une prestation de mesure se situe au niveau de la maîtrise de l'ensemble des éléments qui permettent de garantir en même temps une réponse pertinente au besoin du prescripteur de la mesure et le niveau d'incertitude requis.

L'approche métrologique de la mesure doit idéalement s'appuyer sur la norme NF EN ISO 9001:2000. Nous en décrivons ici une version plus personnelle, mais réaliste puisque fondée sur une pratique régulière depuis de nombreuses années. ■■■

(1) Marc Himbert du CNAM.

(2) *Quelle place pour la métrologie en France à l'aube du XX^e siècle ?*, Rapport commun Académie des sciences-CADAS, Avril 1996.

(3) Vocabulaire International de la Métrologie, intégré dans la norme NFX 07-001 de 1994

(4) Institut de topométrie (Topogr. 1980)

(5) Lexique topographique de l'AFT (1991)

■ ■ ■ Une prestation de mesure débute par la rédaction d'un **cahier des charges**, effectuée logiquement par le prescripteur des mesures.

Ce cahier des charges doit être rédigé en indiquant prioritairement les fonctions à assurer et les contraintes. Les fonctions concernent bien évidemment la définition de ce qui est à mesurer ou à régler : en effet, la plupart du temps, une prestation de mesure n'a pas pour finalité d'éditer un tableau de résultats, mais elle sert à qualifier un appareil (prestation de contrôle) ou à donner des valeurs qui seront utilisées pour modifier l'appareil (prestation de réglage).

De ce fait, le prescripteur de la mesure doit préciser les critères d'acceptation de la mesure, exprimés sous différentes formes : incertitude sur les éléments à mesurer, tolérance sur la cote fonctionnelle ou le positionnement...

Les critères qu'il définira dans ce cahier des charges lui serviront à déclarer la conformité du résultat de la mesure. On voit ici l'importance, tant pour le prescripteur que pour le métrologue de définir ces critères de manière acceptable pour tous. Le contrat passé ensuite entre les deux parties sera validé par le respect de ces critères. D'une manière générale, le besoin exprimé par le prescripteur est rare-

ment suffisant pour celui qui réalise la mesure : il est très souvent nécessaire d'éclaircir un grand nombre de points que le métrologue doit obtenir soit en demandant des informations complémentaires au prescripteur, soit en analysant lui-même le travail à réaliser. La compréhension de ce cahier des charges se traduit donc par une **spécification de mesure**.

Que doit-elle contenir? Bien évidemment, c'est le document de réponse du cahier des charges, donc il s'agit d'un document démontrant la bonne interprétation du problème posé, collectant toutes les informations supplémentaires acquises pendant l'analyse du cahier des charges et donnant celles relatives aux instruments utilisés (type, exactitude, étalonnage), à la démarche de mesure utilisée (séquencement des opérations) et à la partie planification (c'est particulièrement essentiel si la mesure intervient dans un cycle de travaux ou de production, afin que le prescripteur puisse s'assurer de l'absence de gêne dans les travaux de mesure par des obstacles, des appareils générant des vibrations...).

Elle doit bien entendu contenir tous les points de contrôle qui permettront à l'opérateur et/ou superviseur (souvent c'est la même personne) de garantir que

le résultat final sera atteint, tant en terme de capacité à l'obtenir qu'au respect des incertitudes visées. Cette justification s'appuiera sur un calcul d'incertitude prévisionnel qui prendra en compte les différents paramètres : les caractéristiques des instruments utilisés, les conditions de mesure (environnement, pièce...), la méthodologie employée pour aboutir aux caractéristiques calculées...

Il est essentiel que cette spécification soit soumise au prescripteur pour s'entendre sur le contenu de la prestation et ses attendus. C'est une réponse au cahier des charges qui permet, préalablement à la mesure, de vérifier que tous les éléments de base de la prestation ont bien été identifiés, que les méthodes proposées sont bien en conformité avec les attentes du prescripteur, que le déroulement de la prestation ne peut dégrader la qualité des résultats attendus...

Cette spécification peut servir ensuite de base au rapport de mesure final. Elle servira aussi à écrire les gammes de mesure, qui sont les fiches de travail que l'opérateur qui réalisera la mesure utilisera sur le terrain.

A partir de cette description de la méthodologie, comment le métrologue doit-il organiser son travail pour être en conformité avec cette démarche?

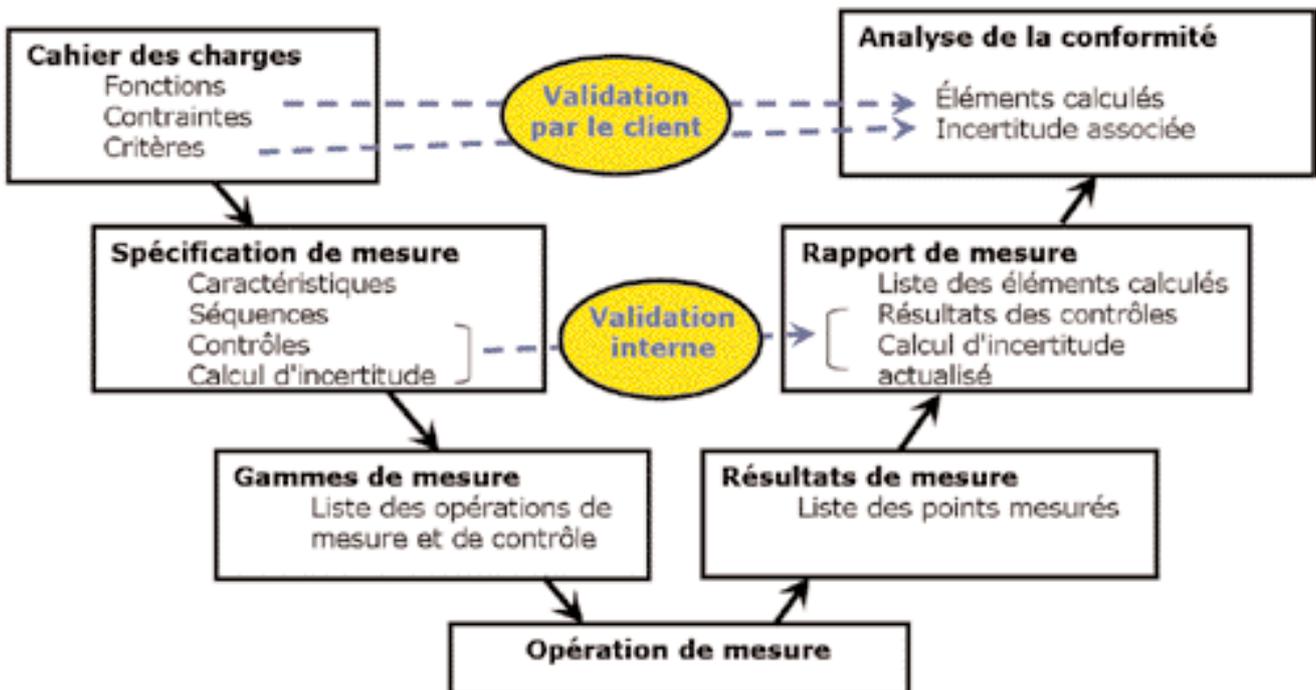


Figure 1 : schéma de la démarche métrologique d'une prestation de mesure

Il faut considérer les trois étapes de la prestation : la préparation, la prestation proprement dite et le rendu des résultats.

La préparation de la prestation de mesure

Le métrologue, après avoir identifié le besoin du prescripteur et s'être accordé avec lui sur la méthodologie, doit collecter tous les éléments nécessaires à la prestation :

- Établir le bilan prévisionnel d'incertitude (calcul d'incertitude) des éléments à déterminer (résultats des calculs et traitements des données) et en déduire les incertitudes nécessaires sur les points de mesure, les exigences sur les moyens de mesure et sur les outillages nécessaires, tous les points de contrôle qui permettront, pendant le déroulement de la prestation, de s'assurer que l'incertitude finale sera bien obtenue, les critères qui permettront de valider ces contrôles et d'envisager les actions correctives, dans le cas où ces critères ne sont pas respectés
- Définir précisément les moyens nécessaires et s'assurer qu'ils répondent aux exigences requises : exactitude des instruments de mesure, étalonnage et vérification si nécessaire
- Rédiger les gammes de mesure et de contrôle

La prestation de mesure proprement dite

Avec une telle préparation, il est évident que la prestation de mesure est très guidée et ne peut pas donner lieu à des dérives importantes, hormis bien entendu les imprévus inhérents à ce type d'activité. La démarche du métrologue a pour but de réduire le risque d'imprévus à un niveau le plus faible possible et si possible à proposer a priori des solutions à ces imprévus.

Cette démarche a pour avantage supplémentaire de permettre, tant au prestataire qu'au prescripteur, de connaître à tout moment le niveau d'incertitude réel de chaque étape et donc de réajuster le niveau d'incertitude final. Ceci

permet de vérifier que le niveau requis sera atteint en final et le plus souvent amélioré. Ensemble, si des contraintes supplémentaires apparaissent (les imprévus), ils pourront prendre la décision la plus adaptée en fonction des objectifs finaux.

Le rendu des résultats

Compte tenu du niveau de préparation, ce travail ne doit être qu'une collecte des données, le traitement de celles-ci pour obtenir les résultats attendus, une mise à jour du calcul d'incertitude et l'édition du rapport final.

Le prestataire mettra en évidence de cette manière la qualité obtenue et la conformité des résultats à l'attente initiale, tant sur l'aspect mesure que sur le niveau de l'incertitude obtenu.

En final, le prescripteur jugera ce compte rendu par rapport aux fonctions et aux exigences définies dans son cahier des charges initial.

On voit bien au travers de ce descriptif que le travail initial d'accord entre le prescripteur et le prestataire ainsi que la préparation de la mesure sont la clé de voûte de cette démarche.

■ Est-ce réaliste ? Peut-on imaginer s'en passer ?

Comme M. Jourdain faisait de la prose sans le savoir, la plupart des prestataires de mesure pratiquent cette démarche. A moins d'un amour immodéré pour l'improvisation et d'un certain goût du risque, chaque prestataire peut témoigner d'avoir recherché l'accord avec son prescripteur sur le contenu du cahier des charges, chaque prescripteur peut témoigner d'avoir écrit un cahier des charges, aussi réduit soit-il, en incluant autant les éléments qu'il souhaite obtenir (les fonctions), qu'en définissant les contraintes et les critères de satisfaction des résultats obtenus.

Évidemment, ces cahiers des charges ne sont pas toujours conformes aux normes en vigueur, bien entendu aussi, le prestataire omet souvent les aspects de justification des incertitudes, les points de contrôle... Mais chacun assure une grande partie de cette démarche.

Quelle est la différence entre l'approche du métrologue et celle du topomètre ?

Malgré de grandes similitudes, les deux concepts sont souvent opposés. Et pourtant personne ne doute du sérieux et du professionnalisme de ces deux métiers. Quelles sont alors les différences et faut-il les opposer ?

La topométrie repose sur une approche plus globale dans le sens où les méthodes pratiquées sont supposées établies et donc qualifiées par la pratique. Elle repose aussi sur le principe que l'instrument n'est pas exact et que c'est par une redondance des mesures, voire des moyens, que l'on peut s'assurer de la qualité du résultat.

De ce fait, l'approche d'une prestation de mesure est très différente au départ : le topomètre préférera augmenter le nombre de points de mesure, utiliser différents moyens de mesure, réaliser des répétibilités pour garantir en final l'incertitude recherchée. L'instrument n'étant pas considéré comme exempt d'imperfections, le topographe effectuera des opérations systématiques de double retournement sur les théodolites, par exemple, pour éliminer la majeure partie des défauts géométriques de l'appareil. Associer aux mesures issues des tachéomètres ou des relevés GPS des mesures de nivellement, des relevés au décamètre ou au distancemètre, par exemple, permet d'augmenter la fiabilité du résultat final, sans pour autant améliorer le niveau d'incertitude de la mesure élémentaire : le calcul global des mesures qui permet d'identifier les écarts sur les points et de décider de supprimer les données peu fiables ou sources d'erreur sur le modèle 3D final. De ce fait, la qualité du résultat final sera garantie par cette approche globale.

On voit ici des approches très différentes : le métrologue recherche a priori à garantir le résultat final, le topomètre se donne les moyens de garantir a posteriori ces résultats.

■ Pourquoi une telle différence ?

Le topomètre, issu du monde de la géodésie, travaille la plupart du temps sur

■ ■ ■ des activités qui ne se répètent pas, du fait que, même si la prestation est identique, la configuration locale est très différente: relever le profil d'une route est toujours identique, sauf que les routes ne sont jamais les mêmes, les appareils ne seront pas placés de la même manière, les points relevés seront différents...

Le métrologue, qui intervient la plupart du temps dans un processus de fabrication, se trouve confronté à des opérations répétitives où le principe de base, c'est de libérer très rapidement le produit contrôlé. De ce fait, il est important pour lui et pour son prescripteur, de réduire le temps entre le moment où la mesure a été réalisée et le résultat attendu (conformité du produit ou élément de réglage à fournir).

En résumé, en utilisant une métaphore, si un topomètre doit traverser une rivière à l'aide d'un pont en corde, il s'assurera que tous les éléments de sécurité (corde tendu au dessus du pont, par exemple) lui garantissent la traversée même si une ou des cordes se rompent. Le métrologue se donnera les moyens de garantir a priori qu'il arrivera à traverser sans encombre: de ce fait, il vérifiera la qualité des cordes, analysera la méthode... pour que les cordes ne se rompent pas.

Qui a raison, qui a tort? Personne évidemment. La raison nous conduit à penser que l'idéal se situe dans la combinaison de ces deux méthodes. Les contraintes financières et de délai (pas toujours raisonnables) montrent que pratiquer la totalité des deux méthodes n'est pas viable et donc les conditions du travail à réaliser vont imposer de trouver un compromis raisonnable entre ces deux méthodes.

Exemple du mesurage de voitures de tramway à l'aide d'un tachéomètre

Le problème posé par le prescripteur consiste à réaliser, en particulier, la mesure de la largeur des caisses des tramways destinés au marché australien. L'objectif final de cette mesure, non traité ici, est de garantir que, compte tenu des différentes contraintes (position des rails, tolérances de positionnement des boggies sur les rails, positionnement des boggies sur la caisse), les tramways lors des différents croisements, ne se percutent pas, dans toutes les configurations. De ce fait, le prescripteur impose au constructeur de la caisse de garantir une tolérance de largeur de caisse de ± 3 mm.



Figure 2 : mesure finale d'un CITADIS ALSTOM à l'aide d'un tachéomètre TDA 5005 LEICA, d'un prisme BAECHLER dia. 40 mm, d'une commande à distance infra-rouge et du logiciel Métride Dim Master

L'analyse de ce cahier des charges permet au constructeur, qui s'engage pour assurer la fonction de prestataire de mesure au sein de ses équipes de production, de choisir une méthode de relevé tridimensionnel par tachéomètre dont les caractéristiques élémentaires sont:

- Incertitude angulaire à $\pm 2,5 \mu\text{rad}$ ($0,15$ mgon) à 1 écart type selon la norme ISO 17123-3
- Incertitude en distance à $\pm 0,5$ mm à 1 écart type selon la norme ISO 17123-4

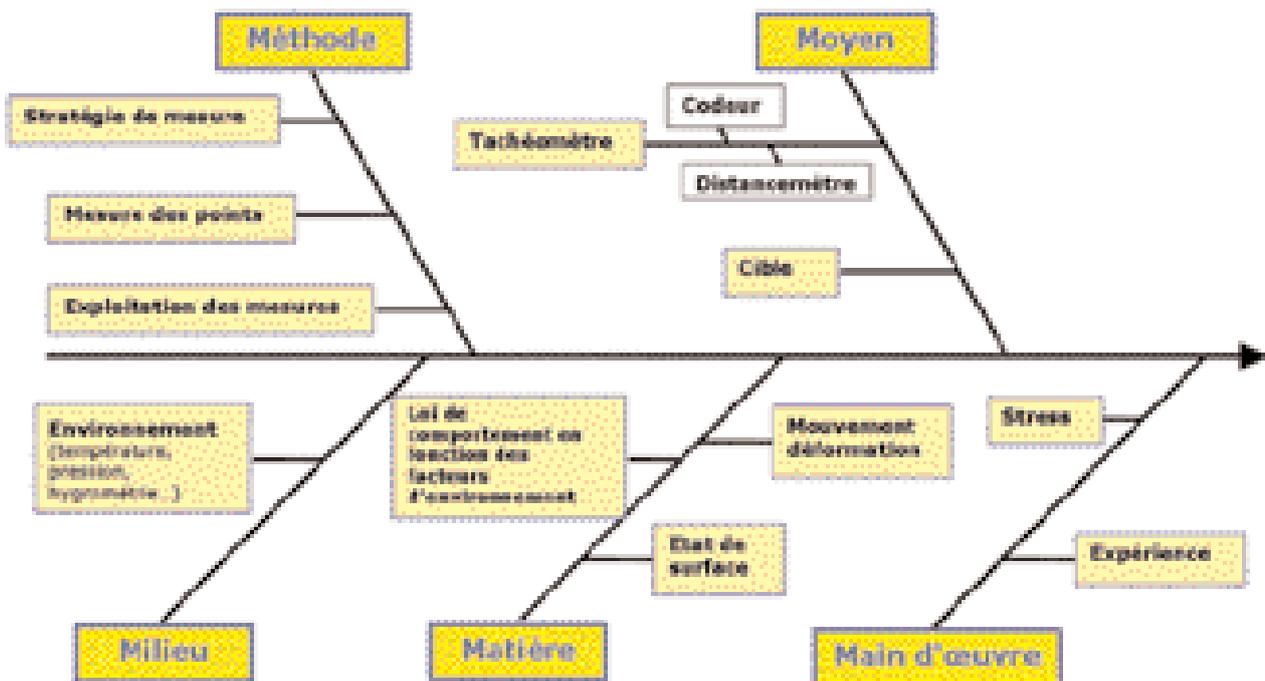


Figure 3 : diagramme 5M pour analyser les sources d'incertitude

En première analyse, il semble que le prestataire puisse obtenir une incertitude sur la largeur de la caisse à ± 1 mm environ.

Pour respecter ce qui est proposée plus haut, il conviendrait de dérouler l'ensemble de la démarche. Pour garantir le niveau d'incertitude requis, nous avons aidé le prestataire à définir la méthode de mesure, à mettre en place l'ensemble des points de contrôle.

■ Quels sont les éléments dont nous disposons pour l'aider dans cette analyse ?

En premier lieu, l'analyse de la méthode de mesure et de calcul s'appuie sur la démarche du 5M⁽⁶⁾ du procédé mis en place, dont le diagramme présenté en figure 3 est un résumé. Il met en évidence toutes les sources d'incertitude induites par cette méthode.

Les sources d'incertitude identifiées, nous avons qualifié l'appareil de mesure et surtout mis en place une méthode de surveillance par un étalonnage sur la mesure de distance et une vérification des capteurs selon la norme ISO 17123.

L'étalonnage présenté en figure 4 montre que, pour un appareil de ce type, les erreurs de justesse peuvent être réduites à 0,2 mm en intégrant la courbe d'étalonnage dans le calcul de la distance. Une surveillance annuelle de l'instrument et un étalonnage en cas de dérive excessive de la mesure de distance (écart supérieur à 0,5 mm) permettent de garantir que l'incertitude sur la distance ne dépassera pas la valeur de 0,5 mm.

De même, sur la mesure angulaire, l'incertitude obtenue par analyse des différents facteurs aboutit à une estimation de l'ordre de 10 μ rad (0,6 mgon) alors que le constructeur garantit son instrument à un niveau 4 fois inférieur selon la norme ISO 17123: cette estimation par le constructeur ne concerne que le codeur angulaire, dans une situation

(6) diagramme dit d'Hishikawa ou "arête de poisson" qui permet de disséquer un procédé entre 5 domaines : moyen, méthode, milieu, matière et main d'oeuvre. Il permet d'identifier les sources de problème - en métrologie, il est souvent utilisé pour identifier les sources d'incertitude d'une méthode de mesure, comme c'est le cas ici.

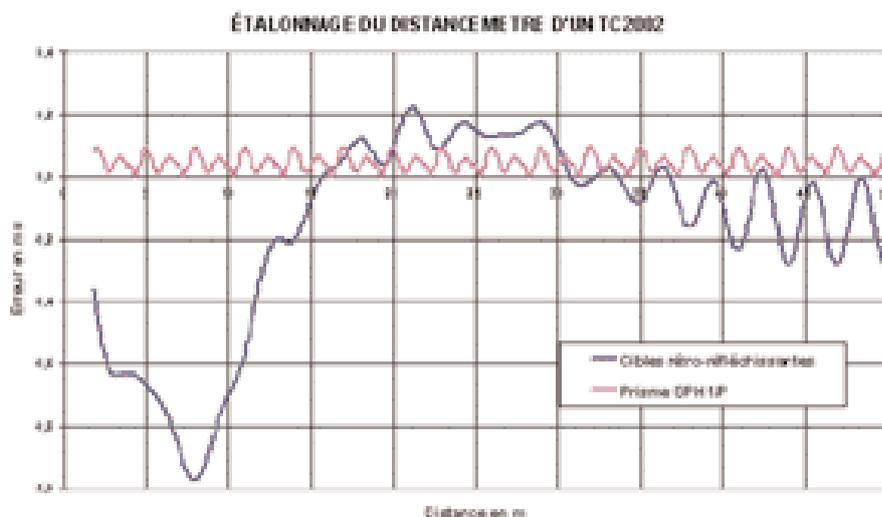


Figure 4 : exemple d'étalonnage du distancemètre d'un tachéomètre sur deux types de cible (prisme et scotch-light)

idéale où les erreurs géométriques de l'appareil, les erreurs de visée... sont parfaitement maîtrisées.

Exemple de calcul d'incertitude sur une telle application

Deux éléments essentiels sont déterminés lors de ces contrôles: la planéité des faces latérales de la voiture et la largeur de caisse.

Les données de ce calcul :

- Dimensions de la caisse: longueur 27 m, largeur 3 m, hauteur 5 m

- Incertitudes élémentaires du capteur: $\delta\alpha = 10 \mu$ rad (ou 0,6 mgon), $\delta D = 0,5$ mm (critère de retour de l'appareil pour étalonnage)

- Le référentiel-objet est orienté en X par l'axe de la voiture, la verticale étant donnée par l'appareil

La planéité des faces latérales est obtenue par mesure directe depuis une station de mesure, le tachéomètre étant installé en extrémité de la voiture (comme présenté en figure 2). Les incertitudes de mesure de planéité sont uniquement liées à l'axe Y du référentiel et peuvent s'exprimer de la manière suivante :

$$\partial y = \sqrt{\sin^2(H_A) \cdot \sin^2(V_A) \cdot \partial D^2 + D^2 \cdot (\cos^2(H_A) \cdot \sin^2(V_A) + \sin^2(H_A) \cdot \cos^2(V_A)) \cdot \partial \alpha^2}$$

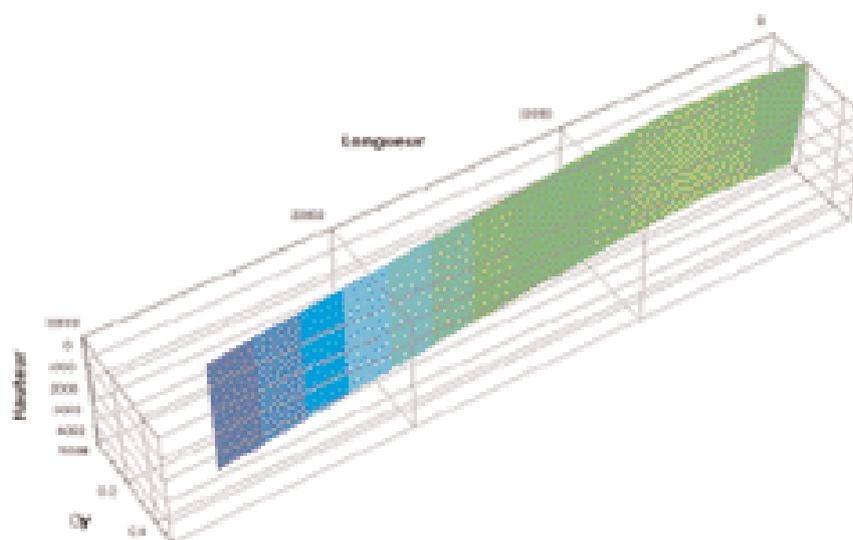


Figure 5 : incertitude de planéité de la face latérale de la voiture

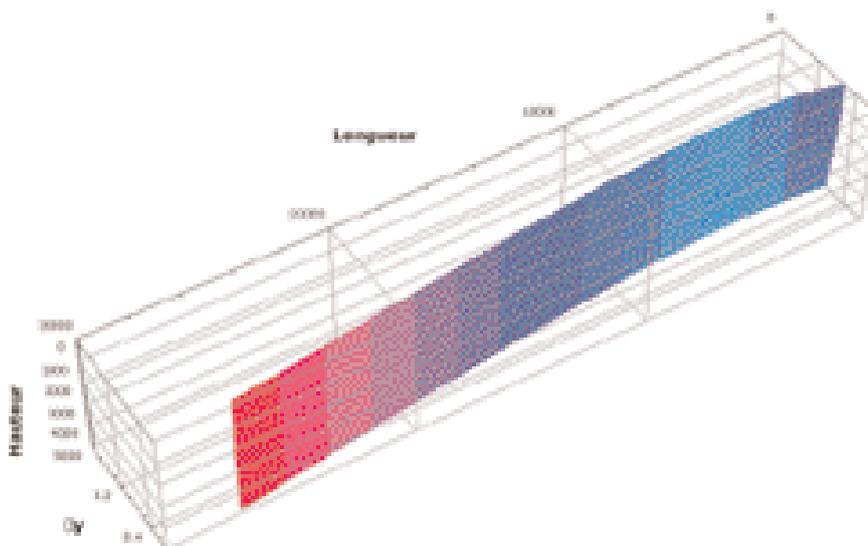


Figure 6 : incertitude de largeur de caisse

■ ■ ■ La figure 5 représente les variations de cette incertitude sur toute la face de la voiture, en considérant que l'appareil est approximativement placé dans l'alignement de la face (décalage de 2 m).

On voit qu'à partir des niveaux d'incertitude élémentaires, l'incertitude réellement constatée sur l'élément mesuré est particulièrement diminuée par un choix adapté de positionnement du système de mesure : l'incertitude maximale est de l'ordre de 0,3 mm en extrémité de la pièce (à 27 m) et l'incertitude minimale est inférieure à 0,1 mm à 4 m du début de la pièce.

La mesure de largeur de caisse nécessite un relevé de chaque côté de la voiture et donc un déplacement du tachéomètre. Ceci entraîne une augmentation de l'incertitude de mesure liée à ce report et un cumul des mesures de planéité de chaque côté de la voiture. Sur la figure 6, on remarque alors que l'incertitude augmente de manière notable, avec un minimum de 0,2 mm à 4 m et un maximum de 0,5 mm à 27 m.

Cet exemple illustre bien l'intérêt de l'analyse d'incertitude : avec un appareil dont l'un des composants présente une incertitude de 0,5 mm, il est possible de réaliser des mesures avec un niveau nettement amélioré.

Il montre aussi la puissance d'une analyse préalable, qui permet de sélectionner la méthode la plus adaptée à une prestation plutôt que de choisir un instrument d'un niveau d'exactitude trop élevé.

Éléments de conclusion

Cet article n'a aucune prétention à donner des leçons sur les métiers présentés ici. Il cherche à montrer la richesse de ces deux métiers, où chacun peut s'enrichir des expériences et des pratiques des autres. C'est d'ailleurs grâce à l'animation du groupe de travail "MTPO" (Mesures Tridimensionnelles par Procédés Optiques) du Collège Français de Métrie que nous avons pu découvrir l'intérêt d'une telle confrontation⁽⁷⁾.

Les éléments qui peuvent en être extraits sont les suivants :

- La démarche du métrologue est souvent une analyse a priori, ce qui permet de prédire les problèmes. Cependant, le métrologue réduit souvent sa démarche à un seul moyen de mesure et oublie la richesse du mélange de mesures, pour augmenter la qualité de la prestation et sa fiabilité.

(7) voir XYZ n°98.

- La démarche du topomètre est plutôt a posteriori, ce qui pourrait le mettre en danger s'il ne multipliait pas les mesures. Il gagnerait donc en performance s'il acceptait une certaine analyse préalable pour réduire justement les répétitions de mesure, le doublement des moyens de mesure...

Une analyse plus approfondie permettrait probablement de définir une troisième voie entre le métrologue et le topomètre. La plupart du temps, ceux qui ont conscience de ces deux approches la trouve naturellement, par la recherche d'un compromis entre la préparation raisonnable et le traitement a posteriori le plus efficace possible. ●

Contact

Alain MARTIN-RABAUD

Métride s.a.

444, rue des Jonchères – 69730 GENAY (France)

Téléphone : 04 72 08 77 77

Fax : 04 72 08 77 79

email : info@metride.fr

Site Web : www.metride.fr

ABSTRACT

KEY WORDS: metrology, topometry, fiability, uncertainty, specification, 3D measurement.

Confronted since years with the intervention in industrial field with means resulting from geodesy, it seemed to me interesting to advance explanations to the following paradox: how, starting from a step which seems to oppose them, metrolog and the topometer can guarantee and obtain a level of reliability of their measures so close? We will try in this presentation to better understand these approaches and to draw some simple conclusions from them.

Problèmes relatifs aux ombres d'objets élevés sur les photographies aériennes

■ Raymond D'HOLLANDER



© Iconothèque Epamarne-Epafrance / photographie : Philippe GUIGNARD - 2001

Les ombres des objets élevés sur les photographies aériennes à un axe vertical permettent de résoudre deux problèmes principaux : la détermination de la hauteur de ces objets et l'orientation de la photographie.

On suppose que la prise de vues a été effectuée par temps clair, le soleil n'étant pas voilé par des nuages, qu'on connaît le jour de la prise de vues et l'instant de celle-ci, qu'on connaît les coordonnées géographiques au moins approchées de l'objet : longitude par rapport à Greenwich et latitude.

La précision de la détermination de la hauteur dn de l'objet dépend de la distance zénithale du soleil au moment de la prise de vues : z ou de son complément la "hauteur" $h = 90^\circ - z$.

Le cas le plus défavorable est celui où la prise de vue est faite au moment de la culmination du soleil au solstice d'été ; la déclinaison du soleil est alors : $d = 23^\circ 26' = 23,43^\circ$

Raisonnons sur un exemple en supposant que l'objet soit à la latitude $\varphi = 30^\circ$ (au Maroc un peu au sud d'Agadir) et que la prise de vues ait été faite au solstice d'été le 21 juin, à midi vrai, alors que le soleil est à sa culmination. On sait que la latitude φ est la hauteur du pôle au-dessus de l'horizon. Sur la coupe méridienne de la sphère céleste (figure 1) l'angle $\varphi = \widehat{HNOP}$. Soit S la

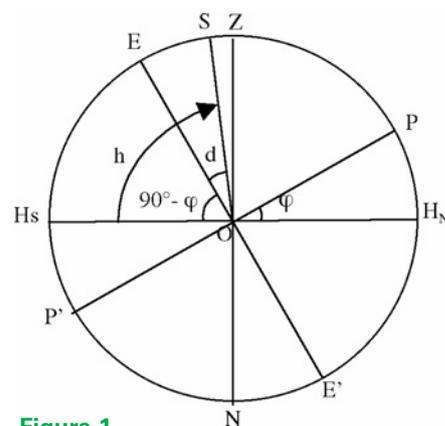


Figure 1

Z zénith
N nadir
NZ vertical du lieu
PP' axe des pôles
EE' équateur
HsHn horizon
φ latitude

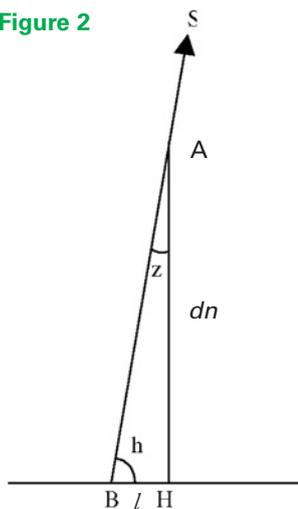
■■■ position du soleil, telle que $\widehat{EOS} = d = 23,43^\circ$

Comme $\widehat{HsOE} = 90^\circ - \varphi$, la hauteur du soleil est : (1) $h = 90^\circ - \varphi + d$, c'est à dire pour $\varphi = 30^\circ$, $d = 23,43^\circ$: $h = 83,43^\circ$, d'où $z = 90^\circ - h = 6,57^\circ$

Si $HA = dn$ est la hauteur de l'objet et si $l = HB$ est la longueur de l'ombre, on a (figure 2) :

$$\tan z = \frac{l}{dn} = 0,115 \quad \text{et} \quad \tan h = \frac{dn}{l} = 8,68$$

Figure 2



On conçoit la faible précision de l'opération, la quantité dn étant près de 9 fois plus grande que la longueur de l'ombre. Aux latitudes de la France, à midi vrai au solstice d'été, on est dans des conditions moins défavorables.

Si $\varphi = 45^\circ$, $h = 45^\circ + 23,43^\circ = 68,43^\circ$;

$$\tan h = \frac{dn}{l} = 2,53.$$

La hauteur de l'objet dn est environ 2,5 fois plus grande que la longueur de l'ombre.

On aura des résultats satisfaisants pour des prises de vues faites en automne et en hiver avec une déclinaison négative du soleil et au début du printemps avec une déclinaison positive du soleil, mais faible ; on aura aussi une plus grande précision si la prise de vues est effectuée au moins à $\pm 2h$ par rapport au midi solaire.

On peut estimer être dans de bonnes conditions lorsque $h < 45^\circ$, la hauteur de l'objet étant alors inférieure à la longueur de l'ombre.

Nous indiquons ci-après le mode opératoire de la détermination de la hauteur dn d'un objet, grâce à la longueur

de l'ombre, dans un cas de précision satisfaisante.

■ Problème I

Calculer la hauteur du soleil h en un point de latitude $\varphi = 48,9^\circ$, de longitude $\lambda = 3,1^\circ$ Est de Greenwich, pour une prise de vues à axe vertical effectuée le 4 mars à 10h 10m heure légale française.

Le principe de la méthode consiste à calculer d'abord l'angle horaire H du soleil à l'instant considéré ; comme on connaît aussi la déclinaison du soleil le 4 mars, ainsi que la latitude du lieu, on est ramené au problème classique de l'astronomie de position, à savoir : calcul de la distance zénithale d'un astre connaissant l'heure de l'observation. Dans le triangle de position PZS (figure 3), on connaît le côté $ZP = 90^\circ - \varphi$, l'angle en P : $-H$, le côté $PS = 90^\circ - d$. Trois éléments de ce triangle étant connus, on peut déterminer le côté $ZS = z$, distance zénithale du soleil.

1 - calcul de l'angle horaire

La table ci-après indique les angles horaires du soleil à midi (12^h TU) à Greenwich tous les cinq jours de l'année.

Interpolons pour le 4 mars entre les valeurs données pour les 2 et 7 mars ; $\delta = 357,2^\circ - 356,9^\circ = 0,3^\circ$ pour 5 jours, soit $0,06^\circ$ par jour et $0,12^\circ \approx 0,1^\circ$ pour 2 jours.

L'angle horaire le 4 mars à 12^h TU à Greenwich est donc : $H_{12} = 356,9^\circ + 0,1^\circ = 357^\circ$.

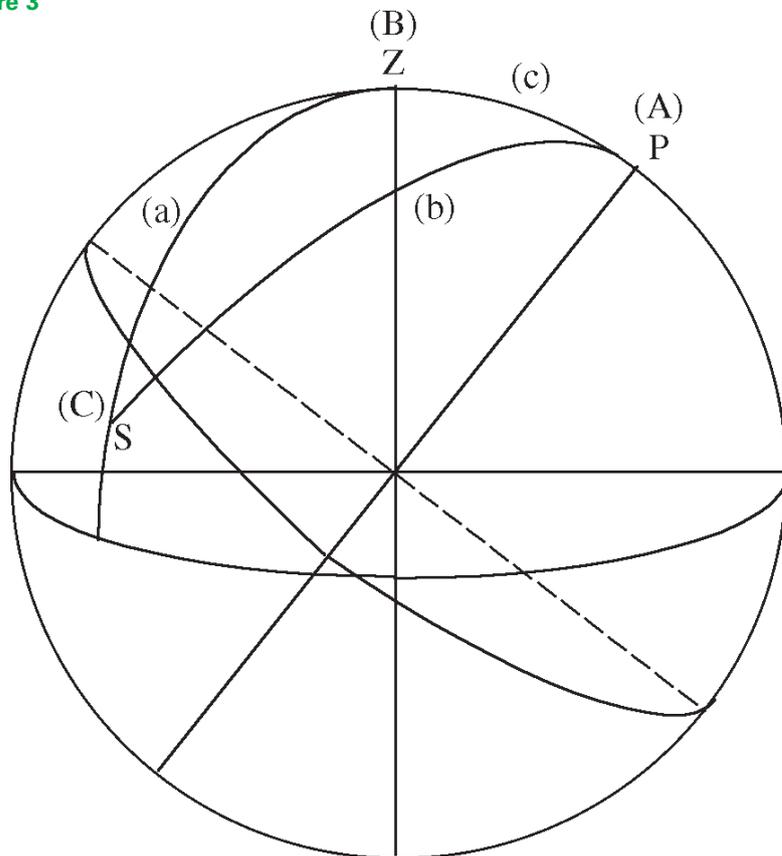
L'instant 10^h 10^m heure légale française correspond à TU = 9^h 10^m ; soit 2^h 50^m avant 12^h TU.

Convertissons 2^h 50^m en degrés :

$$2h 50m = \left(2 + \frac{50}{60}\right) \times 15^\circ = 42,5^\circ.$$

Donc à Greenwich à l'instant considéré, l'angle horaire est $H = 357^\circ - 42,5^\circ = 314,5^\circ$. Au même instant, au lieu considéré de longitude $\lambda = 3,1^\circ$ Est de Greenwich, l'angle horaire du soleil est : $H = 314,5^\circ + 3,1^\circ = 317,6^\circ$ ou $H = 317,6^\circ - 360^\circ = -42,4^\circ$.

Figure 3



2 - Calcul de la déclinaison du soleil le jour de la prise de vues.

La déclinaison du soleil s'obtient par interpolation dans la table ci-après où les déclinaisons sont données de 5 en 5 jours. Pour le 2 mars $d = -7,5^\circ$, pour le 7 mars $d = -5,5^\circ$; $\delta = +2,0^\circ$ pour 5 jours, soit $0,4^\circ$ par jour et $0,8^\circ$ pour 2 jours ; $d = -7,5 + 0,8 = -6,7^\circ$.

3 - Rappelons que la latitude du lieu est $\varphi = 48,9^\circ$.

4 - Résolution du triangle de position

PZS tel que : $-H = 42,4^\circ$

$$d = -6,7^\circ$$

$$\varphi = 48,9^\circ$$

Plaçons A en P, B en Z, C en S ;

$$b = \widehat{PS} = 90^\circ - (-6,7^\circ) = 96,7^\circ$$

$$c = \widehat{ZP} = 90^\circ - \varphi = 90^\circ - 48,9^\circ = 41,1^\circ$$

$$A = -H = 42,4^\circ$$

La formule fondamentale de la trigonométrie sphérique donne :

$$\cos a = \cos z = \cos b \cos c + \sin b \sin c \cos A$$

$$\cos z = \cos 96,7^\circ \cos 41,1^\circ + \sin 96,7^\circ \sin 41,1^\circ \cos 42,4^\circ$$

$$\cos z = -0,0879 + 0,4821 = 0,3942$$

$$z = 66,8^\circ$$

$$h = 90^\circ - z = 23,2^\circ$$

Nous négligeons la réfraction astronomique, qui pour cette hauteur h du soleil est d'environ $2'$ soit $3/100^\circ$.

On est dans des conditions favorables puisque $\tan h = \frac{dn}{l} = 0,42$ et que $0,42 < 1$

La hauteur dn de l'objet est $0,42$ fois plus faible que la longueur de l'ombre.

Application pratique : Supposons qu'on ait mesuré la longueur l de l'ombre d'un peuplier ; compte tenu de la longueur graphique de l'ombre sur la photographie aérienne et de l'échelle de la photographie, on a obtenu : $l = 33$ m. La hauteur dn du peuplier est : $dn = 33 \times 0,42 \approx 14$ m

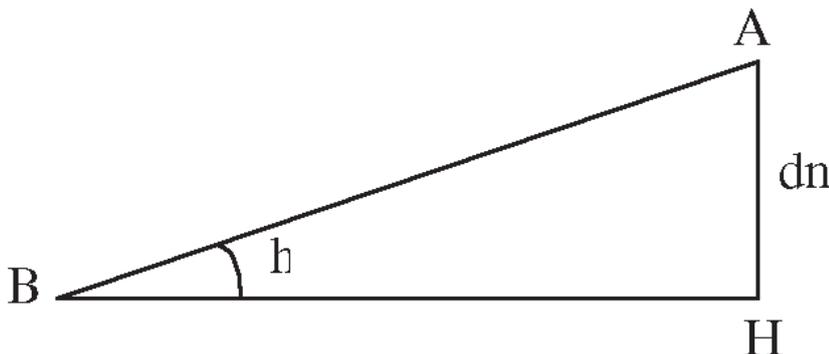


Figure 4



L'ESIEE & L'axe de la Terre - Architecte : D. PERRAULT

Sculpteur : Piotr KOWALSK

© Iconothèque Epamarne-Epafrance / photographie inconnu - 1992

■ Problème II

Avec les données du problème I, calculer l'azimut du soleil au moment de la prise de vues.

Le triangle de position est celui de la figure 3. Utilisons la relation des sinus :

$$\frac{\sin Az}{\sin PS} = \frac{\sin -H}{\sin z}$$

$$\text{d'où } \sin Az = \frac{\sin 96,7^\circ \times \sin 42,4^\circ}{\sin 66,8^\circ} = 0,7286$$

Il y a deux déterminations de Az , qui sont : $46,8^\circ$ et $180^\circ - 46,8^\circ = 133,2^\circ$. Compte tenu de la figure 3, c'est la détermination : $Az = 133,2^\circ$ qui convient. L'azimut de l'ombre est $Az_0 = Az + 180^\circ = 313,2^\circ$ (Figure 5).

Si N_g correspond à la direction du Nord géographique, on a :

$$\widehat{N_gHB} = 180^\circ - 133,2^\circ = 46,8^\circ$$

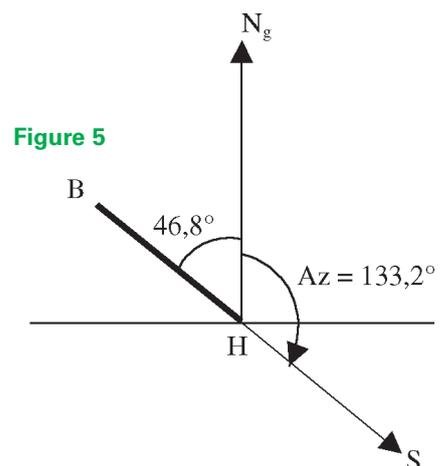


Figure 5

On peut ainsi orienter la photographie, c'est à dire tracer sur celle-ci la direction du nord géographique passant par le pied H de l'objet. On place le centre du rapporteur en H et on le tourne jusqu'à ce que la direction $46,8^\circ$ se superpose à la direction de l'ombre.

La direction joignant H au zéro de la graduation du rapporteur donne la direction du nord géographique, que l'on peut tracer sur la photographie aérienne.

Les prises de vues aériennes à recouvrement stéréoscopique, effectuées en vue de levés topographiques, sont en général munies d'une horloge dont on enregistre sur chaque cliché l'heure et la minute de prise de vues, de sorte que dans ces conditions on peut résoudre

les deux problèmes I et II ci-dessus. Nous avons en effet supposé que l'instant de la prise de vues était 10^h 10^m heure légale française le 4 mars.

Il peut arriver qu'on dispose de photographies aériennes, dont on connaisse le jour de prise de vues, mais non l'instant précis de la prise de vues. Dans ce cas, il est impossible d'obtenir l'angle horaire du soleil à l'instant de prise de vues et les deux problèmes I et II ci-dessus ne peuvent être résolus.

Mais supposons qu'avec l'aide d'une carte topographique on puisse orienter

la photographie aérienne, c'est-à-dire tracer sur celle-ci la direction du nord géographique. En traçant sur un calque la direction du nord géographique de la photographie et la direction de l'ombre, on peut mesurer au rapporteur l'azimut Az_0 de l'ombre, dont on déduit l'azimut du soleil $Az = Az_0 + 180^\circ$.

Dans ces conditions on connaît encore dans le triangle de position trois éléments : l'azimut, le côté $PZ = 90^\circ - \varphi$, le côté $PS = 90^\circ - d$, d étant connu puisqu'on connaît le jour de la prise de vues. On peut ainsi résoudre le triangle de posi-

tion et calculer la distance zénithale z du soleil à l'instant de la prise de vues.

■ Problème III

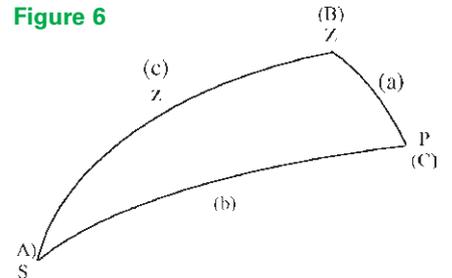
Sur une photographie aérienne prise le 4 mars à la latitude $\varphi = 48,9^\circ$, on a mesuré l'azimut $Az_0 = 313,2^\circ$ de l'ombre du soleil.

Calculer la distance zénithale du soleil à l'instant de la prise de vues.

Reprenons le triangle de position de la figure 3 en y portant les trois valeurs connues (voir fig.6).

- L'azimut du soleil $Az = Az_0 - 180^\circ = 133,2^\circ$ que nous désignerons par B .
- Le côté $\widehat{ZP} = 90^\circ - \varphi = 41,1^\circ$ que nous désignerons par a .
- Le côté $\widehat{PS} = 90^\circ - d = 96,7^\circ$ que nous désignerons par b ; en effet le 4 mars la déclinaison du soleil est $-6,7^\circ$.

Figure 6



Calculons l'angle à l'astre en S que nous désignerons par A .

On a par la relation des sinus :

$$\frac{\sin A}{\sin a} = \frac{\sin B}{\sin b} \quad \text{Or } B = 133,2^\circ, a = 41,1^\circ, b = 96,7^\circ.$$

On en déduit :

$$\sin A = \frac{\sin 41,1^\circ \times \sin 133,2^\circ}{\sin 96,7^\circ} = 0,4825$$

d'où : $A = 28,85^\circ$.

Appliquons la 1^{ère} analogie de Neper :

$$\tan \frac{a+b}{2} = \frac{\cos \frac{A-B}{2}}{\cos \frac{A+B}{2}} \tan \frac{c}{2}$$

$$\text{d'où } \tan \frac{c}{2} = \tan \frac{z}{2} = \frac{\tan \frac{a+b}{2} \cdot \cos \frac{A+B}{2}}{\cos \frac{A-B}{2}}$$

On obtient :

$$\frac{a+b}{2} = 68,9^\circ \quad \tan \frac{z}{2} = 0,6596$$

$$\frac{A+B}{2} = 81,02^\circ \quad \frac{z}{2} = 33,4^\circ$$

$$\frac{A-B}{2} = -52,175^\circ \quad z = 66,8^\circ$$

On retrouve le résultat obtenu au problème I. ●

Table donnant les angles horaires H et les déclinaisons d du soleil à 12 h TU à Greenwich

Dates	H12	d	Dates	H12	d
1 janvier	359° 2	- 23° 0	5 juillet	358° 9	22° 8
6 janvier	358° 6	- 22° 6	10 juillet	358° 7	22° 3
11 janvier	358° 0	- 21° 9	15 juillet	358° 5	21° 6
16 janvier	357° 6	- 21° 0	20 juillet	358° 4	20° 8
21 janvier	357° 2	- 20° 0	25 juillet	358° 4	19° 8
26 janvier	356° 9	- 18° 8	30 juillet	358° 4	18° 7
31 janvier	356° 6	- 17° 6	4 août	358° 5	17° 4
5 février	356° 5	- 16° 1	9 août	358° 6	16° 0
10 février	356° 4	- 14° 5	14 août	358° 8	14° 6
15 février	356° 4	- 12° 9	19 août	359° 1	13° 0
20 février	356° 5	- 11° 1	24 août	359° 4	11° 3
25 février	356° 7	- 9° 3	29 août	359° 7	9° 6
2 mars	356° 9	- 7° 5	3 septembre	0° 1	7° 8
7 mars	357° 2	- 5° 5	8 septembre	0° 5	5° 9
12 mars	357° 5	- 3° 5	13 septembre	0° 9	4° 0
17 mars	357° 8	- 1° 6	18 septembre	1° 4	2° 1
22 mars	356° 2	+ 0° 3	23 septembre	1° 8	0° 2
27 mars	358° 6	+ 2° 3	28 septembre	2° 3	- 1° 8
1 avril	359° 0	+ 4° 3	3 octobre	2° 7	- 3° 7
6 avril	359° 3	+ 6° 2	8 octobre	3° 0	- 5° 6
11 avril	359° 7	+ 8° 1	13 octobre	3° 4	- 7° 5
16 avril	0° 0	+ 9° 9	18 octobre	3° 7	- 9° 4
21 avril	0° 3	+ 11° 6	23 octobre	3° 9	- 11° 2
26 avril	0° 5	+ 13° 3	28 octobre	4° 0	- 12° 9
1 mai	0° 7	+ 14° 9	2 novembre	4° 1	- 14° 5
6 mai	0° 8	+ 16° 3	7 novembre	4° 1	- 16° 1
11 mai	0° 9	+ 17° 7	12 novembre	3° 9	- 17° 5
16 mai	0° 9	+ 18° 9	17 novembre	3° 8	- 18° 8
21 mai	0° 9	+ 20° 0	22 novembre	3° 5	- 20° 0
26 mai	0° 8	+ 21° 0	27 novembre	3° 1	- 21° 0
31 mai	0° 6	+ 21° 8	2 décembre	2° 7	- 21° 8
5 juin	0° 4	+ 22° 5	7 décembre	2° 2	- 22° 5
10 juin	0° 2	+ 23° 0	12 décembre	1° 6	- 23° 0
15 juin	359° 9	+ 23° 3	17 décembre	1° 0	- 23° 3
20 juin	359° 7	+ 23° 4	22 décembre	0° 4	- 23° 4
25 juin	359° 4	+ 23° 4	27 décembre	359° 8	- 23° 3
30 juin	359° 1	+ 23° 1			

Jules Verne et la géodésie

■ Suzanne DÉBARBAT

L'aventure géodésique qui est à l'origine de cet article se trouve, chez Jules Verne, dans son ouvrage "Aventures de trois Russes et de trois Anglais", publié chez Hetzel, en 1872. L'aspect géodésique de ce récit, a été signalé à l'auteur par J.-J. Levallois en 1988, quand la Bibliothèque de l'Observatoire de Paris a mis en place, dans la Grande Galerie du premier étage, des éléments sur "une mesure révolutionnaire: le mètre". En parallèle à cette présentation était réalisé un KIT-EXPO permettant de mettre en place, en 1989, une petite exposition sur l'aventure de Delambre et de Méchain, laquelle avait débouché sur la longueur du mètre, issue de la Révolution Française avec le Système métrique.

Le Méridien et ses mesures

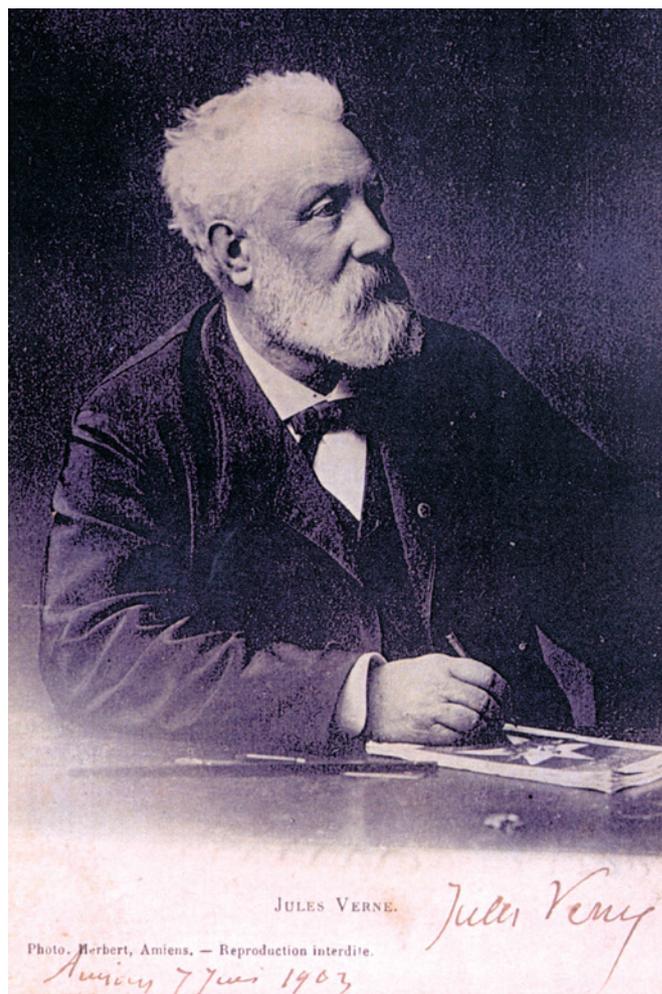
Ce sont des éléments de cette aventure, menée de Dunkerque à Barcelone que Jules Verne rapporte page 22 dans un chapitre intitulé "Quelques mots à propos du mètre". Ainsi, il écrit: "Enfin la mesure de l'arc de ce méridien fut prolongée par Méchain jusqu'à Barcelone, en Espagne."

De quel méridien s'agit-il? Jules Verne l'a mentionné auparavant en rappelant que l'astronome Picard (1620-1682) de l'Académie des sciences et de l'Observatoire de Paris avait, d'une part mis au point les méthodes pour cette mesure, d'autre part effectué lui-même des mesures autour de 1670. Là une petite inexactitude: Jules Verne indique "entre Paris et Amiens", comme on peut en juger par le tracé original de la zone mesurée par Picard, l'arc s'étend d'Amiens à la Ferté-Alais de part et d'autre de Paris et son observatoire.

Ce méridien est celui qui avait été fixé le 21 juin 1667, par les astronomes du moment, et qui devait servir d'axe de symétrie nord-sud pour le bâtiment¹ à construire selon les ordres de Louis XIV et de Colbert.

Jules Verne a aussi rappelé des étapes intermédiaires entre l'opération de Picard et celle de la période post-Révolution de 1789: – l'opération de Jean-Dominique Cassini (1625-1712) qui a débuté en 1683, reprenant le projet de Picard décédé en

(1) Ce bâtiment peut se voir au 61 avenue de l'Observatoire et se visiter lors de visites régulièrement organisées.



1682; – celle de son petit-fils César-François (1714-1784) et de Lacaille (1713-1762) de 1739-1740. On note quelques petites inexactitudes: il oublie le fils du premier Cassini, Jacques (1677-1756) qui a terminé, en 1718, le travail dont son père avait été chargé et ceci, après son décès en 1712; Jules Verne donne la mesure de l'arc Dunkerque-Perpignan, alors que par la carte du tracé, il est clair que les mesures ont été menées jusqu'aux Pyrénées (Canigou).

Ces inexactitudes résultent d'une lecture, sans doute trop rapide, des sources d'informations. Jules Verne détaille, plus longuement, les mesures de ceux qui, après le décès de Méchain en 1804, ont terminé la tâche en menant les mesures jusqu'à Formentera entre 1806 et 1809. Il sait parfaitement bien pourquoi les mesures ont été portées jusqu'aux Baléares: l'arc

■ ■ ■ Dunkerque-Formentera s'étend sur une même longueur, de part et d'autre du parallèle de 45°, parallèle situé au nord de Bordeaux. Et il sait que, dans ce cas, il n'est "pas nécessaire de tenir compte de l'aplatissement de la Terre". En fait, son effet introduit un terme très faible, fonction de cet aplatissement, ce qui n'est pas le cas si l'arc ne présente pas cette symétrie.

La longueur d'un degré de méridien

Jules Verne fournit deux valeurs pour la longueur de l'arc d'un degré en France. Dans le cas de Picard 57 060 toises; dans le cas de Biot et Arago 57 025 toises. Jules Verne présente alors les décisions de 1790 pour les poids et mesures, le choix – comme étalon de base, du nouveau système qui serait de caractère décimal – la longueur de la dix millionième partie du quart du méridien terrestre qui va du pôle à l'équateur.

Jules Verne écrit ensuite "Plus tard ces déterminations de la valeur d'un degré terrestre furent faites en divers lieux de la Terre, car le globe n'étant pas un sphéroïde, mais un ellipsoïde, des opérations multiples devaient donner la mesure de son aplatissement aux pôles." il mentionne différentes campagnes menées au XVIII^e siècle: – celle de Maupertuis, Clairaut, Camus, Lemonnier, Outhier et le Suédois Celsius, en Laponie; – celle qu'il date de 1745 qui correspond à la date des résultats au retour; l'expédition étant partie, en 1735, au Pérou (de nos jours en Equateur) avec La Condamine, Bouguer, Godin, et les Espagnols Juan et Ulloa. Il ajoute aussi, toujours avec les valeurs en toises, les mesures menées entre Rome et Rimini en

1754, celles du Piémont datant de 1762 et 1763, celles de 1768 effectuées, en Amérique, de la Pennsylvanie au Maryland.

Jules Verne, dans cette partie a aussi mentionné le travail de Lacaille, entre 1750 et 1752, au nord du Cap de Bonne-Espérance. C'est sans doute cette campagne qui lui a fait choisir le lieu des aventures russo-britanniques et qui lui a fait prolonger son titre par "dans l'Afrique australe". A noter que le souvenir de Lacaille demeure en Afrique du Sud et aussi à l'Ile Maurice avec un Pic Lacaille et un médaillon sur la place de la Mairie de la ville de Cure-Pipe.

Pour en venir à la raison de cette entreprise, citons Jules Verne "Ce ne fut qu'en cette année 1854, que l'Angleterre, comprenant depuis longtemps les avantages du système métrique, et voyant d'ailleurs des sociétés de savants et de commerçants se fonder pour propager cette réforme, résolut de l'adopter". Il poursuit: "Mais le gouvernement anglais voulut tenir cette résolution secrète jusqu'au moment où de nouvelles opérations géodésiques, entreprises par lui, permettraient d'assigner au degré terrestre une valeur plus rigoureuse".

Jules Verne mentionne le changement de longueur du mètre qu'entraîne un changement dans l'aplatissement de la Terre. Si, au lieu de 1/334 pour cet aplatissement, c'est 1/299.15 qui est utilisé, le quart du méridien terrestre est augmenté et devient 10 000 856 mètres. C'est la valeur précisément donnée par Arago dans son "Astronomie populaire". Arago ne s'inquiète aucunement de cette différence; il sait bien d'ailleurs que Delambre dans son étude du système métrique, publiée en 1810, a donné un grand nombre de valeurs possibles pour ce mètre, rapporté à la Toise du Pérou ayant servi de référence, donnant au mètre une longueur de 0.513074 que Jules Verne rapporte dans son propos sur le mètre. C'est cette valeur, laquelle correspond à 3 pieds 11,296 lignes de cette Toise de référence que mentionne également Jules Verne. C'est donc aussi cette quantité que les Anglais souhaitent déterminer de manière plus précise en se rendant en Afrique australe.

Une opération géodésique anglo-russe

Le gouvernement russe penchant, comme les Anglais, vers une adoption du système métrique, une commission anglo-russe (trois astronomes dans chaque cas) est bientôt créée. Jules Verne fournit les éléments du projet: une opération dans l'hémisphère austral, puis une autre dans l'hémisphère boréal, la longueur du mètre étant déduite de cet ensemble. Des motifs scientifiques sont fournis pour justifier le choix: 1° Le méridien nord pourrait être mesuré en Russie, sensiblement à la même longitude que l'Afrique du sud; 2° le voyage serait relativement court pour atteindre les possessions anglaises retenues; 3° l'opération permettrait de contrôler la valeur donnée par Lacaille un siècle plus tôt.

L'opération débute en 1854. Elle emploiera la méthode utilisée en premier lieu aux Pays-Bas par Snellius (1590-1626) en 1615, la méthode ayant été développée et rationalisée par Picard qui, également, a créé les trois instruments permettant de la mettre en œuvre sur le terrain. Il s'agit du quart-de-cercle géodésique à deux lunettes avec lequel sont déterminés des azi-



© Observatoire de Paris

Triangulation Lacaille.

muts, du secteur qui est utilisé pour les mesures astronomiques et le niveau à lunettes pour les opérations de nivellement. En outre Picard utilise des bois de piques pour les mesures au sol d'une "base".

Pour rappeler les principes, le schéma de Picard est bien adapté. L'opération est une triangulation par laquelle sont enchaînés les uns aux autres une série de triangles, dans le sens nord-sud du méridien pour le cas présent. Ces triangles sont choisis en sorte que de l'un des sommets, l'astronome puisse viser les deux autres et réciproquement. D'où le choix de tours, de châteaux, de clochers ; à défaut, des sommets de collines avec des repères bien visibles. Picard place son quart-de-cercle dans le plan contenant son lieu d'observation et les deux autres sommets dont il veut déterminer l'angle. Grâce aux deux lunettes, dont une lui sert d'alidade, il effectue la lecture de cet angle sur le limbe gradué de l'instrument. Les observateurs procèdent de manière similaire avec le cercle répéteur employé par Arago. L'illustrateur de l'ouvrage de Jules Verne, Férat, représente bien l'instrument du XIX^e siècle, le cercle répéteur de Borda, dans une telle position, de jour, pour la partie géodésique des mesures.

Des mesures astronomiques doivent aussi être faites, aux extrémités de l'arc à mesurer. Picard employait un grand secteur dont la longueur, en unités de notre époque, dépassait trois mètres. Ce secteur avait un limbe réduit de 18°. Picard a observé la distance zénithale d'une même étoile, proche du zénith pour limiter les effets de la réfraction atmosphérique, aux stations de Sourdon près d'Amiens et de Malvoisine près de la Ferté-Alais. Au XIX^e siècle c'est le même instrument, le cercle répéteur, version employée par Arago, qui est utilisé.



© Illustration Férat - Editions Hetzel

Mesures de distance zénithale au cercle de Borda.

Il est alors placé verticalement, réglé au fil à plomb par les trois vis du support ; employé, de nuit, pour l'observation des étoiles choisies. C'est bien ce que fait Jules Verne et qui est représenté dans son récit. Il a probablement rencontré des difficultés pour comprendre la manière de procéder car, au lieu de détailler la procédure comme l'a fait Arago, il glisse directement à la valeur obtenue pour la latitude en Afrique.

Des triangles géodésiques à la longueur d'un arc de méridien

Les astronomes de la commission anglo-russe disposent maintenant d'une série de triangles entre les deux extrémités de l'arc de méridien à mesurer. Les triangles sont connus par leurs angles successivement mesurés avec vérification que la somme des trois angles égale 180°, aux erreurs de mesure près. Ceci n'est pas tout à fait vrai sur le terrain car la Terre n'est pas rigoureusement plane. Il faut évidemment faire appel à la trigonométrie sphérique, mais cela ne modifie rien aux principes de l'opération. S'ils ont tous les angles, les astronomes n'ont pas la longueur au sol ; ils disposent seulement, par la différence entre les latitudes des extrémités, de l'angle au centre de la Terre pour cet arc. Il leur faut, d'une part déterminer la longueur des côtés des triangles, et d'autre part placer le méridien dans la triangulation complète.

Depuis le XVII^e siècle, astronomes et géodésiens ont résolu ce problème en choisissant un triangle annexe dont ils déterminent, avec une grande précision, la longueur d'un côté au sol. ■■■



© Illustration Férat - Editions Hetzel

Mesures d'azimut au cercle de Borda.



© Illustration Férat - Editions Hetzel

Utilisation des règles de Borda.

■ ■ ■ Pour ce faire, au temps de Picard ou des Cassini, ce sont des "bois de pique" de deux toises placés bout à bout qui sont utilisées et, à partir de la fin du XVIII^e siècle, des Règles de Borda de deux toises chacune. Le même Borda a mis au point le cercle répéteur et les règles, au nombre de quatre, pour la mesure de ce qui est appelé "base" pour ce côté d'un triangle à mesurer.

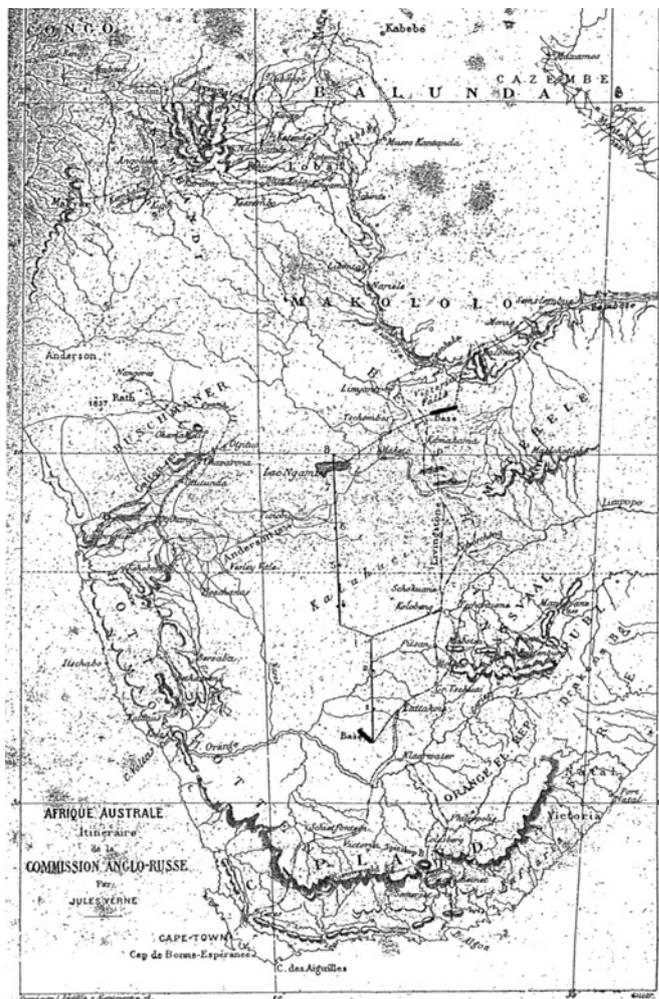
Pour Jules Verne elles sont au nombre de six, longues de deux toises et constituent, pour lui comme pour Borda, un thermomètre bimétallique platine-cuivre, protégé par un "petit toit" en bois, et muni – pour les cas de Soleil bas sur l'horizon – de pièces de tissu blanc sur le côté. Jules Verne décrit en grand détail ces règles et le mode d'emploi, inspiré d'Arago. Ce dernier écrivait: "un vernier placé vers l'extrémité de la règle de cuivre, indiquait avec une grande précision l'allongement relatif du cuivre, d'où l'on pouvait conclure l'allongement absolu du platine". La version Jules Verne est la suivante "un vernier, disposé à l'extrémité de la règle de cuivre, indiquait exactement l'allongement relatif de la dite règle, ce qui permettait de déduire l'allongement absolu du platine". Chaque règle était munie de deux pointes pour leur alignement.

La mise en œuvre des règles est très longuement décrite par Jules Verne et l'illustration de Férat montre bien l'observateur vérifiant avec une lunette l'alignement des pointes dont chaque toit de règle est muni. Par mesure de sécurité, la "base" est mesurée plusieurs fois si cela paraît nécessaire. Connaissant la base constituant un des côtés du triangle, choisi en sorte que le terrain soit le plus horizontal possible, tous les éléments du triangle sont connus si l'on se souvient que connaissant un côté d'un triangle et les deux angles adjacents, les autres éléments s'en déduisent. De proche en proche tous les côtés des triangles de l'ensemble peuvent, de même, se calculer.

La triangulation selon Jules Verne

La triangulation – inspirée d'un ouvrage d'un enseignant du Lycée Henri IV – dessinée par Jules Verne, constitue un cas particulier qui se présente rarement dans la réalité sur le terrain. La "base" est constituée par un des côtés des triangles joignant des points élevés d'observations, clochers ou tours, dans certains cas des détails d'une construction. Il n'est donc pas toujours facile de mesurer, au sol, de tels intervalles. Le plus souvent, il faut faire appel à un triangle supplémentaire comme cela est le cas chez Picard, comme chez les Cassini, ou chez Delambre et Méchain pour leur opération relative au mètre.

Jules Verne a aussi considéré un cas particulier pour le méridien qui va d'un sommet d'un triangle au sommet d'un autre. Ceci, également, est rarement le cas mais pour les lecteurs de Jules Verne, cela facilite la description. Il leur faut, comme cela a été fait, par Picard et d'autres, placer le méridien dans la triangulation. Pour ce faire les astronomes ont recours à la détermination de l'angle que fait un côté du triangle de départ avec la direction du méridien du lieu. Cette dernière s'obtient par observation du Soleil et des étoiles dont la culmination, correspondant à la plus grande hauteur au-dessus de l'horizon, se produit au moment du passage au méridien. Il est aussi possible de procéder par détermination des longitudes des sommets de la triangulation, à partir d'observations astrono-



Triangulation anglo-russe.

© Extrait de l'ouvrage de Jules Verne - Editions Hetzel

miques dont on possède des éphémérides. Dans ces cas, des horloges de précision ou des chronomètres sont nécessaires puisque les différences de longitude correspondent à des différences entre heures locales du fait de la rotation de la Terre. Les éphémérides sont établies pour un méridien de référence.

Selon Jules Verne la longueur de l'arc à mesurer est de l'ordre de 8°. C'est sensiblement la longueur de l'arc de Delambre et Méchain, entre 1792 et 1798, de Dunkerque à Barcelone. Le temps consacré à cette dernière expédition, anormalement long, s'explique par les événements du temps et aussi par une erreur que Méchain croyait avoir commise lors de ses mesures. Pour les trois Russes et les trois Anglais, l'opération débute en février 1854. Après avoir largement mené plus de la moitié de l'opération, les savants sont informés de la guerre qui a lieu du côté de Sébastopol. Anglais et Russes sont désormais ennemis par gouvernements interposés. Ils vont alors se séparer pour mettre en œuvre des mesures plus ou moins indépendantes. Pendant la période de travail en commun, aussi bien que pour la suite des mesures, le récit de Jules Verne est émaillé de difficultés liées aux conditions en Afrique australe. Les travaux de terrain conduisent aux retrouvailles des deux équipes au cours desquelles l'un des protagonistes évoque la campagne de Biot et Arago, accompagnés d'un astronome espagnol Rodrigues, lors de la prolongation de la Méridienne de France, jusqu'aux Baléares. Les protagonistes apprennent que la guerre russo-anglaise est terminée ; la coopération peut donc reprendre.

Les soixante-trois triangles de la campagne en Afrique ont été mesurés, alors que maintenant le mois de mars 1855 est déjà

bien avancé. L'astronome russe suggère de mesurer des triangles nouveaux jusqu'à trouver un terrain propice afin d'y établir une deuxième base qui servirait à contrôler les résultats des mesures qui viennent de s'achever. Après de nouvelles aventures et de triangle en triangle, un emplacement pour la deuxième base est trouvé. Comme pour les astronomes français Les mesures prennent plus d'un mois et elles sont achevées au 15 mai 1855. La différence trouvée, tous calculs faits, conduit à un écart entre les observations et les calculs de zéro toise et 14 centièmes. C'est meilleur que le résultat obtenu par Delambre et Méchain ce qui en fait, écrit Jules Verne, l'opération "la plus parfaite des opérations géodésiques entreprises jusqu'à ce jour".

La longueur du mètre

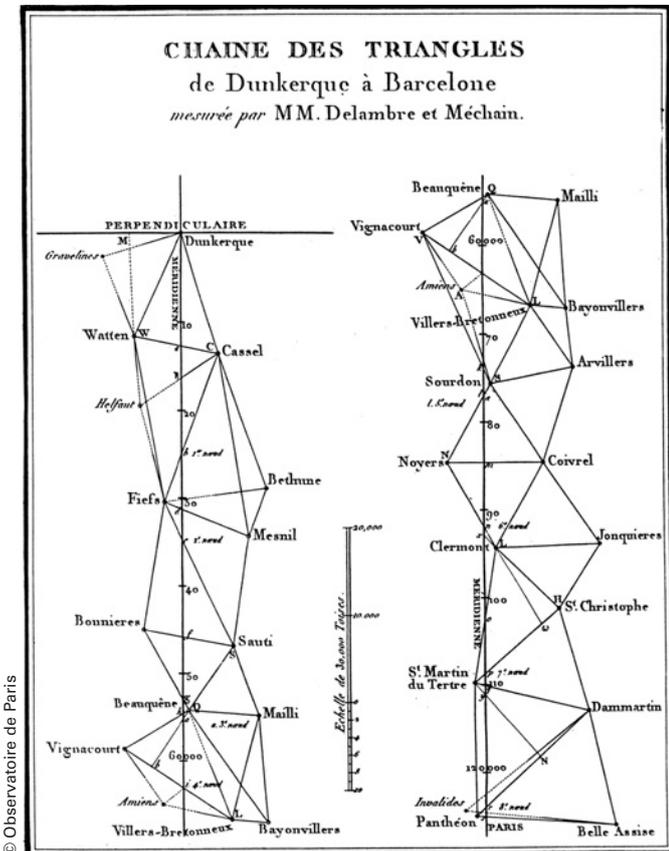
De leurs mesures, les savants déduisent la longueur du degré de méridien, soit 57 037 toises. Jules Verne écrit "C'était, à une toise près, le chiffre trouvé par Lacaille, au Cap de Bonne-Espérance. A un siècle de distance, l'astronome français et les membres de la commission anglo-russe s'étaient rencontrés avec cette approximation".

"Quant à la valeur du mètre, il fallait, pour la déduire, attendre le résultat des opérations qui devaient être ultérieurement entreprises dans l'hémisphère boréal". Ainsi s'exprime Jules Verne qui ajoute " Cette valeur devait être la dix millionième partie du quart du méridien terrestre. D'après les calculs antérieurs, ce quart comprenait, en tenant compte de l'aplatissement de la terre "évalué" à 1/499.15, dix millions huit cent cinquante six mètres, ce qui portait la longueur exacte du mètre à 0T.513074, ou trois pieds onze lignes et deux cent quatre-vingt-seize millièmes de ligne. Ce chiffre était-il le véritable? C'est ce que devaient dire les travaux subséquents de la commission anglo-russe".

Dans cette partie de conclusion scientifique, Jules Verne mélange quelques données concernant les calculs menés par Delambre après le décès de Méchain. D'abord l'aplatissement, 1/499.15 alors qu'il faut lire, comme il l'a indiqué vers le début de l'ouvrage, 1/299.15. Il redonne aussi, dans cette fin d'ouvrage, la longueur du mètre en fraction de la toise² de référence dont il a indiqué, antérieurement, qu'elle avait été employée comme référence par l'expédition du Pérou du XVIII^e siècle.

Cette fraction, correspondant aux 3 pieds 11 lignes et 296 millièmes de cette Toise, est bien ce que rappelle Jules Verne. Mais il se trompe en indiquant que cette longueur correspond à la longueur du quart de méridien, en mètres, de 10 000 856 mètres. La valeur 3 pieds 11,296 lignes est celle conclue, et fixée par la Commission internationale qui s'est réunie à l'Observatoire de Paris de septembre 1798 à juin 1799. Cette commission a examiné, en plusieurs sous-commissions, registres et calculs de Delambre et de Méchain et, entre plusieurs possibilités, a choisi la valeur arrondie au millième de ligne.

(2) Cette toise, appelée depuis "Toise du Pérou" est dans les collections de l'Observatoire de Paris. Elle doit figurer à nouveau dans une exposition sur la vitesse de la lumière qui doit se tenir à l'Observatoire en fin d'année 2005, "Année internationale de la Physique".



© Observatoire de Paris

■ ■ ■ La valeur 10 000 856 mètres est celle issue de la prolongation de la méridienne de France par Arago et Biot ce qui aurait donné un mètre de 1,000 085 6, soit un peu plus long de 8 ou 9 centièmes de millimètre. A l'époque où ces résultats étaient obtenus le monde savant et le Bureau des longitudes – alors à l'Observatoire de Paris – ont décidé de ne pas modifier la longueur du mètre chaque fois que de nouvelles mesures sur le terrain en modifieraient la réalisation. Ainsi s'est trouvée assurée la longueur du mètre au cours du temps, avec des représentations qui ont évolué avec le résultat des recherches, mais sont demeurées cohérentes avec la valeur retenue par la Commission internationale de 1799.

Actuellement le monde vit avec un mètre fondé sur la longueur du temps de vol de la lumière "Le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de 1/299 792 458 de seconde" (17^e Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM) de 1983, avec adoption le 20 octobre). La quantité, au dénominateur, est la valeur correspondant à la vitesse de la lumière 299 792 458 m/s adoptée en 1975 par la 15^e CGPM. Cette valeur, donnée à 1,6 m près, la meilleure précision obtenue grâce au développement des lasers, avait été dérivée par la valeur moyenne des valeurs obtenues, par cinq laboratoires dont celui du temps et des fréquences de l'Observatoire de Paris dans le cadre d'une convention avec le Bureau National de Métrologie.

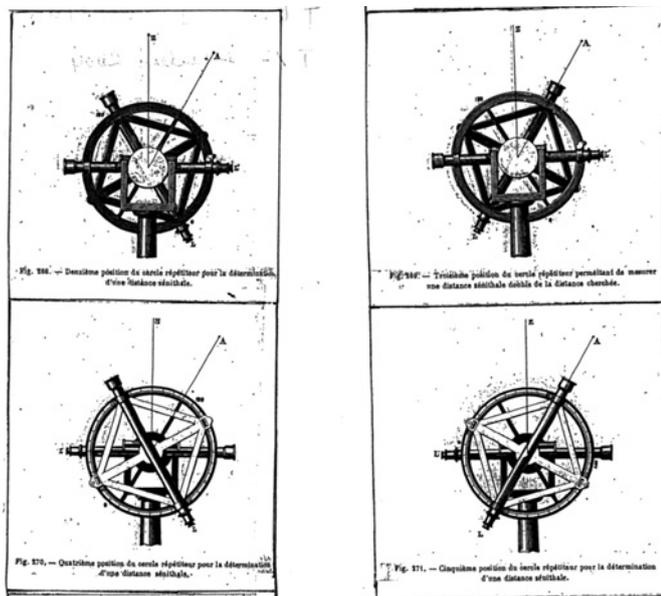
Les sources de Jules Verne

Il apparaît clairement, par examen des textes d'Arago et de Jules Verne, que ce dernier, pour les opérations géodésiques, s'est beaucoup inspiré d'Arago et de ses chapitres relatifs à la forme et la dimension de la Terre; même si dans son texte il mentionne M. Garcet, professeur au Lycée Henri IV qui, d'ailleurs, s'était sans doute inspiré d'Arago, les mesures pour la longueur du mètre n'étant pas encore très lointaines.

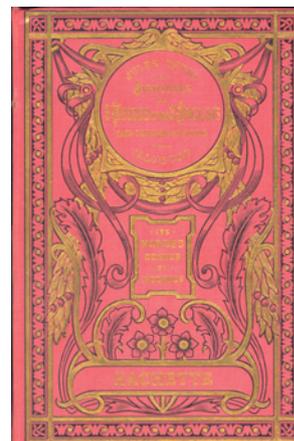
A ce sujet il convient de rappeler qu'étant à Amiens, Jules Verne avait, aussi, comme informateurs locaux des professeurs du lycée. Cette information provient d'une personne dont le père, alors enfant, entre 1890 et 1901, a été conduit chez Jules Verne par son père alors directeur de l'Hospice d'Amiens pour aveugles. Il s'agissait de le remercier d'avoir envoyé ses ouvrages pour que lecture puisse en être faite aux aveugles. Le petit garçon, plus tard, racontera à son fils que ce qui l'avait le plus frappé, chez ce vieux monsieur, était les importantes poches qu'il avait sous les yeux... Devenu militaire, ce petit garçon a fait partie du groupe qui a rendu les honneurs au décès de Jules Verne. Il m'a aussi été rapporté que Jules Verne membre du Conseil municipal d'Amiens avait coutume, au moment des réunions, d'arpenter les couloirs en discutant science avec l'ingénieur de la ville M. Badouret.

D'un autre côté la question peut se poser de savoir si Jules Verne a rencontré Arago. Les spécialistes de l'un et de l'autre le savent sans doute. Pour le moment – rien n'a été trouvé en ce sens, même si l'on indique que Jules Verne admirait François Arago. François est ici précisé, car partout sont indiquées des relations entre Jules et Jacques, un des frères d'Arago né en 1790. Marié à 19 ans et bientôt père, ce dernier s'embarque en 1817 – à 27 ans – pour un long voyage; il est dessinateur de l'expédition qui parcourt le Pacifique. Il en rapporte un "Voyage autour du monde", succès de librairie en plusieurs langues dès sa parution en 1839, alors que Jules Verne a onze ans. Ce dernier rencontrera Jacques Arago en 1851 quand il en a 23; il s'en inspirera largement pour les récits de ses voyages et lorsqu'on écrit que Jules Verne admirait Arago, ne faut-il pas comprendre Jacques? Pour François il avait, en 1851, 65 ans. Déjà malade, il n'avait plus que deux ans à vivre. Il est plausible de douter que le jeune Verne soit venu le voir.

C'est sans doute plus tard que différents ouvrages d'Arago, ceux de vulgarisation issus de son cours d'astronomie populaire, ont retenu l'attention de Jules Verne. Une carte postale à son effigie datée de 1903 – comme pour nombre d'autres de la même époque que l'on peut voir reproduites dans des articles le concernant – provient d'une collection privée; elle a été envoyée à l'arrière-grand-mère de celui qui la possède. ●



Extrait d'Astronomie populaire, François Arago.



Contact

Suzanne DÉBARBAT
SYRTE - UMR 8630
Observatoire de Paris

Références

Astronomie populaire, François Arago, 4 vol., 1854-1857.
Aventures de trois Russes et trois Anglais dans l'Afrique australe, Jules Verne, Editeur Hetzel, 1872.

Frédéric Bretar, dans le cadre de son de DEA en Epistémologie, Histoire des Sciences et des Techniques, a écrit et soutenu en 2004 un mémoire traitant "l'histoire de la détermination des longitudes de Ptolémée à Borda : Développements théoriques et mise en pratique. Application à la navigation". Ce document a paru particulièrement intéressant pour nos lecteurs férus d'histoire des sciences géographiques, et son auteur a bien voulu nous le présenter en trois publications successives, après "Des Longitudes et des Mers : la genèse de la navigation", "Le temps des premières longitudes" voici la troisième.

Des Longitudes et des Mers : Science et Progrès (3/3)

■ Frédéric BRETAR

L'observation des satellites de Jupiter pour la détermination des longitudes sur un navire, on l'a vu, est d'une difficulté extrême à résoudre. Le marin, pour vaincre la myopie de ses instruments et les instabilités de son pont flottant, n'a d'autre choix que de se tourner vers la Lune. Nous sommes au siècle des Lumières. On réalise alors à quel point ce siècle plein d'espoirs et d'entrain est susceptible de faire avancer la science de la navigation. C'est à ce moment que le jeu savant se constitue alliant les minutieuses observations des astronomes et les élégants développements des mathématiciens, et que "la mouvante Lune brilla enfin pour les navigateurs du XVIII^e siècle comme une aiguille lumineuse sur le cadran céleste". Une solution astronomique, certes, mais certains hommes aux mains habiles, construiront cette machine tant désirée combinant les lois de la mécanique terrestre (le chronomètre), dont le perpetuum mobile des cliquetis métalliques sera le garant d'un temps universel.

L'institution du *Longitude Act* aurait pu, comme les prix précédents, ne jamais être un moteur suffisant pour l'écriture d'une solution au problème des longitudes en mer. Ce problème était en gestation depuis de nombreuses années, au moins dans sa forme la plus aboutie. La synthèse des solutions rapportée par Cassini en 1722 dans sa communication à l'Académie des sciences, ainsi que le texte de Newton présenté devant le parlement en 1714 sont bel et bien exhaustifs (article précédent). Tout est déjà là, mais la science et la technique ne semblent pas être encore prêtes.

La raison dans l'art de naviguer

Nous entrons effectivement dans une ère d'utopie mathématique que l'on voudrait garante de la sécurité de la navigation et de la puissance. Les mathématiques s'épanouiront à travers la mécanique universelle puisque les mêmes lois régissent dorénavant la physique terrestre et céleste. On ne cessera de louer sa capacité de prédiction. Si le côté savant des méthodes astronomiques nécessite la prévision des déplacements lunaires, elles reposent aussi fondamentalement sur les moyens permettant l'observation précise des distances angulaires.

Le XVIII^e siècle n'a pas inventé de nouveaux instruments de mesure, mais a essentiellement contribué à l'amélioration d'instruments optiques dont le principe avait été arrêté le siècle précédent. L'invention de la double réflexion par Hadley en 1731, scellera le destin de la mesure astronomique de précision en mer. Par l'introduction d'un miroir dans l'appareil optique, on a pu faire coïncider l'image des deux points éloignés dont la distance angulaire est à mesurer. Ainsi, le problème du tangage du vaisseau est résolu : le mouvement ne vient pas perturber la mesure. Les premiers quadrants réflecteurs autoriseront une précision de deux minutes d'arc qui les qualifiera pour la méthode des distances lunaires. Ces instruments continueront à être améliorés au cours du siècle, notamment par l'ajout d'une visse micrométrique, puis par une augmentation du champ de visée, le huitième de cercle (octant) devenant le sixième de cercle (sextant) en 1770 permettant de mesurer des distances jusqu'à 120°.

Cette dernière période, dont la fin coïncide avec la résolution effective du problème des longitudes en mer, clôt la question qui occupa le devant de la scène scientifique européenne, notamment pour ses profondes implications avec l'astronomie et la mécanique naissante. Les équations de la gravitation introduites par Newton deviennent une des clés du problème de la détermination du mouvement de la Lune et donc de celui des longitudes. Parallèlement, les horloges de marine apparaissent et tentent de vaincre le lancinant roulis subi par les navires.

Entre Cartésiens et Newtoniens

Notre regard rétrospectif sur cette histoire suscite l'interrogation suivante : pourquoi fallut-il attendre près de 60 ans pour que les équations définissant le mouvement de la Lune soient résolues ? Outre les difficultés techniques, c'est l'intérêt du problème lui-même qui est en cause.

Quelles sont les forces mises en jeu dans le mouvement des astres ? Dans les années 1730, en France, la polémique s'installe. Pour les cartésiens, c'est l'impulsion. Pour les newtoniens, c'est l'attraction. En France, le cartésianisme domine encore les esprits grâce aux *Entretiens sur la pluralité des mondes* (1686) de Fontenelle. Celui-ci, cartésien convaincu, a voulu mettre à la portée du public mondain cultivé de son temps le système de Copernic : le soleil est immobile au centre du monde et la Terre est une planète mobile qui tourne autour de lui, contrairement aux théories d'Aristote et de Ptolémée. Dans un style légèrement précieux, il décrit ce nouveau système du monde mû, selon Descartes, par des "tourbillons de matière subtile" :

"- Mais, interrompit la marquise, pourquoi y a-t-il des planètes qui ne valent pas mieux que [les satellites de Jupiter] ? Sérieusement il me paroîtroit plus régulier et plus uniforme que toutes les planètes, grandes et petites, n'eussent que le même mouvement autour du Soleil.

- Ah ! Madame, repliquay-je, si vous sçaviez ce que c'est que les tourbillons de Descartes, ces tourbillons dont le nom est si terrible, et l'idée si agréable, vous ne parleriez pas comme vous faites. La teste me dust-elle tourner dit elle en riant, il est beau de sçavoir ce que c'est que les tourbillons. Achevez de me rendre folle, je ne me ménage plus, je ne connois plus de retenüe sur la philosophie ; laissons parler le monde et donnons nous aux tourbillons. Je ne vous connoissois pas de pareils emportemens, repris-je ; c'est dommage qu'ils n'ayent que les tourbillons pour objet."

La publication des *Principia naturalis* (1687) par Newton seulement quelques mois plus tard ne laissait pas présager le renversement latent qui n'attendait que quelques vérifications pour effacer définitivement la théorie des tourbillons. Si Newton, dans les *Principia*, fait une magistrale synthèse des connaissances de son temps et y énonce la célèbre loi de la gravitation cet ouvrage n'en reste pas moins très difficile à lire :

"il a été écrit d'une manière si fine, si savante et si peu à la portée du commun des géomètres, non seulement anglais, mais français, qu'il lui a fallu de nombreux commentateurs, et les plus habiles géomètres [...]"

Dans son pays, ses idées ne se propageront que lentement, la première édition des *Principia* n'ayant été tirée qu'à 250 exemplaires. En 1713, une deuxième édition de 750 exemplaires accélère leur diffusion en Angleterre, et bientôt sur le continent.

Au cours de ces années charnières où la physique est en pleine (r)évolution, l'apparition de nouveaux concepts sème le scepticisme et le doute. Le scientifique, l'astronome dans ce cas, se trouve devant le choix méthodologique suivant : comment obtenir des tables de la Lune suffisamment pré-

cises ? dois-je intégrer les nouvelles conceptions newtoniennes (qui n'ont pas encore été confirmées empiriquement, et dont la résolution des équations ne tombe pas sous le sceau de l'évidence), ou dois-je perfectionner ce que nous savons déjà faire, à savoir se baser sur des hypothèses purement géométriques et indépendantes du système de gravitation ? Quand Halley succède à Flamsteed en 1720 comme astronome royal, son parti est pris. D'abord, l'observatoire de Greenwich a été créé en priorité pour faire des observations précises du mouvement des astres ; ensuite, Halley est convaincu que la méthode de résolution directe des orbites newtoniennes à trois corps est d'une difficulté pratiquement insurmontable. Ses premières recherches l'on conduit à réhabiliter l'hypothèse du cycle de Saros utilisé par les Chaldéens pour la prévision des éclipses, en introduisant des équations empiriques, déterminées par les différences entre les vrais lieux de la Lune observés depuis la Terre, et ceux prédits par les meilleures tables¹. Selon Halley, ces différences, ces erreurs de table, doivent être périodiques et revenir sensiblement égales au bout de 18 ans 10 ou 11 jours (cycle de Saros) :

"I compared my own observations to Mr. Street's tables and I perceived how regular the irregularities were, and that where the moon had been exactly observed formerly, at the distance of one or more periods of 233 months, I could even predict the error of the tables."

Ces cycles de périodes relativement importantes sont difficiles à observer. Après y avoir consacré les vingt dernières années de sa vie, aucun cycle n'a pu être mis en évidence. En France, l'accueil de la théorie de la gravitation reste froid. L'Académie des sciences se veut en effet obstinément cartésienne. C'est Maupertuis qui introduit officiellement le newtonisme à l'Académie des sciences, notamment grâce à son mémoire lu en 1732, dans lequel il explique à un auditoire médusé que les principes cartésiens n'épuisent pas la réalité physique et que "l'interdit métaphysique" qui pèse sur l'attraction est injustifié. *"Il a fallu plus d'un demi-siècle, constate-t-il, pour apprivoiser les académies du continent avec l'attraction. Elle demeurait enfermée dans son île ou, si elle passait la mer, elle ne paraissait que la reproduction d'un monstre qui venait d'être proscrit [...]. On était si charmé d'avoir introduit dans l'explication de la nature une apparence de mécanisme qu'on rejetait sans l'écouter le véritable mécanisme qui venait s'offrir"*

Parmi les partisans de l'attraction, on compte deux autres célèbres académiciens, Clairaut et La Condamine, tous deux soutenus par la plume de Voltaire (qui composera la préface à la traduction française des *Principia* par Mme de Châtelet). Des progrès aussi bien théoriques qu'expérimentaux viennent sans cesse étayer la nouvelle théorie de l'attraction : développement sur le problème des deux corps (Daniel Bernoulli, 1734) ; mesure de l'aplatissement terrestre (expédition en Laponie menée par Maupertuis et Clairaut, 1737) en

(1) Il s'agit des tables Carolines qui furent d'abord publiées à Londres en 1661, puis à Nuremberg en 1705 et que les astronomes ne délaissèrent que pour les tables de La Hire parues en 1687.

accord avec les prévisions newtoniennes; le retour de la comète de Halley, prédit pour 1759 par les tables newtoniennes, est effectivement observé. Ces démonstrations exceptionnelles convertissent la majorité des académiciens aux thèses newtoniennes. Mais le point précis où la cosmologie newtonienne touche à la cartographie du globe est bien en ce qui concerne la détermination des longitudes ainsi que le mouvement lunaire. C'est la résolution de ce problème qui sera la preuve publique de la justesse de la théorie de la gravitation.

Les premières théories analytiques de la Lune

Les années 1740 voient les premières tentatives de solution globale pour le mouvement de la Lune. La solution générale dont on se sert consiste, à partir d'une autre Lune dont le mouvement serait aisé à déterminer (cette Lune imaginaire suivrait une orbite circulaire, ou mieux, elliptique suivant les découvertes de Képler), à découvrir pour chaque instant la différence qui se trouve entre les lieux de cette Lune imaginaire et de la véritable Lune. La solution repose sur l'intégration d'un système d'équations différentielles établi à partir de la loi newtonienne de la gravitation appliquée au système à trois corps {Lune, Terre, Soleil}. Dès 1742, Euler publie des tables lunaires calculées selon ce principe. Parallèlement, en France, Clairaut et d'Alembert s'attaquent au même problème, dont la résolution fut sans doute précipitée par le prix mis au concours de l'Académie des sciences de Saint-Petersbourg en 1751. Clairaut et D'Alembert, dans leurs écrits de l'époque, posent le principe de la résolution du système d'équations différentielles d'une manière itérative:

"Cette méthode est immédiatement fondée sur les formules des différentielles du second degré, que la théorie fournit pour la détermination du mouvement, sans qu'on ait besoin d'en chercher préalablement les intégrales. Pour cet effet, je suppose d'abord que tant le lieu du corps dont il est question, que son mouvement, c'est à dire la vitesse avec la direction, soient exactement connus pour une époque donnée: ensuite, sachant que pour ce même temps, les accélérations que les forces qui agissent alors sur le corps y produisent, j'ai fait voir comment de là on peut assigner le lieu et le mouvement de ce corps, non seulement pour un instant après, mais pour un temps assez considérable écoulé depuis la dernière époque. Cependant, ce temps ne doit pas être pris trop grand, de peur que l'aberration, qui croit avec le temps, ne devienne sensible; Mais dès qu'on y est arrivé, on n'a qu'à répéter les mêmes opérations pour parvenir à un moment deux fois plus éloigné de la première époque, et ainsi, on pourra continuer le même calcul aussi loin qu'on voudra."

Mais, de même qu'Euler qui les a précédés de quelques années, les deux mathématiciens français ne réalisent, au cours de l'années 1747, que la première itération en substituant une solution pseudo-képlérienne à la position réelle de la Lune dans le calcul des forces perturbatrices. Pour cette raison, ils n'obtiennent tous trois que la moitié environ du moyen mouvement observé des apsides² de la Lune, sans

+	0° 11' 14''	sin a	} équation annuelle.
-	0.4	sin 2 a	
-	56	sin (2D + a) D = distance angulaire (☾ - ☉)
+	7.6	sin (2D - a)	
+	49	sin (2D + A) A = anomalie moyenne ☾
-	1.20.36	sin (2D - A) Évection
+	26	sin (4D - 2A)	
+	2.0	sin (2D - A + a)	
+	47	sin (2D - A - a)	
+	28	sin (A - a)	
+	51	sin 2 [D - (☾ - Ω)] La table donne 58°
+	16	sin (D - A)	
-	1.0	sin 2 (D - A)	
+	4	sin Ω	
-	6.18.11	sin A' A' = A corrigée par les équations précédentes.
+	12.52	sin 2A'	
-	37	sin 3A'	
-	1.55	sin D' D' = D corrigée de même
+	35.47	sin 2D'	
+	2	sin 3D'	
+	14	sin 4D'	
+	1.26	sin [2 (☾ - Ω) - A']	
+	6.51	sin 2 (☾ - Ω)	

Figure 1: Aperçu des développements de Mayer pour l'établissement de ses tables.

souçonner que les itérations suivantes puissent fournir, pour cette quantité, une contribution aussi importante que la première. Clairaut, Euler et d'Alembert, qui sont arrivés aux mêmes conclusions, deviennent sceptiques vis à vis de la loi d'attraction en $1/r^2$, en venant à proposer une autre loi s'y substituant³. La controverse entre Buffon, partisan d'une loi de gravitation écrite par un unique terme, et Clairaut alimente les débats de l'Académie. Les manuscrits de 1752 (Clairaut), 1753 (Euler) et 1754 (d'Alembert) tomberont néanmoins d'accord sur la proposition mise au concours, à savoir que "les inégalités du mouvement lunaire s'accordent avec la théorie newtonienne" de la gravitation. Les choix purement théoriques des trois géomètres ne faisaient cependant qu'approcher les précisions nécessaires au calcul des longitudes en mer. Dans leurs méthodes de résolution itérative, les coefficients des développements étaient insuffisamment estimés. Euler le mentionne explicitement dans une communication à l'académie de Berlin:

"La théorie m'avait fourni toute les corrections, avec plusieurs autres que j'ai omises à cause de leur petitesse; mais quelques éléments demandaient un grand nombre d'observations pour être bien déterminés, et comme ceux que j'avais employés pour ce dessein n'étaient pas assez exactes, les tables que j'avais construites là-dessus ne remplir point mes vues."

Le problème consistait donc à faire converger les mesures des astronomes et les calculs des mathématiciens avec une précision maîtrisée. C'est à l'astronome et mathématicien Tobias Mayer (1723-1762), directeur de l'observatoire de Gottingen, que reviendra le privilège de publier en 1753 les *Novae Tabulae motuum solis et lunae*, tables des mouvements de la Lune et du soleil d'une précision encore jamais égalée (elles ne s'écartent pas de plus d'une minute des observations). Pour Euler, cette précision est largement suffisante lorsqu'il prend la défense des calculateurs:

"Quand on serait en état de calculer le lieu de la Lune à une seconde près, on n'en saurait retirer aucun avantage pour la pratique. Or un tel degré de précision demanderait peut-être

(2) Point extrême du grand axe de l'orbite d'un astre.

(3) En ajoutant des termes compensateurs en $1/r^4$

des astronomes Pingré (1711-1796) et Lemonnier, promoteurs de la méthode concurrente de l'angle horaire. Ce dernier avait engagé le père Pingré à calculer pour lui les positions de la Lune satisfaisant à sa méthode dans les quatre et seuls volumes de l'Etat du ciel entre 1754 et 1757.

Rappelons en quoi consiste la méthode de l'angle horaire. Dans son plus simple énoncé, cette méthode ne nécessite qu'une hauteur de la Lune. Connaissant la latitude et la déclinaison de la Lune, il est facile de calculer à l'aide de la trigonométrie sphérique son angle horaire. Une comparaison avec la valeur de cet angle pour le méridien de Paris, on obtient la longitude du lieu d'observation par différence. Son application pratique est un peu plus exigeante. Elle exige :

1. La mesure de la hauteur méridienne
2. L'observation de la latitude du lieu
3. Une mesure de la hauteur de la Lune sur l'horizon, avant ou après son passage au méridien
4. Le temps écoulé entre les deux observations avec la contrainte de choisir le moment où le mouvement de la Lune en déclinaison est négligeable.

En comparant l'angle horaire de la Lune calculé à celui donné dans l'Etat du ciel pour Paris à la même heure locale, on peut en déduire la longitude du lieu d'observation.

Dans son mémoire sur les longitudes, La Caille prononce un véritable réquisitoire contre la méthode de l'angle horaire, prouvant par le calcul les sources d'erreur. Malgré les querelles ouvertes entre Le Monnier et La Caille, continuées par le père Pezenas (1692-1776), le chanoine Pingré ne fut certes pas hermétique aux mises en garde de La Caille. Lors de son voyage aux îles Rodrigues et de France en 1761 en vue d'observer le transit de Vénus devant le Soleil, il ne cache pas sa détermination de tester plusieurs méthodes astronomiques pour calculer sa longitude :

"J'entends donc ici, par la méthode de M. L'abbé de la Caille, celle de conclure la longitude en mer par l'observation des distances de la lune soit au soleil aux étoiles fixe, et je l'appelle ainsi, non que je prétende que ce célèbre astronome en ait été l'inventeur, mais parce qu'il l'avait adopté d'une manière tout à fait singulière, non seulement comme la meilleure de toute, mais comme l'unique qui pût réussir. M. l'abbé de la Caille avait alors plus d'expérience que moi, j'étais [...] dans la persuasion que cette méthode était [bien] la meilleure. En conséquence, je l'ai toujours suivie en allant aux Indes; en revenant j'ai essayé celle des hauteurs de la lune et des angles horaires, telle que je l'ai exposé dans l'Etat du ciel des années 1755 et 1756, et je mettrai le public en état de juger du succès de ces deux méthodes."

On voit ainsi se profiler la postérité de la méthode développée par La Caille. Elle le sera d'autant plus que Nevil Maskelyne (1732-1811), futur astronome royal (1765), utilisa cette méthode, ainsi que les premières tables de Mayer, lors de son séjour sur l'île de Saint-Hélène en 1761 en vue d'y observer (lui aussi) le transit de Vénus.

Cette méthode, la seule avérée jusque maintenant pour le calcul des longitudes en mer, ne peut cependant pas s'affranchir

Au matin.	inférieur du Soleil.	Au soir.
10 ^h 18' 30"	46 ^d 56'	1 ^h 48' 40"
11 13 0	53 25	0 53 30

« Par la première observation & la correspondante, la Montre auroit marqué à midi 12^h 3' 35"

Et par la seconde 12^h 3' 15"

En prenant un milieu, il s'enfuit que la Montre avançoit « de 0^h 3' 25"

Le 17 au soir j'observai le vrai coucher du Soleil qui Le coucher
devoit arriver à 5^h 39' 28" apparemment a dû
La Montre marquoit alors 5^h 42' 0" arriver à 3^h 41'

& par conséquent avançoit de 0^h 2' 32"

Le 18 au matin j'observai l'instant de l'immersion du 1.^{er} «
Satellite de Jupiter, lorsque ma Montre marquoit 4^h 41' 0"

Le vrai lever du Soleil qui a suivi immédiatement cette «
observation, & qui devoit arriver à . . . 6^h 20' 20"

fut observé, la Montre marquant . . . 6^h 23' 30"

ce qui fait voir qu'elle avançoit alors de . . . 0^h 3' 10"

C'est pourquoi il semble qu'on pourroit soustraire 3 minutes, «
de l'heure de l'observation, pour en déduire le temps vrai de «
l'immersion à 4^h 38' 0"

Figure 3 : Extrait du journal de bord de D'Après de Manneville mentionnant les corrections à apporter au calcul de l'heure d'immersion du premier satellite de Jupiter à l'aide d'une montre marine.

de montres fiables. C'est bien entendu également vrai pour la détermination des longitudes à terre.

L'horloge, la Lune et le Board Une mécanique difficile à maîtriser

Les horloges utilisées en cette moitié de XVIII^e siècle sont l'héritage des inventions de Huygens. La régularité de leur mouvement n'est pas encore entièrement maîtrisée et varie d'une horloge à l'autre. Avant toute observation astronomique de position, il convient donc de connaître parfaitement la marche de l'horloge utilisée, son avance ou son retard journalier. On observe généralement pendant plusieurs jours consécutifs les levers et couchers du Soleil consignés dans des tables, que l'on compare à l'heure indiquée sur la montre. D'Après de Manneville, dans le journal de bord de son voyage à l'île Bourbon en 1740, corrige le temps vrai de l'immersion du premier satellite de Jupiter de la valeur moyenne de l'avance de la montre utilisée (ici 3 minutes, voir Figure 3).

Notons que ce protocole ne peut être appliqué que dans le cadre d'observations faites à terre. D'où vient le manque de régularité ? La solution du mouvement "perpétuel" se heurte d'une part aux problèmes liés aux frottements mutuels des rouages qui progressivement ralentissent le mécanisme global, et d'autre part à l'alternative qui consiste à utiliser des huiles lubrifiantes pour diminuer l'action de ces frottements. En effet, les lubrifiants utilisés se fluidifient ou s'épaississent selon que les températures montent ou descendent, les horloges allant plus vite ou plus lentement, voire s'arrêtent complètement. Un premier horloger anglais, ■■■

John Harrison, propose dès ses débuts une alternative judicieuse, à savoir l'utilisation de rouages en bois qui sécrètent leur propre huile. Les balanciers sont eux aussi soumis aux actions de la température qui les font se dilater ou se contracter. C'est à nouveau Harrison qui proposera des solutions techniques permettant de contrecarrer ces phénomènes dès les années 1730.

A bord d'un navire, les conditions climatiques évoluent très rapidement et l'influence du roulis sur les balanciers n'est toujours pas résolue. Rappelons qu'en Angleterre, nous sommes toujours dans la compétition lancée par le *Longitude Act* en 1714. Devant les récompenses proposées par le *Board*, le clan Harrison décide de se mettre en quête d'une solution au problème de la détermination des longitudes en mer qu'il espère résoudre grâce à ses compétences d'horloger. J. Harrison construira au total cinq horloges chacune s'adaptant de manière plus précises aux différentes contraintes de la navigation en mer.

Une âpre compétition s'engage outre-Manche

Le décret de 1714 prévoit deux conditions à l'obtention du prix proposé. D'abord, le procédé devait subir une épreuve concluante au cours d'un voyage aux Indes. Puis il fallait s'assurer de sa praticabilité en mer. Ce qu'il faut comprendre par ces deux conditions, c'est que le procédé doit être reproductible et généralisable. Nous verrons que dans la course au prix des longitudes, ces deux aspects seront particulièrement étudiés, surtout lorsqu'un des postulants fait lui-même partie du *Board*.

Après quelques tentatives avortées, le clan Harrison, confiant dans sa nouvelle horloge, obtient enfin le test prévu par l'*Act*. Le 18 novembre 1761, William Harrison s'embarque à bord du *HMS Depford* avec H-4⁵ pour un voyage en Jamaïque. Le 26 mars 1662, H-4 était de retour en Angleterre, et sa variation totale était de moins de deux minutes. Malheureusement, le *Board* (dont Bradley était membre d'office) n'accorda pas le prix à Harrison, sans doute trop heureux de constater que les résultats obtenus par Maskelyne sur l'utilisation des tables de Mayer pour calculer des distances lunaires étaient très satisfaisants. Peu de temps après son retour de Saint-Hélène, Maskelyne publie ses résultats accompagnés d'un exposé didactique du procédé (pour justifier la reproductibilité) sous le titre *The British Mariner's Guide*. Les raisons de la décision du *Board* sont obscures. Il exige une preuve supplémentaire pour s'assurer de la stabilité de la machine, et de plus, a requis de Harrison qu'il expose ses secrets de fabrication devant des experts. Il semble que nous sommes loin de l'égalité rhétorique des méthodes du texte de Halley. Ce sont deux mondes qui s'affrontent maintenant, celui des savants, et celui des ingénieurs horlogers.

Un deuxième voyage de probation est entrepris en 1764. W. Harrison s'embarque avec H-4 pour la Barbade. Après 156 jours de mer, la montre a retardé de 15 secondes. Pendant le voyage, elle permet de rectifier le point et d'atterrir avec plus de précision qu'avec une simple estimation de la position. Après vérifications, il était évident que la

1118] OCTOBER 1772.					
Distances of ☾'s Center from ☉, and from Stars west of her.					
Days	Stars Names	Noon.	3 Hours.	6 Hours.	9 Hours.
		D. M. S.	D. M. S.	D. M. S.	D. M. S.
1	The Sun.	62. 6. 55	63. 44. 49	65. 22. 18	66. 59. 22
2		74. 58. 25	76. 32. 59	78. 7. 10	79. 40. 56
3		87. 24. 0	88. 55. 28	90. 26. 35	91. 57. 21
4		99. 26. 2	100. 54. 47	102. 23. 14	103. 51. 23
5		111. 7. 52	112. 34. 22	114. 0. 37	115. 26. 38
3	Antares.	33. 0. 51	34. 36. 17	36. 11. 37	37. 46. 49
4		45. 40. 30	47. 14. 40	48. 48. 38	50. 22. 24
5		58. 8. 6	59. 40. 36	61. 12. 55	62. 45. 2
6		70. 22. 45			
6		15. 30. 17	17. 2. 20	18. 34. 12	20. 5. 52

Figure 4: Table des distances lunaires extraites du *The Nautical Almanac and Astronomical Ephemeris for the year 1772*

montre avait respectée l'heure avec une précision suffisante (trois fois celle prévue par le *Longitude Act*). Le second essai concluant de H-4 en 1764 ne lui accorde toujours pas le privilège de la récompense. Beaucoup plus décevant pour Harrison, les règles du jeu changent dès l'accession de Maskelyne au titre d'astronome royal en janvier 1765. Il fallait maintenant, pour recevoir la moitié de la somme prévue initialement, que John Harrison dévoile tous ses secrets de fabrication et abandonne tous ses prototypes à l'astronome royal. Sans entrer dans les détails d'une querelle qui peut paraître personnelle, Harrison céda une partie de son savoir-faire en 1767 et perçut la somme promise. Après des démêlés avec Maskelyne, le complément de la somme lui sera versé en 1772 sur intervention du Roi.

Dans le même temps, l'astronome royal propose la publication d'un éphéméride nautique dont les tables seraient construites suivant le modèle indiqué par La Caille. En 1766, il publie *The Nautical Almanac and Astronomical Ephemeris* pour l'année 1767. Ces éphémérides seront publiés annuellement, les distances lunaires (les heures) étant calculées par rapport au méridien de Greenwich.

Vers une complémentarité méthodologique

Si les recherches en horlogerie ont largement été initiées en Angleterre, la France n'est pas en reste. L'horlogerie de marine française voit le jour dans un contexte de rivalité entre Ferdinand Berthoud (1727-1807) et Pierre Le Roy (1717-1785). Cette situation n'est pas l'apanage de la France, tant les enjeux commerciaux sont vitaux pour des horlogers qui ont voué leur existence à la mise au point des montres marines. Berthoud et Le Roy sont tous deux artisans du succès des horloges marines de ce côté-ci de la Manche et ils ont commencé leurs recherches respectives la même année, en 1754. Les solutions techniques apportées par ces deux horlogers à la

(5) quatrième horloge construite par J. Harrison.

non stabilité d'un bateau soumis aux aléas de la mer seront assez proches de celles proposées par Harrison. À cette époque, les essais en mer des montres de l'horloger anglais ont déjà commencé, et l'Angleterre a pris une telle avance dans la course à la longitude et dans la fabrication d'instruments nautiques qu'il devient urgent de tester les montres françaises au cours de longs voyages. Les montres ne doivent pas varier de plus de 2,5 secondes par jour suivant les limites fixées par l'Académie. Il est précisé que cette variation doit être uniforme au cours du voyage. Le voyage décisif est celui réalisé par Fleurieu sur l'Isis en embarquant deux montres de Le Roy, ainsi que les montres n° 6 et n° 8 de Berthoud, du 8 décembre 1768 au 21 novembre 1769.

Les résultats sont bons, et Fleurieu est très élogieux vis à vis de Berthoud. De nouveaux tests sont organisés peu de temps après dans le cadre du prix proposé par l'Académie des sciences en 1763 sur la meilleure manière de mesurer le temps en mer. Une expédition⁶ dont *"l'objet [ne devait être] que des opérations relatives à la perfection de la navigation et spécialement l'examen et la vérification des moyens propres à la détermination des longitudes en mer"* prend le large de Brest le 29 octobre 1771⁷ à bord de la frégate La Flore commandée par Verdun de la Crenne. Aidé du Chevalier de Borda et de l'astronome Pingré, tous trois furent chargés de *"l'épreuve des horloges marines et de tous les instruments proposés jusqu'alors pour la détermination des longitudes en mer [...] et de faire une comparaison raisonnée des avantages et des inconvénients de toutes les méthodes, de faire un examen des méthodes pratiques qui ont été employées jusqu'à présent par les navigateurs."*

Outre le sextant anglais et l'octant, La Flore emporte à son bord cinq montres marines : trois chronomètres de Le Roy, la montre n° 8 de Berthoud, son grand concurrent, et la dernière d'Arfandaux, et un pendule marine. Au terme de ce voyage, les montres de Berthoud et de Le Roy avancent ou retardent en moyenne de 1 à 2 secondes par jour. La n° 8 donna des longitudes à 1/4 de degrés pendant 6 semaines, et 1/3 de degrés au delà. À performances techniques équivalentes, ce sont les montres de Berthoud qui équiperont la marine française, notamment grâce à l'appui marqué de Fleurieu et une capacité de production supérieure à celle de ses concurrents.

Leurs conclusions sont de trois ordres :

1. le calcul des longitudes grâce aux montres marines est beaucoup plus facile qu'avec d'autres méthodes. Il convient

(6) Jusqu'à maintenant, les voyages de qualification avaient une dimension scientifique non négligeable, mais n'étaient pas destinés en priorité à l'exploration scientifique. On a vu que la Royal Society exigeait des officiers de marine des relevés des vents, des courants, de la déclinaison magnétique, d'observations astronomiques ... dès leur retour en Angleterre. Certains marins français étaient correspondants de l'Académie des sciences. Mais les grandes expéditions dont le but est explicitement scientifique (exploration géographique, cartographique, test de méthodes ...) prennent officiellement la mer. Parti de France en 1766, revenu en mars 1769, le voyage commandé par Bougainville est un des plus célèbres, ne serait-ce que pas l'escale tahitienne. Aux trois voyages de Cook (1768-1771, 1772-1775, 1776-1780) répond l'expédition qui part de France en 1785 et commandée par La Pérouse. Sa disparition en 1788 entraîna l'envoi en 1791 d'une expédition lancée à sa recherche commandée par d'Entrecasteaux

(7) et reviendra le 10 octobre 1772

d'en emporter deux pour pallier à une panne mécanique. Cette éventualité ne permet à la méthode des chronomètres que de combler le manque d'information acquise à partir de l'astronomie.

2. Ces montres doivent être vérifiées le plus souvent possible lors de relâches dans des ports de longitude connue, ou facilement déterminable par l'observation d'éclipses de Lune ou de satellites de Jupiter.
3. La méthode des distances lunaires est moins précise que celle des chronomètres (1 minute d'erreur sur la position de la Lune équivaut à 0.5 degrés de longitude), mais plus fiable.

Le réel intérêt des premières montres marines consiste à améliorer la cartographie des côtes et permet un levé sous voile très rapide. Nous n'entrerons pas dans les détails des nouvelles méthodes d'hydrographie qui permettront à Beautemps-Beaupré de renouveler entièrement les cartes nautiques.

Ces conclusions annoncent l'esprit de certaines futures navigations, mais pas de toutes. Nous l'avons vu, le calcul d'une longitude à partir d'observations astronomiques n'a rien d'évident. Il n'est certes pas nécessaire de connaître la solution de Clairaut ou d'Euler au problème à trois corps, mais il faut cependant savoir comment utiliser les tables, prendre des hauteurs, faire les calculs et enfin comment reporter le point sur la carte. Un arsenal mathématique est donc requis (essentiellement de géométrie et de trigonométrie).

Cet enseignement est loin d'être proposé aux futurs marins (militaires ou marchands)! Sans un minimum de théorie, il est impossible pour un pilote de faire le point en utilisant les méthodes "modernes" de l'astronomie.

Il semble donc qu'à la fin du XVIII^e siècle, le problème des longitudes ne soit pas résolu pour tout le monde. La méthode des distances lunaires, à peine fiabilisée, sera en fait peu utilisée pratiquement. À l'heure où les chronomètres de marine sont inabordables pour le commun des navigateurs, et où la somme des éphémérides nautiques restent un luxe que seuls les navires militaires peuvent se permettre, l'estime confirme sa pertinence et les marins leur conservatisme.

Conclusion Générale

Cette introduction à l'histoire des longitudes vise à donner une vision "globale" de ce que fut le problème du positionnement est-ouest des navires, aussi bien dans ses aspects pratiques que dans ses aspects théoriques. Elle s'étend sur de nombreux siècles, de l'instant où l'on s'est posé la question des longitudes (et des latitudes) à l'obtention d'une solution effective, dont les développements théoriques ont été les plus importants au XVIII^e siècle. Nous nous sommes arrêtés en 1773 car cette date correspond au voyage de La Flore, voyage qui a validé à la fois la méthode des distances lunaires et celles des garde-temps. Cette histoire est jalonnée d'événements charnières qui ont contraint son évolution vers l'issue que l'on connaît. Certains acteurs y ont tenu un rôle particulièrement actif. Il s'agit d'abord du Portugal

au XV^e siècle pour des raisons politico-économiques clairement déterminées. A cette époque, parmi les candidats potentiels à l'aventure hauturière, la France et l'Angleterre sortent de la guerre de Cent Ans. La France pense à sa reconstruction politique, l'Angleterre est à la veille de la guerre des Deux Roses et l'Espagne est en pleine Reconquista. La Portugal, de son côté, est à l'écart des marchés méditerranéens, il le sera d'autant plus après la chute de Constantinople en 1453 et la fermeture définitive des marchés orientaux. Il se doit de renforcer sa politique africaine. Le prince Henri le Navigateur, qui a clairement examiné les conditions historiques et géographiques de son pays, arrête un programme d'action en demandant son aide au savoir. La science coopère avec la politique. Rappelons-le, les Portugais vont très rapidement s'éloigner des côtes nord africaines. Les techniques navales s'améliorent (latitudes, navires à voiles carrées, gouvernail fixe, l'aiguille de la boussole fixée sur un pivot...). Puis il y a, dans la foulée, l'arrivée et le départ de Christophe Colomb.

Cette rencontre entre les intérêts politiques et la science souligne le rôle des institutions, le second acteur de cette histoire. Une de ses premières prérogatives fut sans doute d'assurer le retour des richesses provenant du Nouveau Monde, il fallait aussi satisfaire l'esprit entreprenant des états coloniaux et leur fournir des découvertes fructueuses. Les institutions, de manière trop évidente, furent incitées à soutenir ces projets et ces découvertes à la lumière de leur succès politiques et économiques, loin devant le souci de sauvegarder les équipages.

Revenons maintenant aux trois acteurs principaux de cette histoire, à savoir le navigateur, le savant (astronome/mathématicien) et l'inventeur (horloger). Pour le marin, le praticien de la navigation, la question des longitudes pouvait rester ouverte. Piloter un navire nécessite essentiellement de la pratique. Le but que l'on confiait à un capitaine était d'arriver à bon port, quelque méthode qu'il utilisât pour y parvenir. Il se trouve que l'expérience des vents, des courants, de la météorologie, de l'estime fonctionnait à peu près bien. On pourrait ajouter qu'à la base, le marin n'est pas un scientifique, il ne pouvait trouver seul une solution exacte. Celles proposées le furent en partie par des non-marins (les cartographes d'Henri le Navigateur, Galilée, Huygens, Frisius, Harrison...). Cependant, on se rend très rapidement compte que l'astronomie pourrait aider considérablement. Là, l'expérience ne suffit plus. C'est ici que le savant se joint à l'histoire des longitudes. L'astronomie touche au cosmos qui est du domaine des astronomes et des mathématiciens. Le savant s'empare alors du problème qui soudainement devient complexe. La navigation devient une activité dans laquelle l'astronomie et les mathématiques trouvent une réalisation immédiate. A la question à quoi sert l'astronomie ? on peut répondre : à se positionner sur Terre. Parallèlement, un système du Monde mécaniquement cohérent va peu à peu prendre forme. Une centaine d'années après la première édition des *Principia* de Newton, la théorie de la gravitation est confirmée indirectement par la méthode des distances lunaires.

Si l'astronomie fournit des solutions, on a résolu le problème sans réellement penser à son applicabilité : le champ scientifique ouvert par ces résultats reste imperméable au plus grand nombre. C'est justement ici que l'inventeur, l'horloger, prend place. On réalise dès les premiers modèles que les chronomètres prendront le dessus. Quoi de plus facile que de lire l'heure et de faire une soustraction ! Si le manque de régularité des horloges en est le plus flagrant défaut, il est en passe d'être résolu au moment où les difficultés théoriques du mouvement de la Lune le sont aussi.

Cette rencontre entre la science et les hommes de mer est cependant une des plus intéressantes qui soit, puisqu'elle a mené à la maîtrise de l'espace, à défaut de celle du temps. ●

Contact

Frédéric BRETAR

Institut Géographique National

Laboratoire MATIS

Mail: Frederic.Bretar@ign.fr

Bibliographie

Bretar, F. *Histoire de la détermination des longitudes de Ptolémée à Borda : Développements théoriques et mise en pratique. Application à la navigation.* Mémoire de DEA Epistémologie, Histoire des Sciences et des Techniques, 2004.

ABSTRACT

The observation of Jupiter satellites for the determination of longitudes on a ship, as we know, is a difficult task. The sailor, to overcome the myopia of its instruments and the instabilities of its floating deck, has no other choice but to turn his eyes toward the Moon. We are in the 18th century. We then realize how hopeful this century is to make progresses in the science of navigation. It is from this moment that the learned game begins, allying the meticulous observations of astronomers and the elegant developments of mathematicians, and that "the moving Moon shone finally for navigators of 18th century as a luminous needle on the celestial dial". An astronomical solution, indeed, but some men with clever hands, will build this so desired machine combining laws of the terrestrial mechanics (the chronometer), whose perpetuum mobile will be the guarantee of a universal time.

Merci les perses, adieu l'Iran...

Souvenirs d'une "brillante" et brûlante mission

■ Robert CHEVALIER

Les événements relatés ci-après ne sont pas vraiment du domaine de la topographie, mais plutôt un mélange de topo vécue, carnet de voyages et recueil d'anecdotes. L'objectif est de donner un tout petit aperçu de l'ambiance des missions de reconnaissance à l'étranger, de leurs péripéties et aléas, ainsi que de la personnalité réelle des populations autochtones que l'on découvre rarement dans les circuits touristiques, On verra dans ce genre de déplacement qu'il se passe davantage de choses en huit jours que dans une année entière de la vie de certains sédentaires...

1978 – L'entreprise de TP qui m'emploie reçoit un appel d'offres pour d'importants travaux d'études et construction de lignes THT en IRAN, où la révolution est en marche. Ce genre de consultation pouvait concerner des marchés d'études ou bien uniquement de construction, mais aussi des réalisations clés en main, de la topographie du tracé à la livraison de l'ouvrage prêt à fonctionner. C'était le cas de cet appel d'offres. En général, par souci d'indépendance, je préférais être consulté pour des études séparées, reconnaissant cependant que le gros avantage de ces marchés mixtes était la mise en œuvre de moyens d'investigation autrement importants pour la reconnaissance sur place, vu l'importance sans commune mesure, des sommes en jeu. C'était par ailleurs plus sécurisant de partir à plusieurs.

Ce fut le cas puisque la mission comprenait deux ingénieurs spécialistes des travaux de construction, dont un britannique bilingue, engagé pour ces marchés anglophones du Moyen-Orient plein de pièges. Plus un conducteur de travaux et l'auteur de ces lignes pour la partie études topographiques.

Cet appel d'offres parvint alors que j'étais en vacances en famille à Mandelieu, d'où l'obligation d'interrompre celles-ci, un cas de figure hélas, très fréquent dans la vie d'entreprise, celle-ci implique une disponibilité de tous

les instants en vertu de la règle qu'un cadre n'est pas payé pour respecter un horaire, mais pour accomplir une tâche.

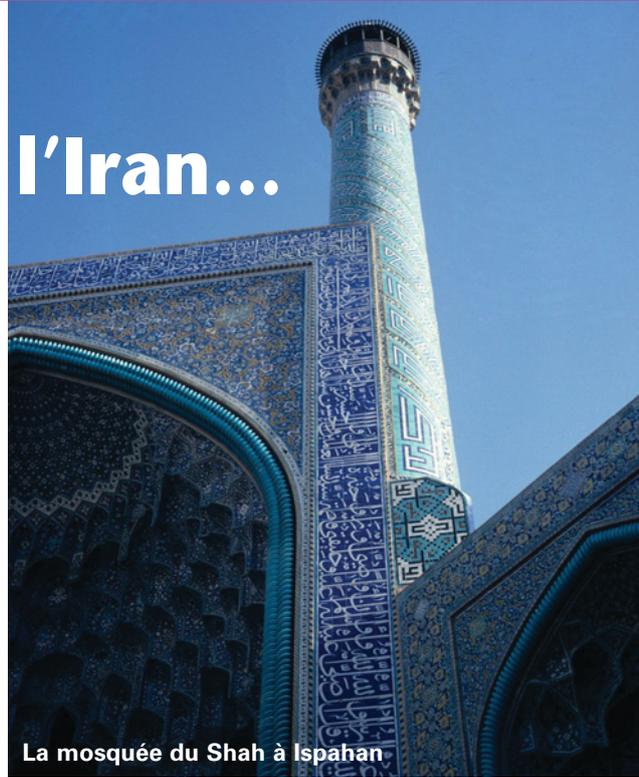
Bref, nous voici partis pour Téhéran. Rappelons que l'Iran était alors en pleine rébellion islamiste, ce qui ne facilita pas les choses et créa même parfois un sentiment important de stress.

Arrivés sur place, nous sommes accueillis par le représentant d'un cabinet d'affaires local que la direction avait choisi sur la base de je ne sais quelles informations et critères, pour nous servir de correspondant et d'assistance locale, condition essentielle pour faciliter les démarches. Ce ressortissant canadien s'appelle M. Brillant, mais il portera bien mal ce nom au cours de la mission.

Ensuite nous sommes restés deux ou trois jours dans la capitale pour établir des contacts, et recueillir des informations de toute nature comme à l'accoutumée. De ce début de séjour, je garde deux souvenirs anecdotiques :

D'abord, nous découvrons que dans cette ville moderne de six millions d'habitants, il n'existe pas d'annuaire téléphonique. Tout se passe par le bouche à oreille et par carnet d'adresses, l'explication fournie étant que les numéros changeaient sans cesse... Mais que de temps gaspillé en recherches laborieuses !

Ensuite, découverte d'une circulation automobile démentielle, ce qui se confirmera dans le reste du pays.



La mosquée du Shah à Isfahan

Au feu rouge, les moteurs rugissent dans le but d'être le premier à démarrer sur les chapeaux de roues. Il n'est pas rare que lorsque deux ou trois véhicules sont de front, et que celui le plus à gauche démarre plus rapidement, ce dernier tourne aussitôt à droite sans scrupules. Pour une fois, j'étais heureux de ne pas avoir à conduire, mais passons sur ces préambules pour entrer dans le vif du sujet.

Le projet se situe dans la région de YAZD, connue sous le nom de "capitale du désert", nom qui se justifia très vite. Il s'avérera que c'était une ville très pittoresque et homogène par son architecture d'origine.

Nous prenons donc l'avion pour cette destination, M. Brillant qui nous accompagne nous affirme qu'un 4 x 4 de location nous attendrait à l'arrivée, condition indispensable pour faire une bonne reconnaissance en terrain désertique, sans cartographie convenable.

Premier déboire, il n'y a aucun 4 x 4 à l'aéroport. Nous découvrons même qu'il n'y a pas non plus d'agence de location... Que faire ? En plusieurs groupes, nous entreprenons la tournée des garages de la ville, dans l'espoir de trouver le véhicule adéquat pour négocier son prêt à l'amiable.

Hélas, dans cette contrée reculée, peu de gens parlent anglais, mais seulement le farsi, la langue nationale qui n'a rien à

voir avec l'arabe, malgré une similitude apparente des caractères. Evidemment, M. Brillant ne parle que l'anglais...

De ces difficultés linguistiques naissent des quiproquos cocasses : on nous propose tour à tour, toujours avec beaucoup de bonne volonté : un tracteur agricole, une bêtaillère... Il semble qu'on ne connaisse pas les véhicules tous terrains. Faute de mieux et vu l'urgence, nous nous rabattons sur la solution taxi. Nous en trouvons un qui accepte de se mettre à notre disposition pour la durée de la mission. Evidemment, c'est un véhicule de tourisme, bien fatigué, de fabrication locale, tout juste assez spacieux pour les cinq personnes de la mission, serrées comme des sardines dans une chaleur caniculaire de 50°C, sans climatisation bien sûr.

La couleur locale est assurée par une floraison de pompons multicolores autour des fenêtres et du pare-brise accompagnés de diverses amulettes et grigris, destinés sans doute à nous protéger des dangers de la route. Il faut dire que nous en aurons bien besoin. Il s'avère que le chauffeur, malgré sa bonne volonté évidente n'a aucune expérience de la conduite dans le désert. Ce ne sont qu'enlisements successifs, qui étaient à prévoir avec ce véhicule inadapté et surchargé, auxquels s'ajoutent les multiples crevaisons avec une seule roue de secours, bien sûr. Heureusement, il y avait de la main d'œuvre à bord ! Nous nous résignons à n'emprunter que les pistes relativement praticables avec des incursions pédestres sur les zones les plus stratégiques, toujours sous un soleil de plomb.

Heureusement le terrain assez plat, homogène, tout juste un peu vallonné, apporte la présomption qu'un examen même succinct du paysage sera suffisant pour nous mettre à l'abri de surprises topographiques et géologiques.



Le fameux taxi.



Le début de la zone montagneuse.

Le paysage est parsemé de petits cratères parfaitement alignés qui permettent l'accès et l'aération des qanats, réseaux d'adduction d'eau profondément enterrés, extrêmement ingénieux, destinés à amener l'eau de ruissellement des montagnes environnantes sur des kilomètres jusqu'à la ville de YAZD ainsi que l'eau de condensation du sous-sol. Ce réseau créé il y a des siècles fonctionne toujours parfaitement bien.

Après ce secteur du projet relativement facile, nous devons reconnaître une zone beaucoup plus montagneuse, qui exclut d'usage du taxi. Grande perplexité, mais chance énorme : alors que nous allons repérer un poste de transformation d'où partiront les lignes projetées, nous pénétrons dans les bureaux pour nous présenter. Nous rencontrons un jeune ingénieur iranien pratiquant l'anglais, qui découvre notre embarras à propos du véhicule et qui nous dit connaître parfaitement le projet et propose de nous accompagner avec sa Land Rover. C'est une première preuve de l'extrême gentillesse des iraniens, nous en découvrirons bien d'autres !

Grâce à cet homme charmant, nous parcourons sans grosses difficultés durant deux ou trois jours les zones les plus difficiles des tracés. A l'issue de cette randonnée, ne sachant comment le remercier, nous l'invitons à dîner au restaurant, ce qui était un minimum. A notre surprise : refus poli. On nous expliquera plus tard que tous les iraniens, chargés de responsabilités, vus avec des étrangers durant cette période trouble, étaient surveillés par la SAVAC, police politique du Shah, ce qui risquait

de leur attirer des ennuis.

Durant ces trajets, nous avons l'occasion de nous approcher des sinistres "tours du silence" sur lesquelles les zoroastriens plaçaient les cadavres des humains, lesquels étaient déchiquetés par les vautours. Selon les croyances de cette religion, les prêtres venaient surveiller ce dépeçage et en tiraient des présages, selon l'ordre des membres dévorés.

Par exemple, si l'œil gauche était arraché le premier c'était néfaste, si c'était l'œil droit c'était de bonne augure ! Cette pratique barbare est maintenant interdite. Pendant ces différentes phases du travail nous logeons faute de mieux dans un hôtel près de YAZD qui avait du être confortable, mais qui était dans un état de délabrement avancé, la piscine sans eau était envahie par des herbes folles, la clim ne marchait plus. Mais nous sommes bien contents de nous reposer à l'abri devant une boisson fraîche après des trajets harassants, toujours sous une chaleur implacable.

Par manque de place, nous nous retrouvons à deux par chambre. Je suis en compagnie de mon ami et collègue anglais. La chaleur nocturne est telle que nous sommes obligés à tour de rôle d'aller nous asperger d'eau dans la salle de bains, toute la nuit entre deux sommes. Malheureusement, la pression d'eau est si faible qu'il nous faut nous coucher au fond de la baignoire pour être mouillés sur quelques centimètres. Quelles nuits...

Durant toute cette période se pose le problème aigu de la boisson. Evidemment dans les rares villages ou campements rencontrés point de bistro, mais heureusement comme dans tous les pays musulmans, l'hospitalité est de rigueur. Il suffit de frapper à une porte pour qu'on vous offre aussitôt de l'eau généralement fraîche comme provenant de puits très profonds.

Voici un autre épisode mettant en évidence l'incroyable gentillesse des populations locales : Nous partons généralement aux aurores pour éviter les grosses chaleurs, avec l'intention de faire la journée continue. Malheureusement, nos estomacs d'occidentaux ressentent parfois un petit creux en milieu de journée. Dans un village un peu plus important que les autres, nous recherchons non

pas un restaurant bien improbable, mais au moins un commerce où nous pourrions acheter quelques vivres. Nous nous adressons à un homme pour lui demander ce renseignement, il nous répond par le truchement de notre accompagnateur iranien : *"venez chez moi, j'ai ce qu'il vous faut."* Nous entrons alors dans une belle demeure caractéristique de la région, avec ses cheminées à vent et ses beaux jardins bien irrigués, montrant que nous avons à faire à un notable plutôt aisé. Celui-ci fait sortir les femmes, un serviteur étend une nappe sur le sol et y dépose des victuailles en abondance : gâteaux, fruits, miel, confiture, œufs durs etc.. A mon avis, une bonne partie des réserves que cet homme possédait. Assis en tailleur, nous nous restaurons sous l'oeil bienveillant du maître de céans qui lui ne consomme rien. On apprend ensuite que l'on était en plein Ramadan ! A l'issue de cette collation inespérée, sachant impensable de demander ce que l'on doit, je me risque à la question : *"que pourrait-on faire pour vous remercier ?"* Réponse incroyable : *"mon plus grand bonheur est de vous savoir heureux sous mon toit !"* Sans commentaire !

J'imagine la situation inverse : un étranger plus ou moins bronzé se présentant à la porte d'une maison de chez nous pour demander à manger ! Question de culture ancestrale chez ces descendants des Perses. Les plus civilisés ne sont pas forcément ceux que l'on croit... On peut dire : **merci les Perses.**

Après ces différentes péripéties, nous prenons avec notre fidèle, bien qu'inefficace chauffeur de taxi, la route d'Ispahan où nous devons rencontrer le maître d'œuvre qui a lancé l'appel



Les missionnaires au retour d'une journée de reconnaissance dans le désert.

d'offres, en quelque sorte l'EDF locale. Le trajet est relativement facile sur une route goudronnée, la circulation est faible, composée essentiellement d'énormes camions, tout couverts eux aussi d'amulettes, car l'essentiel des transports de marchandises se fait par la route. Nous observons le curieux et inexplicable comportement des chauffeurs qui nous suivent durant des kilomètres et entreprennent de nous doubler au sommet des côtes, là où il n'y a aucune visibilité. On comprend le rôle des amulettes porte chance !

A l'entrée d'Ispahan, dans un énorme embouteillage, alors que nous roulons au pas, un autocar bondé à craquer de gens et d'animaux en tout genre nous double sur la droite empruntant la berme et tressautant allègrement à chaque franchissement des saignées d'écoulement. Encore la logique iranienne, à moins que ce ne soit le désir d'arriver toujours avant les autres ...

Nous nous installons à l'hôtel Shah Abbas, aménagé dans les locaux d'un ancien caravansérail, un des cinq plus beaux hôtels du monde nous dit-on, choisi par M. Brillant pour cause de stan-

ding paraît-il, on n'en demandait pas tant ! (avait-il une commission sur les frais de mission ?). Luxe incroyable, décoration digne du château de Versailles, les hôtels se suivent et ne se ressemblent pas ! Question nourriture, caviar et saumon fumé à tous les repas, c'est le pays ; ça nous change de l'omniprésent chiche kebab ! Grosse ombre au tableau, alors que nous envisageons le soir une sortie pédestre en ville, on nous informe qu'il y a couvre feu à 20h et que passé cet horaire, les patrouilles de l'armée gouvernementale tirent sans sommation sur tout ce qui bouge. Il faut se souvenir qu'on est en pleine insurrection.

Le lendemain de notre arrivée, visite chez le client, en forme d'hommage. L'ineffable M. Brillant loue une énorme limousine américaine avec chauffeur, toujours question de standing, il faut montrer qu'on a les moyens ! RAS si ce n'est la surprise du directeur devant nos effectifs. Ensuite, on s'accorde une pause touristique. Visite de la fabuleuse place royale entourée de mosquées et palais plus raffinés les uns que les autres, classés au patrimoine mondial de l'humanité. Nos cathédrales n'ont rien à leur envier, question architecture et surtout décoration ! Passage obligé par le grand bazar, pour négocier quelques bijoux en turquoise, autre spécialité locale, à l'intention de nos épouses. J'envisage l'achat de tapis de prière en soie vraiment somptueux. Mais ils ne se vendent que par deux. Aussi avec un des collègues, on envisage d'en prendre chacun un, vu le prix. Il commence alors une longue et âpre négociation, à base d'affichage sur une calculette, servant en quelque sorte d'interprète numérique. Alors que l'on a obtenu un fort rabais, encore insuffisant à



L'hôtel Shah Abbas à Ispahan.

■ ■ ■ nos yeux, on croit malin de laisser pourrir la situation en allant déjeuner, dans le but de reprendre les pourparlers ensuite. Par malchance, on tombe sur un autre vendeur, avec qui il faut tout reprendre à zéro. Beaucoup moins arrangeant, il ne concède aucun rabais... Nous n'aurons jamais de tapis de soie dans notre salon !

Encore un petit incident qui aurait pu être catastrophique : une patrouille d'engins blindés traverse la place royale, notre collègue conducteur de travaux a la mauvaise idée de prendre des photos. Mal lui en prit, des militaires armés sortis de nulle part l'empoignent vigoureusement et l'emmènent. Le malheureux ne parle pas anglais et encore moins le farsi ! Je me risque à prendre sa défense avec mon modeste vocabulaire et explique à ces bidasses zélés qu'il photographiait une mosquée qui était juste derrière. Après de nombreuses palabres, ils acceptent cet argument et le relâchent sans versement de rançon, fait exceptionnel.

Quelle émotion ! Tout ceci montre l'extrême tension qui règne lors d'une situation insurrectionnelle. Pendant toute la mission on ressent partout, sauf dans le désert bien sûr, cette pression extrêmement angoissante et pouvant engendrer parfois un réel danger.

Sans autres incidents notables, la mission prend fin après huit jours sur place, durée habituelle de ce genre d'intervention. Je rejoins ma famille sur le lieu de vacances par un vol direct Téhéran Nice, que j'ai attrapé de justesse sur le tarmac, à cause de tracasseries policières de dernière minute. Les autres rallient le siège de l'entreprise avec tous les éléments pour mettre en forme le dossier de soumission (gros travail préalable occupant les soirées à l'hôtel après des journées épuisantes).



Négociations ardues mais souriantes à Téhéran.

En guise de conclusion, je voudrais faire part en vrac, de quelques remarques et enseignements, issus de ce que j'ai perçu sur place :

Côté topographie, le projet se partage entre une zone désertique relativement plate et une zone montagneuse extrêmement aride et accidentée. Pas de végétation bien sûr, c'est déjà ça. Les difficultés sont accrues par l'insuffisance du réseau géodésique et des points de nivellement. Ajoutons à cela d'énormes problèmes d'intendance et de logistique, mais le propos n'est pas de parler technique.

Malgré, les quelques faits cités, relatifs à l'amabilité des populations (surtout hors des villes, comme partout), il ne faut pas en déduire que *"tout le monde il est beau, tout le monde il est gentil"*. Comme on dit dans ce métier, *"il n'y a pas de sales pays, il n'y a que des sales gens"* et cela est une constante sous toutes les latitudes, mais heureusement, les gens agréables sont de loin majoritaires. Les personnes "embêtantes" sont le plus souvent celles qui portent un uniforme et qui abusent de leur pouvoir, surtout quand elles sont armées. Il faut souligner qu'à peu près partout les plus démunis sont les plus accueillants. Ils n'ont rien et ils donnent tout. Il ne faut pas par ailleurs juger au vu des images télévisées montrant des foules vociférantes et brandissant des Kalachnikov, que tout l'Iran est ainsi. On ne voit comme toujours que ceux qui s'agitent.

Les problèmes linguistiques nous ont un peu handicapés, mais là aussi, il faut faire un constat : l'essentiel de la population, surtout en milieu rural, ne parle que sa langue natale, les gens un peu plus évolués, les commerçants, les hôteliers et restaurateurs, parlent généralement tous assez bien anglais par nécessité. C'est la langue du business.

Enfin les élites, les intellectuels parlent très souvent, en plus, le français et parfois fort bien.

C'est une constatation faite dans de nombreux pays, notamment à l'occasion de manifestations internationales. Même si ça se perd, c'est rassurant pour les défaitistes chroniques que nous sommes.

Autre certitude : le support d'un correspondant local est absolument nécessaire, du fait des innombrables pro-



Une tour du silence.

blèmes locaux, que seul un ressortissant du pays concerné peut (plus ou moins) décanter.

En Iran, ça porte le nom très éloquent de "démerdari". Celui que nous avons choisi ne méritait pas ce titre !¹

On peut enfin se demander comment un pays aussi évolué a pu ensuite tomber si bas, mais ceci est une autre histoire, qui n'est pas de ma compétence. Pour en finir avec cette affaire, il faut dire que peu de temps après notre retour, l'ayatollah Khomeiny est rentré en Iran et la révolution a pris des proportions considérables, avec la suite et l'épilogue que l'on sait. Au dépouillement des offres, nous étions deuxième et donc non adjudicataires.

Adieu l'Iran et nos belles espérances ! Mais jamais on n'avait été aussi peu déçus de ne pas obtenir un marché malgré les dépenses engagées et l'énergie déployée. Trop de problèmes et de risques même avec la COFACE...². De toute façon, je crois que l'affaire ne s'est jamais réalisée du fait des événements.

Bien d'autres missions que j'ai effectuées seul ou en équipe, dans des régions parfois plus incertaines, avec autant ou davantage de péripéties ne seront jamais racontées, non parce qu'elles ne sont pas convenables, mais afin qu'il n'y ait pas d'incidents diplomatiques à cause des soucis et avatars que l'on y rencontre du fait des autorités et des régimes en place.

Encore faudrait-il qu'XYZ y soit lu...

Au fait, j'ai retenu un seul mot d'iranien, **merci** comme en français ! ●

(1) Quelques uns de ces problèmes spécifiques ont été relatés dans un article "travailler à l'export quelques tuyaux" publié dans XYZ n° 80

(2) COFACE : organisme assurant les entreprises contre les risques imprévisibles, propres aux travaux à l'étranger.

Voyage technique en Grèce des élèves ingénieurs Topo de l'INSA de Strasbourg

■ Gilbert FERHAT, enseignant chercheur INSA de Strasbourg

Un moment particulier de la vie des 27 étudiants Topo en 2^e année à l'INSA de Strasbourg est le traditionnel voyage technique ponctué de visites d'entreprises liées à la topographie. Cette année, il a eu en plus une découverte de la culture grecque via l'association Athéna proposant principalement des séjours et visites pour les écoles. Un programme très chargé a été établi avec un guide local.

C'est dans les murs du Musée National d'Archéologie d'Athènes que l'on ressent réellement une partie de la richesse du passé de la Grèce ; ce musée recèle en

effet une mine de trésors provenant de tous les sites archéologiques fouillés depuis le néolithique jusqu'à l'époque romaine. Y sont exposés les pièces et statuettes des premiers habitants des Cyclades, assiettes et vases en marbre, statuettes de joueurs de harpe et de lyre, dents de sangliers pour orner les casques, colliers d'ambre, etc. Des tablettes en écritures linéaires A et B (écritures anciennes adaptées par les Mycéniens, civilisation précédent celle des Grecs) retranscrivent les actes administratifs et de ventes – on ressentait déjà la nécessité d'archivage. Ces écrits et les matériaux employés pour la fabrication d'ornements et bijoux (cuivre de Chypre, or et ivoire d'Égypte...), montrent clairement les échanges commerciaux à travers la Méditerranée et aussi le rayonnement de la Grèce dans le bassin méditerranéen.



Notre groupe au pied du Parthénon.

- ■ ■ Une des pièces majeures de ce musée est sans doute la découverte faite par Heinrich Schliemann, un riche commerçant passionné par Homère, d'une tombe aux 19 corps à Mycènes et ses trésors dont le masque mortuaire en or attribué au légendaire roi d'Agamemnon (roi de Mycènes qui partit avec son frère Ménélas récupérer Hélène enlevée par Paris - récit de la guerre de Troie).

La Grèce antique : référence intellectuelle, esthétique et politique

Chaque ville formait une cité-Etat comme Athènes, Sparte... La notion d'Etat-Nation n'était pas encore aboutie bien qu'une certaine idée de la même appartenance au monde hellénistique se retrouve à la fois dans la mise en commun de l'effort de défense contre les envahisseurs venus d'Orient et dans la vénération commune de culte des sites comme Delphes. Pour prendre un peu de hauteur dans cette cité plus que millénaire, l'Acropole (littéralement la cime, le bout de la ville) offre à la fois un panorama de la plaine de l'Attique – région d'Athènes et de l'urbanisation de la ville. A la fin du VI^e siècle, la ville d'Athènes est encore très modeste il est d'autant plus important de le souligner qu'à notre époque que les visiteurs découvrent aujourd'hui une agglomération monstrueuse qui rassemble le tiers de la population grecque dans une atmosphère trop souvent polluée. Sur l'Acropole dédié à la déesse Athéna se trouve le Parthénon : vaste temple dorique de 69,51 m sur 30,87 m (soit 225 sur 100 pieds attiques) avec 8 colonnes en façade et 17 sur les côtés, hautes de 10,43 m et avec un diamètre de 1,90 m à la base et 1,48 m au sommet. Cet ensemble est mis en valeur par l'entrée majestueuse que sont les Propylées.

Visites de l'Université d'Athènes et du pont Rion-Antirion

Ce séjour à Athènes a été aussi l'occasion de voir les installations olympiques toutes récentes et de visiter la *School of Rural and Surveying Engineering* de l'Université d'Athènes. Cette faculté constituée d'une dizaine de laboratoires forment environ 100 étudiants par an et par Licence dans des domaines de la topographie, de la géographie et aménagement du territoire et environ 25 étudiants (niveau Master) en géomatique. Partons maintenant plus à l'ouest, sur la route du Pont Antirion-Rion qui enjambe le golfe de Corinthe, on découvre un haut lieu de culte ancien : c'est le site de Delphes. Selon la légende, c'est Apollon qui se serait transformé en dauphins (d'où le nom de Delphes) pour détourner un navire et amener ses occupants sur ce lieu qui fait face au Mont Parnasse – domaine des Dieux. Laissons de côté les Dieux de Delphes – Apollon et Dionysos – et aussi Œdipe qui était venu lui aussi à Delphes consulter l'oracle la Pythie, pour nous rendre dans la région où le détroit du golfe de Corinthe n'est que de 3 km. Il s'agit des villes de Rion et en face (préfixe anti) Antirion. Depuis longtemps, on souhaitait ériger un pont entre ces deux villes, c'est n'est que très récemment qu'a été édifié un pont à haubans à 4 pylônes par des sociétés grecques et la société française Vinci. La visite technique de ce pont est



Le pont Antirion-Rion, un défi aux séismes.

admirablement illustrée sur la toile (www.gefyra.gr) qui retrace les moments forts de la construction depuis juin 1998 jusqu'à la date du 7 août 2004. Ce détroit conjugue des conditions physiques difficiles : à savoir une profondeur d'eau de 65 m, des fonds marins constitués de sédiments - renforcés par des pieux de 30 m et couverts de 3 m de graviers, une activité sismique importante – le golfe est en fait un rift en activité, on y observe un séisme de magnitude entre 5 et 6 tous les ans dans sa partie orientale. Plusieurs campagnes de géodésie et de métrologie ont été et sont organisées régulièrement pour suivre la mise en place de l'ouvrage et ses déformations dans le temps.

Sur la route sud du golfe de Corinthe, d'autres sites archéologiques nous ont été commentés par notre guide Kostas, à savoir : l'ancienne Corinthe, une ville rivale dans l'Antiquité d'Athènes et de Sparte, Mycènes et ses murs cyclopéens, Epidaure – domaine du dieu de la médecine Asclépios – et son célèbre théâtre de 14 000 places encore utilisés de nos jours. Le dernier jour de cette semaine chargée a été l'occasion de se rendre sur une île au sud d'Athènes, Egine – première capitale de la Grèce – et d'admirer la mer Egée depuis les hauteurs du temple d'Aphaia. ●

ABSTRACT

This paper reports the technical and cultural trip to Greece during one week early April 2005 organized by 27 students at the Department of Engineering Surveying at INSA, National Institute of Applied Sciences at Strasbourg, France. We visited the School of Rural and Surveying Engineering of Athens University, the Antirion-Rion bridge crossing the 3 km Corinth Gulf strait. This was also the opportunity to visit the many archeological and historical sites such as the Acropolis, Delphi, Mycenae, ancient Corinth, Epidavros and Aegina.

Ny voky tsy mahaleo ny tsaroana

■ François BODIN

Le remerciement n'est pas toujours chose aisée à manifester, particulièrement quand il risque de faire des jaloux, d'apporter des regrets ou d'oublier celui qui a peu donné mais pour qui l'obole dépassait son superflu... et pourtant il faut bien un jour se jeter à l'eau parce que sans donateurs les missions de GSF n'existeraient pas. Bien sûr il y a les bénévoles, mais eux ont parfois leur photo dans le journal et surtout leurs souvenirs au fond du cœur, cet enrichissement incommensurable (au sens de ce que l'on ne peut mesurer) qu'ils garderont pour toujours.

A lors parcourons un peu la chaîne de solidarité qui s'est nouée autour de GSF, en la limitant au cadre professionnel puisque le bureau de notre association ne souhaite pas avoir recours aux subventions publiques.

Les plus visibles parce que leur aide est d'abord matérielle, qu'elle est directement utilisée par nos correspondants : Leica et EDF (ancienne division topographieTours) pour leurs dons de matériel de terrain, qui rejoignent quelques géomètres-experts désirant garder l'anonymat, COVADIS pour ses tarifs extrêmement privilégiés qui permettent à l'association d'équiper des écoles en logiciels performants.

Les plus fidèles dans la durée et dont on ne parle jamais : le Conseil Régional de l'Ordre des Géomètres-Experts d'Orléans pour sa subvention annuelle conséquente et l'Association Française de

Topographie pour son adhésion annuelle au tarif maximum et pour l'ouverture de ses colonnes.

Les nouveaux venus qui apportent leur soutien depuis notre ouverture vers les jeunes en favorisant leurs missions : UNGE et Conseil Supérieur de l'OGÉ pour leurs subventions à Géo-Topo International, ESGT pour ses prêts de matériel topographiques.

A vous tous, professionnels, fournisseurs de matériel ou logiciel, qui regrettez certainement de ne pas figurer dans cette liste de remerciements, ne perdez pas espoir : nous prévoyons très bientôt d'organiser un voyage d'étude, en principe vers Madagascar à l'occasion de la mise en place d'une organisation professionnelle dans ce pays, à la découverte de nos confrères locaux avec quelques conférences à destination des élèves géomètres, éventuellement parti-



TP terrain.

icipation à des soutenances de mémoire. Nous aurons alors besoin de matériel ou de logiciels à emporter, de conférenciers avisés ou de toute autre aide ; la chance d'être "installés" depuis longtemps nous permet de partir gratuitement, de donner vraiment quelques heures de notre temps ou quelques euros de notre poche pour soutenir moralement et physiquement nos amis du bout du monde en attendant de les recevoir à notre tour.

Alors en attendant de vous compter à nos côtés sur place pour apprendre quelques mots de malgache, voici, en guise de remerciement à tous nos soutiens, la traduction du proverbe donné en titre : *Le souvenir qu'on vous porte vaut mieux que le présent lui même.* ●



Soutenance réussie



TP informatique.

Geneviève Claisse : Le

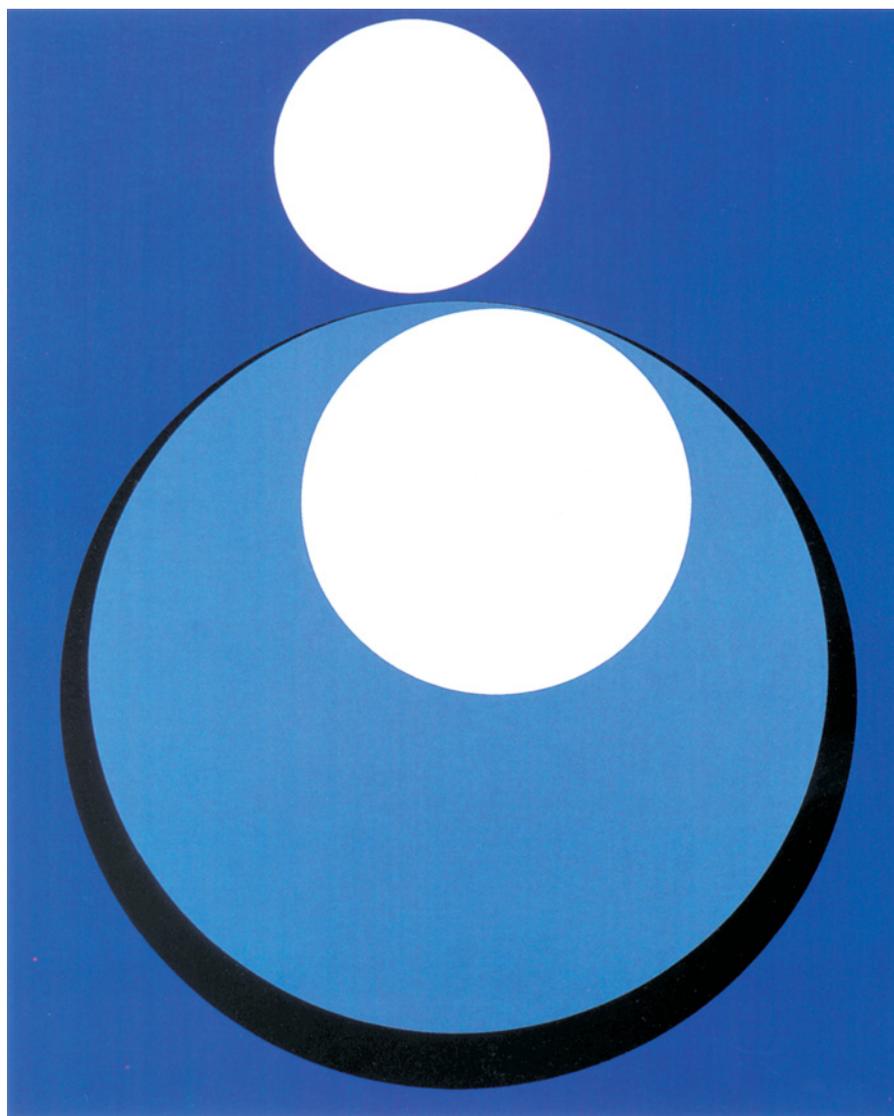
■ **Jean-Pierre MAILLARD**

Les dix-neuf rubriques "Art et géométrie" déjà parues ont chacune traité une œuvre insérée dans un lieu public (musée, mairie, église, espace vert, rond point, etc...).

Il est plus que temps d'ouvrir les portes des galeries privées, de saluer leurs initiatives et leur rôle de médiateur entre le créateur, l'amateur, le mécène ou la collectivité publique.

Si le cœur y invite, aucune raison d'interdit de franchir le seuil d'une porte ouverte sur les arts plastiques puisque l'entrée est libre. Dans un monde marchandisé il est notable que le galeriste laisse encore apprécier son exposition sans rien lui demander a priori. Ce n'est déjà plus vrai à la Foire internationale de l'art contemporain de Paris (FIAC) car pour voir cette même présentation il vous faut déjà payer un droit d'entrée.

A Paris, le quartier du Marais est un lieu chargé d'Histoire et garni d'hôtels particuliers qui honorent l'architecture du passé. Nombre d'entre eux constituent une part significative du patrimoine de la ville. Certains sont devenus des lieux de savoir et de collection ouverts au public notamment l'hôtel de Salé, dédié à la peinture, puisqu'il accueille le musée Picasso. La création de ce musée et celle du Centre Pompidou ont suscité l'implantation de nombreuses galeries qui présentent en écho des œuvres résolument contemporaines et soulignent la dimension "Arts plastiques" du III^e arrondissement de la capitale.



Unité bleu. 1970. Acrylique sur toile. 162 x 130 m

Galerie Denise René

Ainsi rue Charlot au n° 22, on peut entrer dans la galerie Denise René. Depuis son ouverture en 1944, alors rue La Boétie, elle promeut l'abstraction constructive, le sujet d'Art et géométrie. Au fil des années, Denise René a fait connaître de nombreux artistes dont XYZ a parlé tels Agam, Dewasne, Di Teana, Herbin, Kowalski, Tomasello ou encore Vasarely. Tout comme Geneviève Claisse cette fois, bien d'autres suivront

à leur tour, on pense en particulier à Jésus Raphaël Soto et Aurélie Nemours récemment disparus.

Le mérite de Denise René est d'avoir, avec audace, fait connaître Mondrian au public français et organisé, en avril 1955, une exposition intitulée "Le Mouvement" qui trace la voie au cinématisme, cette expression plastique changeante selon le point de vue, une véritable novation au même titre que le cubisme par exemple. La notoriété

cercle de la galerie

considérable de la galeriste, de New York à Copenhague, de Dusseldorf à Bâle a conduit en 2001, le Centre Pompidou à lui rendre hommage dans une rétrospective intitulée *"Denise René l'intrépide, une galerie dans l'art abstrait 1944-1978"*.

"Cercle" et "Unité"

Dernièrement, une sélection d'œuvres de Geneviève Claisse était accrochée aux cimaises de la galerie. Deux séries figuraient en bonne place : "Cercle" et "Unité". Les peintures sont minimalistes. Trois ou quatre cercles, quatre couleurs pas plus. Ce dépouillement pourrait d'aucun d'interroger sur la nature même des toiles : sont-ce des œuvres d'art ?

Chaque sujet est traité de nombreuses fois dans la même recherche d'équilibre entre les couleurs, différentes à chaque fois, et les formes qui les reçoivent. Le soin apporté à la réalisation des aplats, méticuleux et plein de rigueur, souligne l'obsession de la perfection. La répétition porte la marque de la maîtrise et démontre bien qu'on est dans le champ de l'expression artistique, les effets produits par les tableaux étant variés. Telle composition suggère des mouvements convergents, telle autre des mouvements irradiants ou encore une impression de profondeur. L'artiste entraîne dans l'abstraction pure ce que confirme le commentaire de Denise René à son sujet : *"Geneviève Claisse fait partie des créateurs qui ne se soucient guère des modes et des pressions extérieures et poursuivent avec cohérence leur recherche et l'expression de leur vérité plastique. Le fait qu'elle soit une femme donne comme à ses grandes devancières – Popova, Sonia Delaunay, Sophie Taeuber-Arp – une dimension supplémentaire à son combat pour imposer son œuvre"*.

Geneviève Claisse

Née en 1935 à Quiévy, près du Cateau-Cambrésis, Geneviève Claisse est devenue peintre parce que très tôt, *"elle a rencontré l'abstraction"*.

C'est donc une autodidacte de dix-huit ans qu'Auguste Herbin (*XYZ n° 102*) rencontre, lors d'un passage au Cateau et encourage à persévérer.

Indépendamment de la découverte d'un lien de parenté, Auguste Herbin se trouvant être son arrière-grand-oncle, Geneviève Claisse devient six ans plus tard l'assistante du maître de l'abstraction cubiste. Celui-ci lui apprend la discipline et conforte son exigence de rigueur. Puis elle s'est progressivement dégagée de l'influence de son aïeul sauf à rester dans son ombre. Ce dernier ne l'aurait d'ailleurs pas voulu puisqu'il a déclaré : *"le destin et la génétique m'ont permis de rencontrer le continuateur espéré"*. Dès lors, dans le

même registre que "Cercle" et "Unité" l'élève adoubée réalise des séries dont les titres composent un vocabulaire personnalisé : "Florence", "Turin", "Contralto", "Adagio", "Knack", "Brusc", "Vian", "Rissesly", "Nucléon", "Quark", "H" etc. La recherche de Geneviève Claisse l'a ensuite amenée à s'extraire des formes géométriques et des couleurs pour traiter des lignes brisées parallèles, noir sur fond blanc, courbes de niveau schématisées qui finissent par sortir de la toile sous la forme de sculptures filiformes ou d'agencements de néons.

Manifestement, l'art de Geneviève Claisse est très personnel. Il ne trouve pas de source dans une formation académique qu'elle n'a pas eue. De même il ne peut être confondu avec aucun autre. Il est remarquable que sa vie soit toute entière consacrée à l'abstraction, à la recherche de l'absolu entre l'intensité d'un rouge et celle d'un trait épuré. ●



Cercle - 1969 - 100 x 100 cm - Huile sur toile