

xyz

*Association
Française
de Topographie*

2^e Congrès

International de la
TOPographie

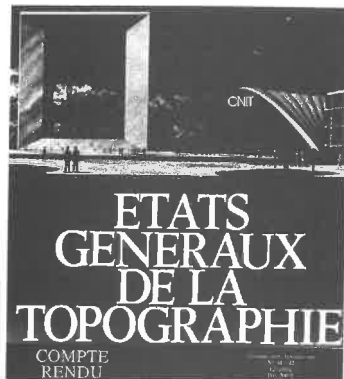


ETATS GÉNÉRAUX DE LA TOPOGRAPHIE

COMPTE
RENDU
2^e CITOP

PREMIERE
PARTIE

OCTOBRE 1989 - JANVIER 1990
N^{os} 41 - 42
12^e année
Prix 200 F
ISSN 0290 - 9057



TRIMESTRIEL

Le numéro : 105 F
L'abonnement d'un an
(4 numéros) : 400 F
Secrétariat de l'AFT
et Rédaction XYZ

136 bis, rue de Grenelle,
75700 PARIS
Tél. : (1) 43.98.80.00
poste 7690

Ouverts les mardi et vendredi
de 10 h à 12 h

COMITE DE REDACTION RAPPORTEUR

André BAILLY
Ingénieur ETP

MEMBRES

Jean COMBE
Ingénieur ESGT
Guy DUCHER
Ingénieur Général Géographe
Jean-Jacques LEVALLOIS
Ingénieur Général Géographe
Jean PUYCOUYOUL
Ingénieur E.P.
Michel SAUTREAU
Directeur divisionnaire honoraire
du Cadastre
Roger SCHAFFNER
Géomètre DPLG
Bernard SCHIRUMPF
Ingénieur Général
de l'Armement
Robert VINCENT
Ingénieur E.C.P.

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION

André BAILLY

IMPRIMERIE MODERNE

USHA
AURILLAC 15001
Tél. : 71.63.44.60

L'Association Française de Topographie n'est pas responsable des opinions émises dans les conférences qu'elle organise ou dans les articles qu'elle publie.

Tous droits de reproduction ou d'adaptation sont strictement réservés.

XYZ

sommaire

	Page
COMPTE RENDU DU 2^e CITOP n°s 41-42 (1^{re} partie)	
— De la pyramide du Louvre à la Grande Arche, par Jack BIQUAND	3
— Allocution d'ouverture du président de l'AFT, Roger SCHAFFNER	5
— Ouverture du Congrès - Jean CHAPON, IGPC, président du CORGEC, M. Thiébault, IGPC honoraire	7
— Quelques impressions personnelles sur le 2 ^e CITOP	13
Instruments et Méthodes	
— 1 ^{re} Séance - Présidents MM. CHAPON et THIEBAULT	
— Panorama de l'instrumentation moderne en topographie, par Michel KASSER, Ingénieur Géographe en Chef, IGN France	17
— Panorama de la photogrammétrie moderne, par Otto KÖLBL, Ecole Polytechnique Fédérale, Lausanne	19
— Evolution du réseau géodésique national, réalisation, maintenance et utilisation par technique de géodésie spatiale, par J.-J. LEVALLOIS, IGG honoraire, C. BOUCHER, IGC-IGN, P. WILLIS, IG-IGN. France	40
— 2 ^e Séance - Président Jean DENEGRÉ, secrétaire général du CNIG, Allocution	53
— Evolution des techniques et méthodes de la géodésie industrielle, par C. LASSEUR, M. MAYOUD, J.-P. QUESNEL, Laboratoire Européen de Physique des Particules, CERN. Suisse	55
— Les bases de données topographiques et cartographiques de l'IGN, par Loïc PRESSENSE, IGC-IGN, Christian FAAD, IG-IGN, et Marie-Noëlle SCLAFFER, IG-IGN - France	65
— Sciences géographiques, connaissance du monde et conception de l'univers dans l'antiquité, par Raymond d'HOLLANDER, IGG - (2 ^e partie : Sciences géographiques durant la période grecque)	83
COMPTE RENDU DU 2^e CITOP n°s 43-44 (2^e partie) à paraître	
Informatique et topographie	
— 3 ^e Séance - Président M. BOURGOIN, Ingénieur Général de l'Armement honoraire	
— Allocution : A propos du 2 ^e CITOP	
— Systèmes d'informations numériques du territoire, par M. EICHHORN, T.H. DARMSTADT RFA	
— La carte marine électronique, par M. LAPORTE et M. SOUQUIERE, SHOM. France	
— Flash sur les formats d'échanges, par M. ALGRAIN, Géomètre-Expert, France	
— Utilisation de l'Imagerie satellite pour la cartographie, par M. Fleury, CSI, France	
ESPACE TOPOGRAPHIQUE EUROPEEN	
— 4 ^e Séance - Président M. BOURCY, secrétaire général du Comité de liaison des Géomètres Européens	
— La formation en topographie : évolution de l'enseignement, équivalence de diplôme, comparaison des formations, par M. de PREESTER, Inspecteur Général de l'Education Nationale, France.	
— Le développement de la profession de géomètre et de topographe dans l'espace européen, par M. de Graeve - Belgique	
— Synthèse du congrès, par Guy Ducher, IGC, IGN - France	
— Réception à l'Hôtel de Ville de Paris : Allocution de M. Philippe CHAIX, conseiller de Paris	
— Allocution réponse du président SCHAFFNER	
— Sciences géographiques, connaissance du monde et conception de l'univers dans l'antiquité, par Raymond d'HOLLANDER, IGG	
(3 ^e partie : Géographie et astronomie grecques durant la deuxième moitié du V ^e siècle et le IV ^e siècle av. JC)	

SIG-GIS

EUROPE 90

**Conférence et Exposition
Européennes sur les Systèmes
d'Informations Géographiques**

**European Conference
and Exhibition on Geographic
Information Systems**

**19-22 juin 1990
June 19-22, 1990
Palais des Congrès
Porte Maillot, Paris**

Organisé par /
Organized by



Bureau International
de Relations Publiques



The World Computer
Graphics Association
Institut for Land
Information Systems

avec le support de /
Sponsored by



Conseil National de
l'information Géographique



Association of
American Geographers



Association
Française Micado

A renvoyer à / To send back to: BIRP - 25, rue d'Astorg 75008 PARIS - FRANCE
Téléphone / Phone : (33-1) 47.42.20.21 - Télex : 643 982 F - Fax : (33-1) 47.42.75.68

M./Mme / Mr/Mrs _____
Société / Company _____ Fonction / Function _____
Adresse / Address _____
Pays / Country _____
Téléphone / Phone _____ Fax _____
Télex _____

Je désire recevoir / Would you please send me:

- ☐ le dossier de l'exposant / the brochure and contract of participation as exhibitor
- ☐ des invitations / some invitations
- ☐ le programme des conférences / the program of the conferences

DE LA PYRAMIDE DU LOUVRE A LA GRANDE ARCHE



De la pyramide du Louvre à la Grande Arche de la Défense, tout le passé d'une ville et d'un pays. La volonté aussi d'être présent dans le futur.

A l'apogée de cette longue avenue rectiligne, au débouché de cet axe lourd d'Histoire qui coupe Paris en deux, la ville se clôt et s'ouvre par une échancrure sur l'espace. Les concepteurs ont voulu ce dialogue avec le ciel au point d'y glisser un nuage.

Le deuxième Congrès International de la Topographie s'est emparé de ces symboles avec sérénité.

Pour s'ancrer dans l'histoire, le congrès se proclame Etats Généraux de la Topographie. Comme arène pour ses débats, il choisit le lieu qui symbolise avec hardiesse le futur. Et, à cet endroit où le CNIT lance sa courbe dans l'espace en réponse aux verticales de l'Arche, le deuxième CITOP s'installe pour trois jours, comme chez lui. L'Association Française de Topographie a une haute idée de la topographie. Elle profita d'ailleurs de cette occasion pour souffler les dix premières bougies de son existence consacrée à cette technique vieille comme le monde.

Vieille comme le monde puisque la topographie naquit dès que l'homme regarda autour de lui, dès qu'il sut mesurer un angle et une longueur, dès qu'il sut s'orienter pour se situer dans l'espace. Liée à de nombreuses activités humaines, la topographie est la compagne des recherches et découvertes scientifiques, elle est, elle aussi, dévoreuse d'ordinateur et d'informatique, mangeuse de laser et de satellites artificiels.

Dans cette expression universelle de la topographie la France a toujours occupé une place de choix. Col-

bert en fit une affaire d'Etat dès le 17^e siècle, et c'est dans notre pays que les Cassini s'illustrèrent. La présidence du comité d'honneur de ce deuxième CITOP ne le dément point puisqu'elle fut assurée par un membre éminent de l'Académie des Sciences, le professeur Henri Lacombe, et que les autres membres de ce comité couvrent le large spectre qui va de l'astronome au géomètre, du CNRS au CNIG, du SHOM à l'IGN.

Tout ce qui mesure, calcule, cartographie, situe dans l'espace, se côtoya pendant trois jours sous le regard vigilant de l'AFT et de son président Roger Schaffner, sous la surveillance inflexible du comité d'organisation, Michel Sautreau, Jean Combe, Jean Fleury, Jean Boutonnier, Robert Vincent, Edmond Barbacanne, Raymond d'Hollander, Jacques Tassou, Didier Kopf, Dominique Vinot, et de son directeur André Bailly, l'infatigable.

Du géodésien au photogrammètre, du géomètre à l'hydrographe, de l'expert foncier à l'ingénieur, le congressiste pouvait se frotter à la fine fleur de la topographie. Tel ce jeune homme rencontré sur l'exposition et si fier d'avoir dialogué avec Jean-Jacques Levallois dont un autre disait qu'il avait moins changé en quarante ans que la géodésie qu'il professe. Ou cet autre encore qui, à l'occasion d'une collation au bar, posait des questions au professeur suisse Otto Kölbl sur le cadastre. Ou bien encore Michel Kasser très entouré hors séance par de jeunes élèves qui en voulaient sans doute aux lasers de son Géoran. Ou également le professeur Gerhard Eichhorn de Darmstadt improvisant sur les marches du congrès une mini-conférence.

A chaque détour de séance, arpentant les couloirs de l'exposition, on rencontrait celui qui incarne à lui tout seul la topographie, qui est l'image résumée de cette science et de son histoire. Raymond d'Hollander. On rencontrait Claude Boucher, monsieur Géo-désie, si bien à son aise dans son métier d'ingénieur de la mesure. Guy Ducher, discrètement, mais inlassablement présent, prenant sans cesse des notes, et qui conclura les débats. Jean Chapon, l'Ingénieur général des Ponts et Chaussées et Président du Congrès, les présidents de séance M. Thiébault, autre Ingénieur Général des Ponts, M. Bourgoïn, Ingénieur général de l'Armement, Jean Denègre le secrétaire du CNIG, M. Bourcy, le secrétaire du Comité de liaison des géomètres européens. Claude Martinand, tout frais ancien directeur de l'IGN, puisqu'il fut nommé en octobre à la DAEI du ministère de l'Équipement.

Toute une confrérie internationale au centre des trois phases du congrès : les instruments et méthodes, informatique et topographie, l'espace topographique européen.

Toute une confrérie comme pivot des trois axes de l'exposition : l'espace historique, l'espace scientifique et technique, l'espace industriel.

Echanges et contacts sont les deux vertus essentielles qui rendent indispensables de telles rencontres. Car, même si les hommes et les organismes ne s'ignoraient pas, le contact humain donne à leurs rapports la dimension indispensable. C'est le Z de la relation professionnelle.

La profession consomme du topographe. Une confrontation des générations permet la transmission du savoir et soude la technique en un fil continu. Les jeunes visages étaient nombreux dans la salle de conférence et les écoles de géomètres et de topographes, les universités, avaient délégué leurs jeunes pousses. Face aux vieux routiers de la profession, imbibés de topo, l'œil en tachéomètre, toute une jeunesse verte qui tend la main pour reprendre le flambeau, pour chausser les godillots.

Une jeunesse au spectre un peu différent de leurs anciens, car si la topographie fut longtemps un métier féroce masculin, ces dames entrent par la grande porte dans la profession, et les silhouettes féminines ponctuaient l'assemblée avec bonheur, y compris parmi ses intervenants à la tribune.

Une jeunesse qui n'en a pas fini avec les problèmes posés par l'enseignement d'une part et par l'ouverture du marché européen d'autre part. Deux communications devaient s'en faire l'écho. L'une de l'Inspecteur Général de l'Éducation Nationale Roger de Preester tentait de mettre de l'ordre dans l'imbricatio de l'enseignement français en la matière, confronté aux besoins professionnels. L'autre du géomètre-expert immobilier Jean de Graeve sur le développement de la profession dans l'espace européen montrait à l'évidence la complexité des situations de fait dans les nations concernées. Hors du problème de l'équivalence des diplômes et des niveaux, les monopoles, les confidentialités, les traditions, la culture et l'histoire, exigent que soient franchies bien des étapes pour une réelle circulation du marché, pour un vrai secteur commun.

La France berceau de la topographie ? Pourquoi pas ! Non que nous voulions annexer Eratosthène, mais l'intérêt qu'y ont toujours accordé nos gouvernants pourrait nous le laisser espérer. Témoin, la ville de Paris et son maire qui avait délégué un proche collaborateur, Philippe Chaix, conseiller de Paris, pour accueillir les congressistes dans les prestigieux salons de l'Hôtel de Ville.

Des espaces géométriques et vitrés du CNIT, le congrès se retrouva soudain sous les lambris d'or et les fresques peintes d'un salon du 17^e siècle aux tapis et tentures luxueuses de laine et de soie.

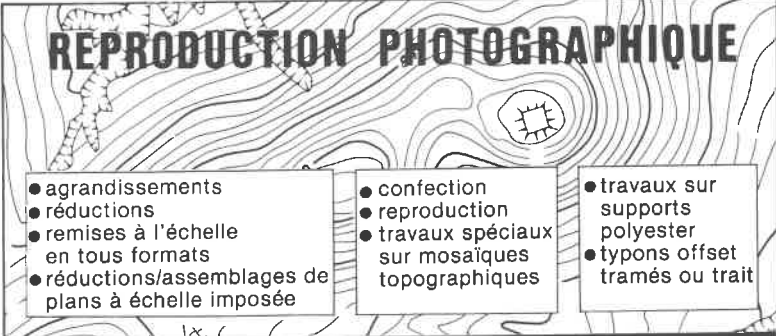
Les édiles nous accueillirent sous une gigantesque peinture représentant l'astronome Jean Sylvain Bailly, président de la Constituante, lors de la célèbre séance du jeu de paume, alors maire de Paris et recevant Louis XVI sur les marches de l'Hôtel de Ville.

Double et même triple symbole où l'on ne peut voir que la main du destin.

Et puis, parce que douce est la France et que cette terre a porté Rabelais et Paul Bocuse, il fallait bien que la table, qui n'était pas de logarythmes celle-là, réunisse les convives pour goûter à des plaisirs ou l'ordinateur n'a pas encore mis son grain de sel, même à titre d'assaisonnement.

Ce qui changea bien des congressistes de leur profession.

Jack Biquand



REPRODUCTION PHOTOGRAPHIQUE

- agrandissements
- réductions
- remises à l'échelle en tous formats
- réductions/assemblages de plans à échelle imposée
- confection
- reproduction
- travaux spéciaux sur mosaïques topographiques
- travaux sur supports polyester
- typons offset tramés ou trait

HAUTE PRECISION

LART

PHOTO-REPROGRAPHIE PHOTO-CARTOGRAPHIE

LES APPLICATIONS DE LA REPRODUCTION TECHNIQUE

5, rue de la Véga
75012 PARIS

(1) 43.47.15.92

ALLOCUTION D'OUVERTURE DU PRESIDENT DE L'AFT, ROGER SCHAFFNER

Ce n'est pas sans appréhension que nous avons vu s'approcher la date fatidique de ce 7 décembre 1989, et j'ai personnellement le trac de ce qui pourrait encore nous arriver de contrariant. Enfin, le sort en est jeté, on y va carrément, la salle est pleine, c'est déjà quelque chose.

Pour commencer, je remercie cordialement M. Chapon d'avoir accepté la Présidence de cette rencontre ; je lui souhaite bon courage, et avant de lui passer la parole pour ouvrir ce 2^e Congrès International de l'AFT, ce 2^e CITOP, sigle que nous retiendrons à l'avenir, je tiens à souhaiter la bienvenue en ce grandiose édifice du CNIT :

— d'abord aux éminentes personnalités scientifiques, techniques et administratives, dont les noms et qualités sont énumérés sur notre plaquette et qui ont bien voulu prendre le risque de former le Comité d'Honneur que nous nous efforçons de ne pas décevoir en nous montrant digne de sa confiance ;

— ensuite à nos non moins éminents Présidents de Séance et Conférenciers énumérés au programme qui vous a été remis, auxquels revient justement le redoutable honneur de défendre notre réputation.

Par ailleurs, nous sommes heureux d'accueillir parmi nous des participants de marque :

*Mesdames : Colette Marie Girard, Présidente de la SFPT et
Monique Pelletier, Présidente du CFC.*

Messieurs : Kalevi Kirvesniemi, Délégué par la FIG et l'Association des Ingénieurs Géomètres finlandais, Directeur du prochain Congrès de la FIG à Helsinki.

Jacques Breton, Président de l'Ordre des Géomètres-Experts.

Jean-François Carrez, nouveau Directeur Général de l'IGN.

Jean-Marc Fenet, Directeur du Cadastre.

Joseph Frund, Président de la Société Suisse des Mensurations et Améliorations Foncières.

Anthony Bancroft, Délégué de la Royal Institution of Chartered Surveyors.

Michel Louis, Secrétaire Général de l'AIG.

Gérard Gros, de l'ISTED.

Siegfried Schenk, Délégué du Service d'Arpentage de Bade-Württemberg.

Les professeurs Miserez de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne et Chaperon de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich.

André Bercher, Directeur du Cadastre du Canton de Vaud.

Constantin Bah, Géomètre-Expert et Inspecteur du Cadastre de Cotonou...

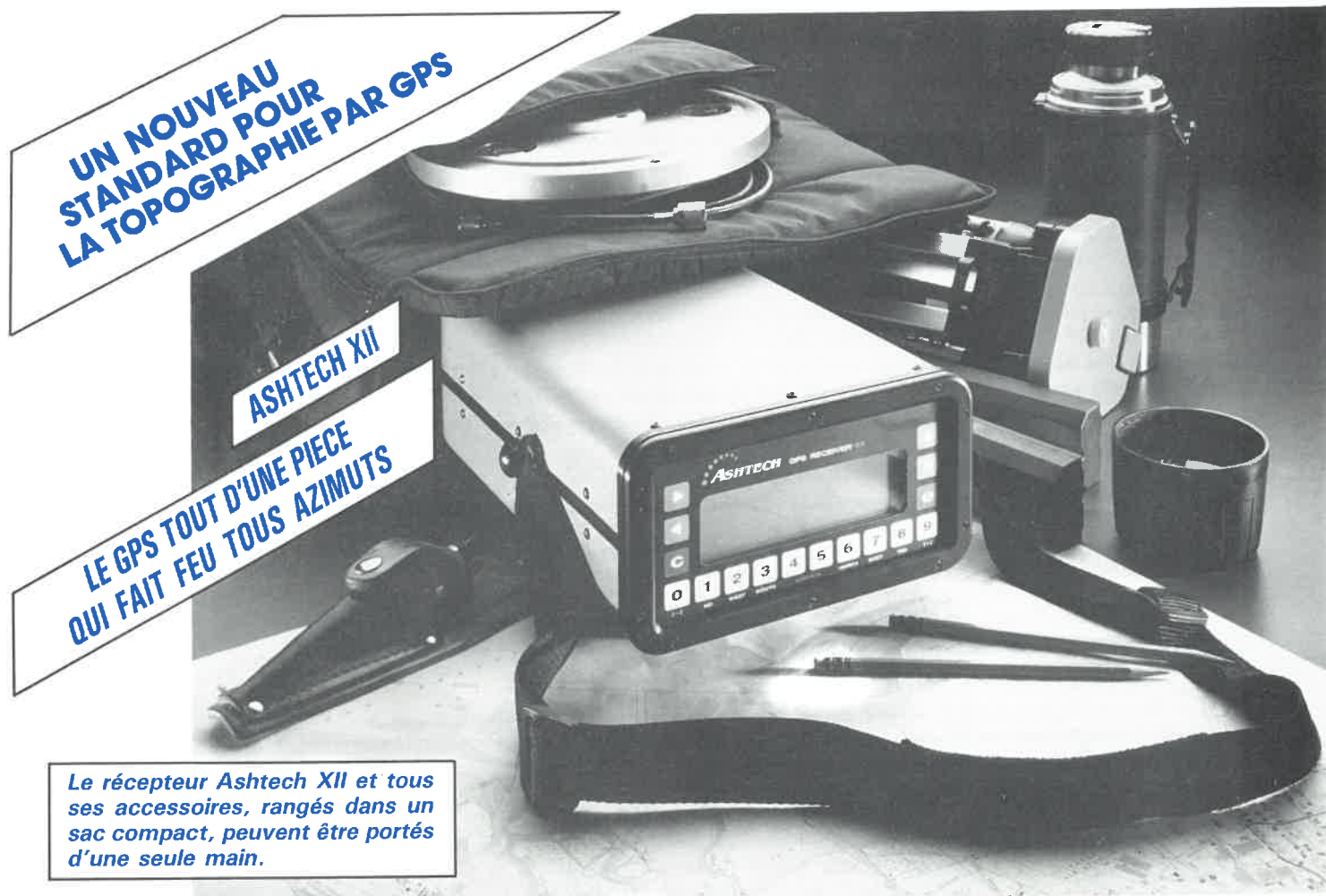
On me pardonnera d'en oublier ; en ajoutant que mon ami Jean de Graeve, notre Conférencier de samedi, vient d'être élu Président de l'Union Belge des Géomètres-Experts Immobiliers.

Si ce congrès s'avère être une réussite, vous le devrez aux membres de notre Comité d'Organisation avec son inlassable directeur, André Bailly. Et, si par hasard, vous découvrez quelques et presque inévitables défauts dans le montage de cette manifestation, ne leur tirez pas dessus ; ils ont fait tout leur possible... bénévolement.

Pour terminer, à tous mes collègues de tous les secteurs et spécialités, aux animateurs de l'exposition, lieu de rencontre privilégié de ce congrès, je dis, comme l'Empereur dans ses décrets : "A tous, présents et à venir, salut !".



Le professeur Henri Lacombe, de l'Académie des Sciences, président du comité d'honneur du 2^e CITOP et M. Bourgoin, ingénieur général de l'Armement.



LE RECEPTEUR GPS DE TOPOGRAPHIE ASHTech L-XII un récepteur précis, maniable et simple d'emploi

— CARACTERISTIQUES DE BASE :

- Poids du récepteur : 4,5 kg.
- Poids de l'antenne : 1,1 kg.
- Dimensions :
hauteur 11,7 cm × largeur 21,5 cm × profondeur 32 cm.
- 12 "Super canaux" parallèles, sur fréquence L1.
- Gamme de tension d'alimentation : de 9 à 32 volts.
- Stockage des mesures dans une RAM interne de 1 Méga-octet.
- Calculateur intégré.
- Utilisation en modes statique, cinématique et pseudo-cinématique.
- Mise en œuvre hautement automatisée, sans calibration, préchauffage et sans la nécessité de programmer.
- Début des enregistrements dans les 2 minutes après mise en marche.
- Logiciel de post-traitement en mode automatique ou manuel.

— OPTIONS :

- Batterie interne intégrée donnant une autonomie de 4,5 heures.
- Navigation terrestre, marine et aérienne.
- Bi-fréquence : 12 "Super canaux" parallèles supplémentaires, sur fréquence L2.
- Photogrammétrie.
- Navigation différentielle en temps réel.
- Capacité de stockage de la RAM interne supérieure à 60 heures avec 6 satellites.
- Logiciels d'ajustement de réseaux



SAGEM Le Ponant de Paris, 27, rue Leblanc
75512 Paris cedex 15
Tél. (1) 40.70.67.60 - Télex 270386 F
Fax (1) 40.70.67.75.
Pour tous renseignements, contacter M. Neuillet

OUVERTURE DU CONGRES



*Jean CHAPON, Ingénieur Général honoraire des Ponts et Chaussées,
Président du Conseil d'Orientation de la Recherche en Génie Civil
(CORGEC).*

I — Lorsque M. André Bailly m'a proposé de présider le 2^e Congrès International organisé par l'Association Française de Topographie — qui célèbre cette année son 10^e anniversaire — je ne pouvais faire autrement qu'accepter, tant son propos était aimable et convaincant. Aussi, dès l'ouverture de ce 2^e Congrès, ai-je l'agréable devoir de vous exprimer mes vifs remerciements pour le très grand honneur qui m'a été fait et auquel je suis particulièrement sensible.

C'est seulement une fois mon accord donné, que j'ai mesuré le poids de cet honneur qui implique que je doive m'adresser à vous — et je me suis demandé si je n'avais pas été imprudent en répondant positivement à M. André Bailly, tant je me suis rendu compte de mon ignorance de ce que recouvrait aujourd'hui la topographie, le champ d'activité de votre association et les thèmes de ce 2^e Congrès International.

C'est donc avec autant de modestie que d'honneur, que je m'adresse à vous, en espérant que votre indulgence sera aussi grande que je suis moi-même heureux de me trouver aujourd'hui parmi vous, et qu'est ma grande reconnaissance à l'égard de M. Roger Schaffner, Président de l'AFT, M. André Bailly, Directeur du Congrès et les membres du Comité d'Organisation, ainsi que M. Guy Ducher, Rapporteur Général ; je joins à cet hommage M. Henri Lacombe, Président et les membres du Comité d'Honneur ; et au-delà, tous les membres de l'AFT et tous les participants au 2^e Congrès International, en exprimant un remerciement particulier aux participants étrangers auxquels je souhaite un agréable séjour dans notre pays.

Le grand nombre de participants est déjà un très bon résultat pour tous ceux qui se sont dévoués pour organiser cette manifestation et il ne fait aucun doute que le choix des sujets — qui couvrent la majorité de la problématique de la Topographie au sens le plus large du terme — la qualité des orateurs, susciteront de nombreuses interventions qui constitueront autant d'apports utiles à l'enrichissement des connaissances, nécessaires pour les progrès de cette discipline qui est la vôtre.

II — C'est une bonne façon pour ce Congrès de mériter le qualificatif d'Etats Généraux de la Topographie que lui ont donné ses organisateurs. Non que, comme ce fut le cas en 1789, ces Etats Généraux constituent les prémices d'une Révolution — car les exposés qui nous seront présentés sont loin d'être des cahiers de doléances, mais que, comme à Versailles, en 1789, la confrontation des expériences, des connaissances et des idées, chez diverses "classes" — je préfère dire ici des diverses familles professionnelles de la Topographie, marque une importante étape de l'évolution continue que la Topographie connaît depuis les origines de l'Humanité.



A vrai dire, les premiers "Etats Généraux" me paraissent remonter à la création de l'AFT puisque — selon ses statuts — elle a pour objet de "rapprocher" en les regroupant, tous les professionnels, praticiens, spécialistes, enseignants, utilisateurs, à quelque titre que ce soit de la Topographie. Ce terme recouvrant les sciences permettant la définition physique et juridique de l'espace terrestre telles que : géodésie, hydrographie terrestre et marine, topographie, topométrie, photogrammétrie, cartographie, expertises foncières et toutes activités parallèles ou d'application liées à ces spécialités.

Si j'ai procédé à ce rappel d'un texte que vous connaissez bien, c'est pour montrer que l'Association regroupe effectivement toutes les familles professionnelles — dont on peut au premier abord se demander si elles ont un domaine d'intérêts communs, les uns exerçant leur activité à une échelle très humaine (par exemple pour élaborer des plans cadastraux ou implanter une construction), d'autres travaillant sur de plus vastes espaces ou même l'espace — tels les géographes — d'autres au contraire s'intéressant aux déplacements pouvant être infiniment petits — comme c'est le cas en topographie industrielle, les uns travaillant sur la terre, depuis le sommet jusqu'à de grandes profondeurs souterraines, d'autres au contraire explorant et décrivant les mers et les océans, etc... Mais à la réflexion, toutes ces familles ont en commun le fait qu'elles **mesurent** des distances, des niveaux, des surfaces et des volumes, qu'elles **reportent** les résultats de ces mesures pour constituer des documents destinés à divers usages, et pour cela, en assurent la **synthèse et l'interprétation**, en fonction de l'usage qui doit en être fait, et qu'elles en assurent l'**archivage et la diffusion**.

Bien que leurs activités s'exercent à des échelles fort différentes et que leurs résultats servent de support à de nombreux autres développements, nombre de ces familles sont tenues d'utiliser les résultats obtenus par les autres : le topographe qui implante un ouvrage d'art commence par se servir des cartes géographiques ou hydrographiques, il se réfère à des repères géodésiques ; le topographe industriel se réfère lui-même aux repères installés par celui qui a implanté le bâtiment ou les installations où il doit intervenir. De ce fait, les topographes sont habitués au partage de l'information.

Certes, les procédés et les instruments utilisés par les uns et par les autres peuvent être fort différents : mais ils procèdent parfois des mêmes principes : le **laser** est utilisé aussi bien en géodésie spatiale que pour faire des mesures sur courtes distances, il est employé aussi bien dans l'air que dans l'eau, lui qui sert à "scanner" les documents et à les imprimer. L'appréciation de la justesse et de la précision de la mesure fait appel aux mêmes méthodes mathématiques et statistiques. Le report des mesures parfois effectué en temps réel, fait appel à des appareils et des méthodes informatiques qui diffèrent peu d'un usage à l'autre.

C'est dire combien il est **naturel** que toutes les familles professionnelles de la Topographie se soient regroupées au sein d'une Association — l'AFT qui célèbre cette année son 10^e anniversaire... qui lui permet de tenir des Etats Généraux où fort heureusement chaque famille siège sur un pied d'égalité avec les autres sans que certaines d'entre elles disposent des privilèges de la noblesse ou du clergé par rapport à un Tiers Etat.

III — C'est dire également que la topographie moderne sait faire appel aux moyens et procédés relevant des techniques les plus avancées, qu'il s'agisse de borner de vastes zones ou de dresser des plans portant sur des espaces de dimensions limitées ; dans tous les cas, l'exigence de qualité et de rapidité auxquelles n'échappent aujourd'hui aucune activité humaine conduit le Topographe à recourir aux appareils et aux méthodes adaptés, fort variables suivant la nature et l'ampleur des travaux à effectuer, depuis les théodolites, et les distancemètres de précision (10⁻⁷), jusqu'aux moyens de photogrammétrie aérienne ou par **satellites**, en utilisant tous les rayonnements permettant de définir de façon fine et avec discernement les grandeurs horizontales et les niveaux, et même les occupations du sol par la Nature et par l'Homme, les appareils gyroscopiques qui évitent le cumul des erreurs pour les mesures successives... Tout cela sans pour autant la dispenser de procéder à des calculs de trigonométrie élémentaire ou sphérique, mais en sachant que la table de logarithmes a cédé la place aux calculatrices électroniques et qu'elle a pratiquement rejoint dans les Musées les bâtons de Jacob et l'Astrolabe.

Mais dans tous les cas, la performance des appareils modernes ne saurait faire oublier le besoin en **références sûres** : à qui cela servirait-il que le laser permette de creuser les deux parties du tunnel depuis la France et la Grande-Bretagne avec une précision de la dizaine de centimètres pour le tracé de leurs axes, si les niveaux de référence sur la côte anglaise et la côte française ne sont pas correctement calés l'un par rapport à l'autre ?

C'est en fait depuis le réseau géodésique que les positions doivent être déterminées avec exactitude, et de façon cohérente — sans se limiter à l'hexagone, en ne connaissant qu'une seule frontière, celle de la France toute entière — et qu'on passe aussi du domaine de la Topographie au sens restreint du terme à celui de la géographie.

D'où la nécessité à la fois d'une **constante mise à jour** des connaissances pour servir les moyens que la technique met à disposition pour une meilleure mesure et pour un meilleur rapport, et d'un **échange d'informations permanent** entre les professionnels à l'intérieur d'un pays et au plan international entre praticiens, mais également avec les fabricants de matériel et les concepteurs de moyens informatiques. Là encore, le regroupement des professions au sein de l'AFT est une bonne façon d'échanger les connaissances, la tenue de Colloques Internationaux à intervalles de quelques années comme celui de 1985 et celui d'aujourd'hui, est l'occasion de faire le point des progrès réalisés, présentés de façon synthétiques pour balayer un champ très vaste, compréhensibles par un auditoire très varié de professionnels et d'utilisateurs, et par ailleurs celle de réunions thématiques, et l'AFT en organise pratiquement chaque année, permettant au contraire de traiter de façon plus approfondie des sujets particuliers, accessibles aux seuls spécialistes, de même que la revue XYZ lui offre la possibilité de publier des articles d'une très haute tenue scientifique et technique.

IV — C'est d'autant plus nécessaire que les exigences de la vie moderne en opérations topographiques de toutes sortes se font plus grandes quelle que soit l'intensité de l'occupation de l'espace, il a toujours été nécessaire d'implanter les constructions là où il le fallait, de connaître les limites de propriété, de permettre aux navires de se diriger de façon sûre vers leur port de destination. C'est encore plus vrai aujourd'hui où l'occupation de l'espace ne se compte plus seulement à deux dimensions ; le sous-sol des agglomérations est traversé par de multiples canalisations, voire par des voies routières ou ferrées et il est plus fréquent de rajouter de nouvelles voies ou canalisations que d'en supprimer.

A une autre échelle, le problème est le même pour une usine, dont les installations sont chaque jour plus complexes, exigeant l'implantation de nouvelles unités de production et les moyens de les raccorder entre elles.

La disposition d'informations **exactes** pour l'occupation de l'espace est une nécessité aussi bien pour l'industriel que pour la collectivité locale, pour l'architecte qui conçoit une construction, que pour l'entrepreneur qui la réalise, pour l'agent des Pouvoirs Publics qui autorise l'implantation d'une nouvelle construction ou d'un nouvel équipement, que pour le maître d'ouvrage qui devra l'exploiter sans compromettre le bon fonctionnement d'ouvrages voisins et d'en respecter l'environnement.

Ainsi est née l'**exigence d'une information géographique** qui déborde les connaissances de la géographie naturelle et cette relation aux constructions d'une certaine ampleur, qui touche désormais à **toutes** les réalisations humaines, quels que soient leur taille et leur emplacement. Cette information doit être **utilisable par tous**, pas seulement les professionnels de la Topographie, mais aussi ceux qui, un jour ou l'autre, devront décider d'une nouvelle occupation de l'espace terrestre, même pour une construction de dimensions restreintes.

La cartographie, depuis la carte de géographie de l'écolier, le plan cadastral, le plan d'urbanisme, les dessins d'un immeuble ou d'une usine, la représentation des fonds marins ou du lit d'une rivière, est une des finalités essentielles de la Topographie : c'est sans aucun doute la meilleure façon de permettre à l'utilisateur d'avoir la perception la plus rapide de l'occupation de l'espace qui l'intéresse, c'est l'outil de base qui lui permet d'étudier, au moins en première approximation, l'implantation d'une nouvelle construction.

Mais les moyens de l'informatique permettent aujourd'hui un stockage autrement plus performant des données : la **numérisation** permet une quantification indispensable pour certains usages ; elle offre en outre l'avantage de pouvoir "sortir de la boîte" les seules données dont on a besoin à conditions évidemment de les y avoir bien rangées. L'informatique permet aussi de s'appuyer sur les données des autres, ce qui pose toujours le problème de la production des données à l'opposé de la vocation des services chargés de les diffuser et qui pose parfois un problème de règles de déontologie. Aussi, grâce à la numérisation, est-il plus facile de réaliser des documents de cartographie thématique qui sont d'autant plus lisibles — donc facilement utilisables — que n'y figurent que les informations de base et celles relatives aux thèmes en cause. L'informatique n'a donc nullement supprimé la carte et en constitue au contraire son indispensable moyen et son complément naturel.

Précisément parce que la vie moderne est plus exigeante qu'autrefois en matière d'opérations topographiques, il faut se donner les moyens de les multiplier de façon économique et améliorer leurs performances.

Ainsi, la Topographie apporte-t-elle une réponse, partielle certes, mais efficace, à bien des objectifs du schéma d'orientation scientifique et technique de la recherche en Génie Civil (arrêté par le Ministre de la Recherche et de l'Équipement en janvier 1986), touchant à la réalisation d'ouvrages performants et à la conservation du patrimoine au sens le plus complet du terme, naturel et humain, dans un monde qui a pris conscience de la limitation de ses ressources financières et de la nécessité d'un environnement de qualité.

La **mesure des déplacements** est souvent la meilleure façon de déterminer les contraintes ou d'apprécier la bonne tenue ou le vieillissement d'un ouvrage.

Il est donc hautement souhaitable qu'à l'occasion de la construction, sinon de chaque ouvrage, au moins des plus importants ou de ceux qui sont le plus sévèrement sollicités, soit entrepris une étude pour déterminer les grandeurs — notamment les déplacements qu'il sera utile de mesurer, et d'équiper l'ouvrage d'appareils permettant ces mesures — ou pour le moins de prévoir dès la conception la possibilité de les mettre en place au moment où il faudra mesurer, en particulier dans les parties qui, sans cela, seraient difficilement accessibles en exploitation. Et il est évident que l'apport du Topographe à l'Ingénieur est indispensable pour prendre les dispositions nécessaires, compte tenu des moyens et procédés disponibles que le premier connaît à l'évidence bien mieux que le second.

Autre exemple où la Topographie devrait pouvoir apporter une réponse à l'ingénieur... ou au géographe : celui de l'**évolution du lit d'une rivière ou d'un estuaire** comportant des bancs émergents. Il serait, en effet, souhaitable de pouvoir établir rapidement les levés du lit, pour être à même de faire des comparaisons entre sa situation à divers moments (après une crue, après un étiage...) or, si la photogrammétrie permet de lever avec une précision suffisante, les parties émergées ou les fonds en eau claire, par contre les moyens habituels de l'hydrographie permettent, lorsque la hauteur d'eau est suffisante, d'utiliser les ultrasons depuis une embarcation. Il en va différemment pour les faibles profondeurs, notamment lorsque les eaux sont chargées de matériaux solides en suspension : il est certes possible de dresser des profils en utilisant le fil à plomb... mais la productivité est des plus limitée. D'où un problème de coût, et encore plus une lenteur qui ne permet pas d'obtenir l'état instantané de l'ensemble du lit sur une grande longueur, et par conséquent juger correctement de son évolution... puisqu'au moment où ont lieu les derniers profils, les premiers risquent d'avoir considérablement évolués. Or il faut une certaine précision : une variation inférieure à 10 cm sur 1 km², c'est un volume de 100 000 m³ !

Les exemples pourraient être multipliés, montrant l'attente de l'Ingénieur à l'égard du Topographe, et la nécessité d'élaborer des appareils et des méthodes permettant de résoudre des problèmes encore difficilement solubles.

Ce n'est donc pas le moment de lever le pied en matière de **recherches** pour doter la topographie des outils qui lui permettraient de répondre à cette attente.

Encore faut-il que cette attente lui soit exprimée ! et le soit assez clairement pour qu'à son tour le Topographe puisse faire connaître ses propres besoins aux fabricants de matériel : la Commission de Recherche du CNIG a sans aucun doute un rôle à poursuivre et à développer dans ce domaine et je ne doute pas que mon ami, le Président Pasquet a déjà fait le nécessaire !

V — Cette expression claire des besoins est probablement l'un des points clés les plus difficiles du progrès de la topographie, car chaque homme sur terre — notamment chaque Ingénieur, chaque Architecte — est un utilisateur de productions topographiques, pratiquement de **toutes** les productions, et parfois, tel. M. Jourdain, sans le savoir, ou pour le moins sans trop y réfléchir.

Je déclare donc ouverts les Etats Généraux de la Topographie de 1989.

**QUELQUES IMPRESSIONS PERSONNELLES SUR LE RÉCENT CONGRÈS INTERNATIONAL
ORGANISÉ PAR L'ASSOCIATION FRANÇAISE DE TOPOGRAPHIE
LES 7, 8 ET 9 DÉCEMBRE 1989 À PARIS**

par André Thiébault
Ingénieur général des Ponts et Chaussée honoraire



Mon propos s'adresse ici au lecteur occasionnel qui d'aventure se trouverait feuilleter cette revue xyz de l'Association Française de Topographie ; et qui serait sur le point de refermer précipitamment ce numéro, en se disant qu'il s'agit là d'une série d'articles bien trop savants, émanant d'initiés parlant à des initiés et de spécialistes évoquant leurs spécialités avec manifestement une très grande compétence ; mais que tout cela passe bien au-dessus de la compréhension du vulgum pecus ...

Mettant à profit le recul que m'offre tout naturellement l'état de retraité que je connais (et apprécie du reste) depuis maintenant cinq ans, je voudrais faire passer à ce lecteur sceptique un message des plus simples et des plus évidents aux yeux de quelqu'un qui, comme moi, ancien client des topographes du temps où j'étais en activité dans l'administration des Ponts et Chaussées, se trouve maintenant avoir complètement décroché de toutes ces questions de topographie et de levés de plans ; et qui ainsi retrouve -et même redécouvre- la topographie, cette fois dans son état actuel, avec tous les progrès spectaculaires faits ces dernières années dans ce domaine ; des progrès que justement ce deuxième congrès international organisé et tenu à Paris en décembre 1989 par l'Association Française de Topographie avait pour but de recenser, en constituant ainsi à fort juste titre, vu l'ampleur avec laquelle le sujet a été abordé et traité, de véritables «Etats Généraux de la Topographie».

Invité à ce congrès, et m'y étant rendu en fait plus en curieux qu'en connaisseur, je me dois de dire d'entrée de jeu que je ne m'attendais absolument pas à ce

que j'ai vu et appris à cette occasion ; et qui peut parfaitement se comprendre par tout un chacun, et dans le langage de tous les jours.

Allant droit au but, je dirai, en un mot comme en mille, que la profession des géomètres et topographes -en fait tout ce vaste secteur professionnel qui relève de la topographie- connaît actuellement un renouveau spectaculaire, manifestement totalement ignoré du grand public ; et que c'est là, chose bien regrettable - car, loin de remâcher leur litière comme nombre d'autres secteurs professionnels, les géomètres et topographes vivent actuellement une époque de profonde mutation technologique, tant dans leurs outils que dans les méthodes, au point que l'on peut vraiment dire que le métier a complètement changé ; et que cela ne se sait pas, ou que cela ne se sait sûrement pas assez.

Certes, je ne m'estime pas avoir la compétence requise pour broser dans toute son ampleur, un panorama valable des progrès spectaculaires (le terme n'est nullement exagéré). Aussi, serais-je bref, et par là même nécessairement superficiel, et plus qu'incomplet ; car il ne s'agit ici que de quelques impressions personnelles, articulées à l'intention du lecteur non spécialiste : un peu comme je l'aurai été avant de prendre part à ce congrès.

Au fond, ces impressions, telles qu'elles s'imposent à moi après coup, portent essentiellement sur trois aspects d'une même réalité globale touchant la topographie moderne actuelle ; ce sont les matériels, les méthodes et les hommes.

Les matériels

De nos jours, quand on parle de techniques, il serait presque de bon ton de ne plus s'étonner de rien ; et de prendre un air blasé et entendu lorsqu'on vous fait état de matériels capables de performances encore impensables il y a seulement quelques années : une exposition, comme celle jouxtant les salles de conférences du congrès, en apprend plus, même dès la première visite, que tous les exposés pensables et imaginables sur tous ces appareils hyper sophistiqués d'optique et d'électronique qui sont devenus les outils réellement quotidiens du monde actuel des géomètres et topographes. Et au risque de passer pour un naïf, je dirai très en bref que je ne soupçonnais vraiment pas toute l'ampleur et la profondeur de la révolution informatique qui a réellement envahi tout le domaine de la topographie -au point de périmer totalement tous les outils antérieurs. A telle enseigne que cette exposition était un véritable festival informatique ; les Suisses sont toujours là, très présents avec leurs matériels de très haute précision ; quelques Allemands aussi ;

quelques Français, Suédois, Italiens et aujourd'hui on assiste à la percée des appareils japonais.

Et je dirai que c'est là chose très impressionnante et très instructive de voir ainsi rassemblés tous ces appareils extraordinaires de précision, de rapidité, voire de simplicité d'emploi ; avec parallèlement, à la clé, un abaissement, parfois spectaculaire, des coûts et prix de revient qui changent tout simplement d'échelle, ce qui n'est du reste pas sans soulever nombre de problèmes d'adaptation ; et justement d'une adaptation à laquelle toute cette profession des géomètres et topographes se prête avec un succès que, vu de l'extérieur, je qualifierai d'admirable.

Les méthodes

Voilà qui m'amène tout naturellement à évoquer le deuxième point de mon propos.

Les progrès -impensables il n'y a pas si longtemps, même dans les rêves les plus fous de science fiction- font que le travail en lui-même du géomètre et du topographe d'aujourd'hui n'a plus qu'un très lointain rapport avec ce qu'il était il y a à peine une génération ; certes, comparaisons n'est pas raison, mais en voyant comment se déroulent les opérations topographiques de nos jours, je ne pouvais m'empêcher de penser à un parallèle : celui de la conduite d'un TGV dans sa cabine informatisée, comparée à celle de la conduite en «bête humaine» du chauffeur de la locomotive à vapeur d'antan. Il faut voir par exemple les ressources proprement miraculeuses qu'offrent les stations topographiques modernes, avec leur informatique embarquée, à première vue fort discrète, mais incroyablement performante grâce à des programmes de calcul intégrés qui en font des merveilles de portée et de précision. Il faut voir les tables traçantes actuelles, opérant avec une qualité laser, et offrant une fiabilité, une précision, et surtout une rapidité battant à plate couture tous les champions de la table à dessin de papa. Il faut voir ce qu'est devenue la photogrammétrie aérienne, avec toutes ses ressources qui ont bousculé et périmé toutes les méthodes cartographiques d'antan... Et j'en passe ...

Le Savoir, actuellement indispensable au topographe moderne, n'a pratiquement plus aucun rapport avec l'art des «hommes de l'art» d'antan ; et ceci m'amène tout naturellement au troisième et dernier point de mon propos.

Les hommes

Au lieu de m'étendre en long et en large sur les disciplines de plus en plus sophistiquées et de plus en plus scientifiques auxquelles doit être rompu le géomètre et le topographe de nos jours, je bornerai ici mon propos à un constat des plus simples qu'il m'a été donné de pouvoir faire à ce congrès et qui tient en un mot : la participation des jeunes.

Pour moi, c'est là quelque chose de nouveau.

Car de notre temps, les jeunes n'allaient pas tellement dans de tels congrès. D'abord, on ne les y conviait pas et en l'espèce, il y a là une nette différence avec aujourd'hui ; une différence tout à l'honneur des organisateurs du congrès et du corps enseignant des écoles. Et puis aussi, à l'époque, nous n'aurions pas eu l'idée même d'aller à de tels congrès ; nous aurions peut-être eu l'impression d'y être de trop, de par trop nous imposer ; et du reste, le métier pouvait attendre que nous entrions dans la carrière ; rien ne pressait tellement ...

Je suis sorti de ce congrès vivement impressionné par la qualité des étudiants et élèves géomètres et topographes : il y avait là une assistance nombreuse, stylée, studieuse et réfléchie ; manifestant un intérêt soutenu et une participation active, avec des questions pertinentes et fort bien venues, témoignant d'une motivation augurant du plus favorablement de l'avenir.

De l'avenir d'une profession ainsi en pleine et totale rénovation, mettant en œuvre des appareillages de plus en plus performants.

Bref, un congrès marquant, et très réussi.

C'était bien effectivement de véritables «Etats Généraux de la Topographie».

Merci à ses organisateurs.

Merci à ses conférenciers.

Merci aux exposants.

Et à tous merci de nous avoir ouvert, à nous qui ne sommes pas du métier, tous ces vastes horizons que nous avons ainsi découverts.



PANORAMA DE L'INSTRUMENTATION MODERNE EN TOPOGRAPHIE

Michel KASSER, IGN, Ingénieur Géographe



I — Introduction

Nous commencerons par analyser la place de la topométrie terrestre parmi les méthodes modernes d'acquisition de données géographiques telle que la photogrammétrie.

Tout d'abord, les méthodes de topométrie de terrain restent privilégiées sur des chantiers de petites et moyennes dimensions pour lesquelles la photogrammétrie est mal adaptée. Par ailleurs, elles sont indispensables chaque fois que l'on recherche une précision élevée (la photogrammétrie ne permet pas des précisions ultimes équivalentes).

De plus, les méthodes topométriques permettent une excellente rapidité de réponse face à un problème posé, non comparables à d'autres méthodes : un chantier décidé le matin peut être achevé en fin de journée.

Un autre aspect des méthodes de topométrie réside dans le prix de revient des chantiers observés. Les méthodes topométriques entraînent des coûts fixes peu élevés et un prix par point en général plus important que l'équivalent en photogrammétrie pour laquelle les frais fixes, par contre, sont très importants (mise en place d'un avion, emploi d'appareils de restitution).

Enfin, une dernière différence majeure, mais qui est au désavantage de la topométrie, réside dans la différence de performance d'accessibilité sur le terrain. En effet, la photogrammétrie permet de réduire l'accès au terrain à des zones peu nombreuses et peu critiques (stéréopréparation). Par contre, l'emploi de méthodes topométriques implique l'accessibilité en tous les points du terrain, même si cette nécessité n'est pas appelée à se maintenir forcément très longtemps (mesures sans contact).

II — Des méthodes qui évoluent

Il est clair que la photogrammétrie est une technique qui évolue beaucoup depuis quelques années (restituteurs

analytiques depuis une décennie et à présent utilisation d'opérateurs de corrélation automatique pour assister l'opérateur).

Par ailleurs, les méthodes de positionnement en général ont beaucoup bénéficié des évolutions technologiques liées à des besoins militaires, l'exemple le plus connu aujourd'hui étant le positionnement GPS qui est devenu opérationnel à des coûts accessibles. De manière générale, les méthodes spatiales, grâce à des financements d'origine militaire dans la plupart des cas, sont appelées à fournir une grosse partie des activités de positionnement. Face à cette situation, les méthodes de topométrie modernes n'ont plus derrière elles, et depuis longtemps, le soutien des budgets militaires. Elles ont cependant beaucoup évolué et ceci malgré l'étroitesse du marché (notre communauté représente un ensemble économiquement peu important des activités nationales).

Grâce au regroupement de la majeure partie des industriels concernés, cette évolution s'est faite dans les sens suivants :

- Plus de précision : ce n'est pas le trait le plus marquant, mais il convient de noter le nombre grandissant d'appareils de très grande précision à des prix abordables qu'il y a sur le marché aujourd'hui (par exemple, en mesure de distances, des instruments comme le WILD DI 2000, le KERN Mekomètre, le GEOMENSOR de COMRAD, les théodolites E2, T 2000 et ELTA 2).

- Plus de facilité de mise en œuvre (en particulier grâce à des méthodes de lecture automatique pour les théodolites) permettant d'obtenir une information numérique dès le début des travaux, ce qui permet ensuite une transmission exempte de fautes.

- Plus d'automatisme, ce qui facilite la tâche des opérateurs ainsi que leur formation. Il est en effet requis de la part du technicien de terrain de moins d'attention à la mise en œuvre des instruments. Ainsi, certains théodolites électroniques ont une compensation automatique du défaut de verticalité de l'axe principal. De même, les niveaux automatiques ont atteint un niveau de fiabilité et de précision tel que les niveaux non automatiques sont devenus complètement obsolètes, sans aucune perte de qualité, et avec un meilleur confort de travail pour l'opérateur.

- Une décroissance appréciable des prix d'achat de ces matériels à fiabilité équivalente malgré l'utilisation croissante d'électronique dans une structure qui, traditionnellement, n'utilisait que de l'optomécanique. Grâce à l'introduction tardive de l'électronique sur le terrain, les usagers n'ont pas connu les périodes où l'accroissement de l'automatisation se faisait au détriment de la fiabilité, période où le nombre de pannes électroniques était très élevé.

III — Evolution récente

Nivellement

En nivellement de précision, la limitation de base est toujours la réfraction atmosphérique. Par ailleurs, la mauvaise connaissance que nous avons de la forme exacte du géoïde ne permet pas l'emploi des matériels de géodésie spatiale. Donc le nivellement de précision reste atta-

ché de manière obligatoire aux méthodes de topométrie terrestre. Les progrès faits depuis quelques années ont concerné tout d'abord le nivellement motorisé, mis en œuvre en RDA et surtout en Suède, et désormais employé à travers le monde et en particulier à l'IGN. Cette méthodologie permet des gains de productivité appréciables et une bonne amélioration de la précision et de la sécurité lors du travail le long des axes routiers.

Depuis quelques années, le nivellement trigonométrique motorisé (NIPREMO), basé sur l'emploi de deux théodolites en visées réciproques et simultanées, a permis des gains de productivité supplémentaires appréciables. Cette méthode commence à se répandre et représente ce que l'on peut faire de plus rapide aujourd'hui comme processus de nivellement sur le terrain.

Dans le droit fil de cette évolution, nous noterons le lancement il y a deux ans du RPLS (Rapide Precise Leveling System) gros programme international (USA, Canada, Finlande) pour améliorer encore la productivité du nivellement de grande précision. Ce programme, traité par WILD, a conclu à la nécessité de développer un réfractomètre de terrain pour compléter des mesures de type NIPREMO. Le but est de s'affranchir au mieux des phénomènes de réfraction atmosphérique tout en développant une méthodologie permettant une automatisation complète.

Les besoins aujourd'hui sont essentiellement d'obtenir du nivellement moins cher (donc plus rapide ou plus automatisé). Il existe aussi un besoin important pour une amélioration de la précision, mais ce besoin est généralement non exprimé aujourd'hui car la plupart des donneurs d'ordre n'ont pas conscience du bénéfice qu'ils pourraient en tirer.

Notons enfin que l'électronique de terrain commence aussi à faire son apparition dans les niveaux de précision, ce qui est un signe des temps... (Zeiss RFA).

Mesures de distances

Comme nous l'avons dit précédemment, il existe sur le marché plusieurs instruments de grande précision et pas forcément très onéreux (MEKOMETRE, DI 2000, GEOMENSOR CR 204). La précision disponible est aujourd'hui uniquement limitée là aussi par la réfraction atmosphérique. Ces instruments offrent une résolution de 0,2 mm, mais l'erreur proportionnelle est limitée à un millimètre par kilomètre, uniquement parce que l'on ne sait pas mesurer facilement l'indice de l'air à un meilleur niveau de précision.

Un autre point important de l'évolution des appareils de distances est lié à la venue sur le marché d'une nouvelle technologie de mesure (par diodes laser pulsées) qui permet de faire des mesures sur courtes distances sans réflecteur (selon les matériels, jusqu'à une centaine de mètres avec une précision centimétrique). Probablement dans les années qui viennent, comme contrepartie du développement de télémètres militaires pour fantassins, des instruments de portée beaucoup plus importante, sans danger pour les yeux, vont voir le jour. Les mesures de distance sans réflecteur sont encore aujourd'hui très sous-employées dans notre milieu et bénéficieront sans doute de l'introduction récente sur le marché de théodolites motorisés, ceci malgré le coût élevé de ces stations. En effet, le montage ainsi obtenu permet de lever de manière complètement automatique des zones de terrain importantes, et ceci devrait trouver son emploi dans les mesures de cubatures, bien plus que ce n'est le cas aujourd'hui.

Mesures d'angles

Les théodolites électroniques de très grande précision existent maintenant depuis près de cinq ans. Des instru-

ments de moindre précision (un milligrade) sont fabriqués par de nombreux industriels aujourd'hui à des prix tout à fait compétitifs. Ils se sont donc répandus dans la profession de manière rapide. Depuis peu de temps, les théodolites de grande précision existent sous une forme motorisée, c'est-à-dire que le théodolite peut être orienté par un calculateur pour viser de manière automatique différentes cibles. Ceci a ouvert de nouvelles voies dans le domaine de la métrologie industrielle des objets de dimension moyenne (quelques mètres) pour lesquels la photogrammétrie était jusqu'ici la seule solution malgré le manque de précision (il est souvent demandé mieux que le dixième de millimètre et la photogrammétrie peut difficilement donner mieux que le millimètre).

Il est trop tôt pour juger de l'impact qu'auront dans notre profession ces théodolites motorisés, mais il est probable que leur utilisation ne sera prise en compte que lentement, car nos professions sont très traditionnalistes.

Méthodes tridimensionnelles

La plus connue de ces méthodes fait appel au système GPS et permet de mesurer les coordonnées X,Y,Z d'un point, de manière indépendante du réseau existant sans trop de difficultés (voir exposé de C. Boucher).

L'autre méthode qui va sans doute reprendre de l'importance est la méthode de lever inertiel. En effet, au petit groupe de fabricant de centrales inertielles déjà en place sur le marché depuis une vingtaine d'années (LITTON HONEYWELL, FERRANTI) vient de s'ajouter un nouvel arrivant qui propose un système extrêmement ouvert et facile d'emploi pour des usagers spécifiquement topographes (SAGEM). Les levers inertiels sont particulièrement adaptés pour l'obtention de données le long d'un axe susceptible d'être parcouru en voiture et l'existence d'un matériel maniable risque de révolutionner ce type de lever, malgré le coût élevé de l'équipement. Par contre, les méthodes spatiales sont plus adaptées pour des grands réseaux.

La précision pour un aller-retour, sur des essais en Suède, peut atteindre 0,5 m sur 50 km entre points connus, et moins de 0,1 m pour 2 km.

Méthodes de calcul

Aujourd'hui de nombreux logiciels de compensation permettent à tout un chacun de tirer un profit maximum de la précision des observations. Mais c'est une situation récente, et dont il faut être conscient : jusqu'ici, les calculs étaient le point faible des travaux courants. Par comparaison, il devient très facile d'estimer correctement a posteriori les erreurs de détermination lors de levés précis. Par ailleurs, les géophysiciens ayant beaucoup d'intérêts dans ce secteur, de bonnes méthodes de représentation des déformations dans un réseau géodésique sont aujourd'hui disponibles pour les études de stabilité, glissements de terrain et ouvrages d'art (tenseurs de déformation).

IV — Conclusion

L'irruption sur le marché des méthodes de positionnement spatial n'est probablement pas appelé à bouleverser profondément la topométrie. Elle va sans doute participer à une baisse des prix des méthodes photogrammétriques (emploi d'un GPS dans l'avion photographe). Mais, en topométrie classique, on a besoin de méthodes très rapides et le gros de la demande se fait pour des petits chantiers pour lesquels on ne peut supporter des frais fixes importants.


Par ailleurs, la demande habituelle exige des précisions qu'encore pour longtemps, seule la topométrie terrestre va pouvoir offrir.


Parions donc que nos activités sur le terrain, en contact direct avec la réalité et donc subjectivement si attirantes, ne sont pas prêtes à disparaître. L'évolution des matériels va depuis toujours dans le sens d'une facilité croissante d'emploi, et ceci de plus en plus rapidement. Nous nous en réjouissons, car cela prouve la grande vitalité de nos professions et du secteur industriel qui s'y rattache.

Mais n'oublions pas que ces évolutions nouvelles redimensionnent régulièrement le bagage technique optimal

que l'on peut attendre de nos ingénieurs et techniciens. Si la manipulation d'instruments devient de moins en moins exigeante, par contre le traitement de données demande de plus en plus de savoir-faire et de curiosité intellectuelle. Le spécialiste de la mesure doit se compléter d'un spécialiste du traitement de ces mesures, son art se résume à optimiser les acquisitions de terrain et à analyser correctement la précision du résultat : **ce deuxième volet est la grande nouveauté de cette fin de siècle.**

PRISES DE VUES AERIENNES





AVIONS RAPIDES
COUVERTURE
EUROPEENNE
2 EQUIPAGES :
365 JOURS SUR 365
MATRIEL FMC

ADRESSE

APEI
Aérodrome de Moulins
03400 YZEURE
Tél. 70 20 63 67
Télex : 980 882 - Fax : 70 20 84 37

Du nouveau en photogrammétrie L'acquisition de données en trois dimensions (3D) c'est facile avec le stéréorestituteur analytique MPS-2 (ADAM Technology)

TRANSPORTABLE – SIMPLE – FACILE D'EMPLOI



**Il vous restituera
tout, partout**

Le MPS-2 vous restituera aussi votre investissement ; très rapidement.

Le MPS-2 met la photogrammétrie à la portée de tous par sa maniabilité, son faible encombrement, sa rapidité d'emploi, son faible coût.

Il est connectable sur un ordinateur compatible PC pour la formation de l'image stéréoscopique obtenue très facilement et très rapidement, et pour le stockage des données obtenues sur disquette.

L'affichage au PC conduit l'opérateur pas à pas par des instructions, menus et messages-guide.

Le modèle étudié, restitué, peut être représenté à l'écran couleur du PC.

Le MPS-2 passe des clichés de 35 mm jusqu'à 70 mm. Il peut traiter des prises de vue aériennes et terrestres. Comme les autres produits de la gamme ADAM Technology, le MPS-2 permet d'entrer par un interface en temps réel, directement sur Autocad et sur microstation.

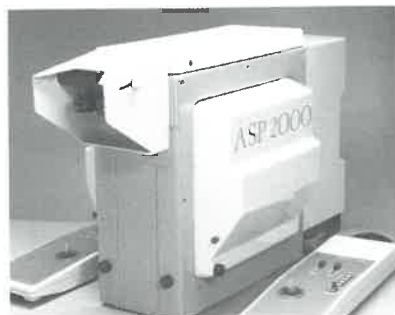
Le MPS-2 nécessite peu d'entraînement.

A partir de 280 000 F. Nous consulter

MANIABILITE – PERFORMANCE – SIMPLICITE

AUTRE MODELE

ASP 2000. Pour les clichés jusqu'au format aérien 230 x 230. Certains stéréorestituteurs analogiques peuvent être « transformés » en analytiques. Nous consulter.



DE NOMBREUSES APPLICATIONS :

- Levés cartographiques et mises à jour pour systèmes d'informations géographiques (SIG)
- Relevés d'archéologie, d'architecture, de monuments, de façades.
- Mesures industrielles : Machines, pièces mécaniques, états d'avancement...
- Constats d'accident, relevés des lieux.
- Engineering : Etudes de maquettes et modèles, échantillons, tests, déformations.
- Etudes d'érosion, couverture végétale, zones forestières, plantations.
- Occupation des sols, études agricoles.
- Biologie, images de microscopie électronique.
- Domaine médical : Restructuration de membres, visages...



À DECOUPER

et à retourner à MESURES & SYSTEMES
6, Rue des Jardins 60500 CHANTILLY
Sans engagement de ma part, veuillez m'adresser
votre documentation concernant le stéréorestituteur

☐ MPS-2 ☐ ASP 2000

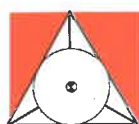
Nom _____

Adresse _____

Ville _____

Code postal _____

Tél. _____



MESURES & SYSTEMES

6, Rue des Jardins. 60500 CHANTILLY - FRANCE.
Tél.: 44 57 27 97. Fax: 44 57 46 58. Telex: MESYST 150153 F

**GEOMAT
30-31 MAI-1^{er} JUIN
STAND B 27**

PANORAMA DE LA PHOTOGRAMMETRIE MODERNE

Prises de vues de haute résolution, restitution en liaison avec des systèmes d'information, rôle du traitement numérique d'images et applications pratiques



O. Kölbl

Ecole polytechnique fédérale de Lausanne

1. Introduction

Depuis quelques années, la photogrammétrie a subi de profondes modifications. La restitution classique sur des appareils analogiques est progressivement remplacée par des procédés analytiques ou même numériques. L'objectif premier de la restitution photogramétrique d'aujourd'hui n'est plus la production de cartes, mais l'intégration de données numériques dans des systèmes d'information dont on pourra aussi sortir des cartes. La triangulation aérienne moderne, en liaison avec les nouvelles techniques de géodésie spatiale, permet de densifier un canevas de manière beaucoup plus rationnelle qu'il y a quelques années seulement. Les méthodes de prises de vues ont aussi été sensiblement perfectionnées et l'on peut même espérer que les techniques d'imagerie électronique amélioreront encore et de façon déterminante la présentation cartographique.

Les développements en cours ouvrent des perspectives intéressantes en ce qui concerne l'amélioration de la qualité des images et leur traitement automatique, en particulier par la gestion des données dans des systèmes d'information. Ces développements, qui dépendent essentiellement des progrès en électronique, vont certainement entraîner des bouleversements importants - d'ailleurs déjà tangibles - dans l'industrie photogramétrique classique.

La présentation de nouveautés techniques encore en développement est toujours liée au danger de surestimer certaines options sans évaluer correctement les contraintes et limites. Afin de réduire ce risque, l'auteur se base en bonne partie sur des expériences et recherches effectuées dans son Laboratoire à l'EPF-Lausanne. Certains aspects peuvent par conséquent paraître très subjectifs, mais les résultats présentés sont ainsi bien fondés.

2. Prises de vues et acquisition des données

2.1 Rendement des systèmes de prises de vues modernes

La qualité des prises de vues a été longtemps le résultat d'un compromis entre le pouvoir de résolution des films aériens et la luminosité des objectifs. Pour illustrer ce compromis, il convient d'analyser plus en détail le comportement physique d'une couche photographique. L'exposition d'un grain photographique nécessite un certain nombre de photons, indépendamment de la dimension du grain. Un film à grain grossier, avec un faible pouvoir de résolution, est très sensible et permet des temps d'exposition courts. Un film à grain fin, comme le Panatomic-X ou le High Definition de Kodak, nécessite beaucoup plus de lumière, donc un temps d'exposition plus long.

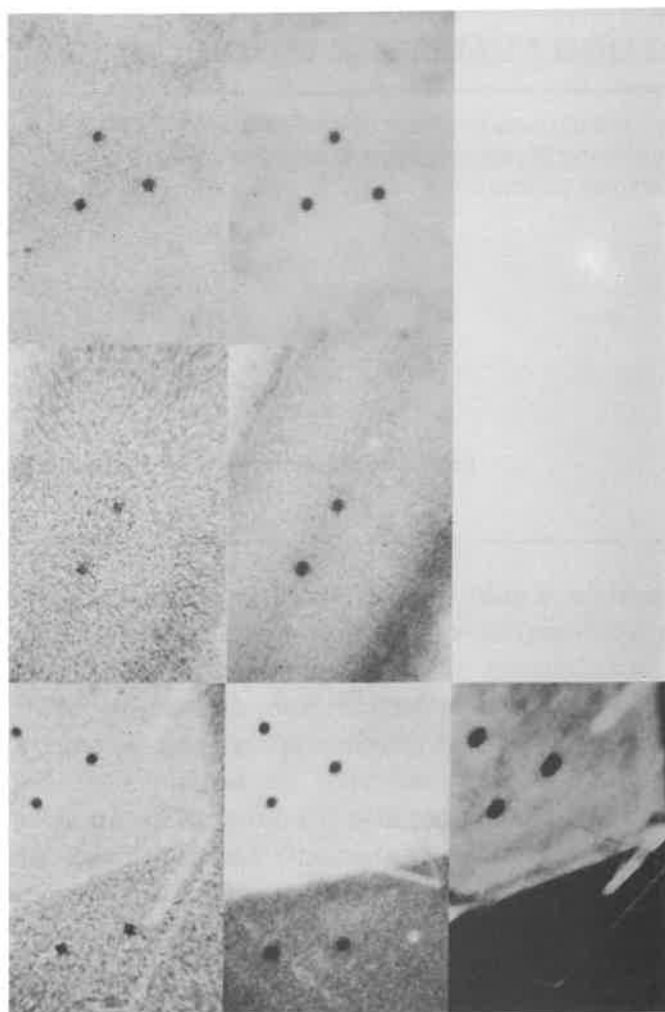


Fig. 1

Reproduction par 3 différents films Kodak de quelques points balisés : à gauche, film Double-X, au centre Panatomic-X puis High Definition. On remarque la granularité des films et, sur le film High Definition, le filé caractérisé par un allongement des signaux. Reproduction telle qu'elle apparaît sur le négatif.

Les fabricants de chambres aériennes se sont d'abord efforcés d'améliorer la luminosité des objectifs, mais un diaphragme de 1:4 semble représenter actuellement la limite des possibilités techniques. On a ensuite essayé de corriger le filé par un déplacement du film pendant la prise de vue, ce qui a permis d'augmenter le temps d'exposition jusqu'à 1/100 sec environ, du moins pour des prises de vues à haute altitude. Cependant, les turbulences atmosphériques à basse altitude (700-1500 m) ne permettent pas de profiter vraiment de la compensation du filé pour les prises de vues à grande échelle. Tout récemment, Carl Zeiss Oberkochen a présenté une chambre aérienne comportant un système inertiel pour la compensation des basculements, qui

autorise l'utilisation de films à haute résolution même pour des vols à basse altitude. Il reste à déterminer dans quelle mesure les solutions trouvées n'ont pas pour seul effet de nous ramener au problème de départ, c'est-à-dire la qualité des objectifs et les limites dues à la diffraction. On peut mentionner ici des investigations effectuées au Laboratoire de photogrammétrie, au cours desquelles 3 chambres de prises de vues aériennes ont été comparées et leurs fonctions de transfert déterminées sous des conditions de vol [1]. Le tableau 1 récapitule les objectifs testés, et la fig. 2 présente les fonctions de transfert de ces objectifs et du film Kodak Panatomic-X. Pour une meilleure compréhension des courbes de transfert, une série de micro-photos de quelques points signalisés illustre la différence de qualité entre ces objectifs. Il s'avère ainsi que, selon le type d'objectif utilisé, des signaux de 7 cm sur le terrain sont visibles sur des clichés à l'échelle 1:3 000. Une augmentation de la qualité des objectifs devrait par conséquent être particulièrement intéressante lors de travaux à grande échelle et pour des applications cadastrales, le balisage des points étant dans ce dernier cas un facteur déterminant pour la rentabilité de la photogrammétrie.

Les essais mentionnés ont eu lieu en 1984; depuis lors, Carl Zeiss Oberkochen a annoncé un objectif grand-angulaire avec une meilleure définition d'image, ce qui prouve que les chambres de prises de vues aériennes sont encore en plein développement [2].

	F i r m e		
	Zeiss Jena	Wild	Zeiss Oberkochen
Chambre de prise de vues	LMK	RC10A	RMK A2
Objectif	Lamegon Pl 4.5/150c Nr. 244679A	Universal Aviogon 15/4 UAGA Nr. 13033 (prototype)	Pleogon A2 4/153 Nr. 127782
Ouverture maximum de l'objectif	1:4,5	1:4	1:4
Valeur effectivement utilisée	1:5,6	1:4	1:4

Tableau 1

Caractéristiques des chambres de prises de vues utilisées pour le test comparatif.

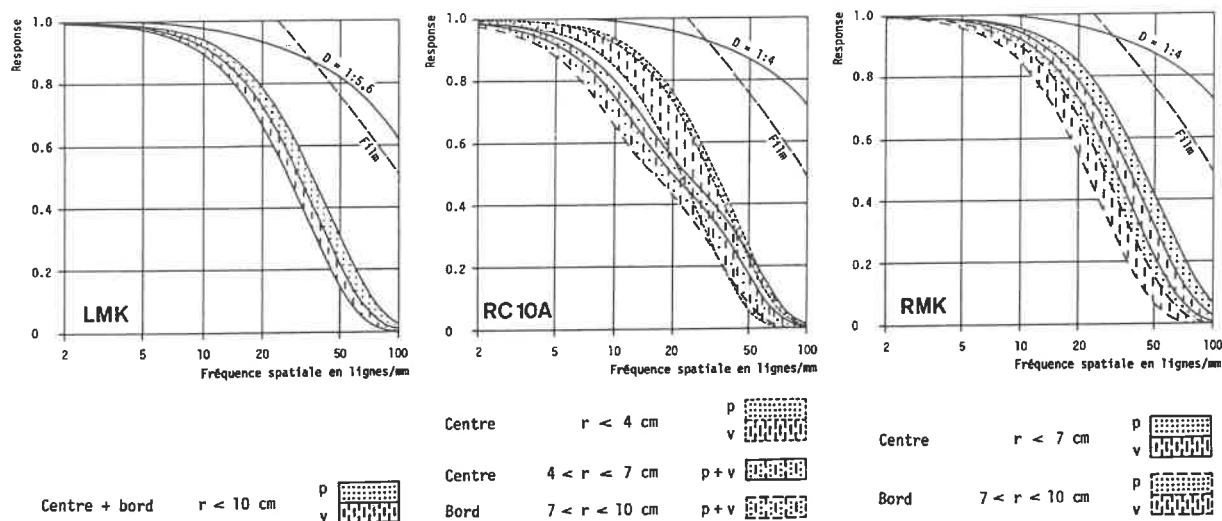


Fig. 2

Fonctions de transfert des différentes chambres de prises de vues aériennes, obtenues sous des conditions de vol, avec le film Panatomic-X. Les courbes donnent ces fonctions dans la direction du vol (v) et perpendiculairement à cette direction (p). Les valeurs limites des fonctions pour les ouvertures utilisées (D) sont également représentées.

2.2 Systèmes de prises de vues alternatifs

La qualité du matériel de prise de vues est loin d'être uniforme et, lors de l'établissement de contrats, il est important de s'assurer que le rapport qualité-prix est optimum. L'extrême bas de gamme dans ce domaine peut être représenté par un système de prise de vues régulièrement utilisé au Laboratoire de photogrammétrie et par quelques entreprises privées en Suisse. Il s'agit de la chambre aérienne manuelle Linhof Aerotechnika, format 9x12 cm, qui s'utilise à partir d'avions de tourisme ou d'hélicoptères (fig. 4 + 5). Avec ce matériel, on n'arrive à respecter la verticale qu'à 10-15 degrés près, ce qui est suffisant pour ne pas gêner la vision stéréoscopique. Un restituteur analytique n'a en outre guère d'autre limitation concernant la verticalité des photos; il permet aussi de tenir compte des distorsions de l'objectif, même si celles-ci sont très importantes. La navigation avec un avion de tourisme pose également des problèmes, mais le plus gênant demeure l'instabilité de la chambre lors des prises de vues. Un tel système ne se prête qu'à des projets limités à quelques modèles. Sur un restituteur analytique, il n'y a guère d'autre limitation; d'autre part, ces appareils permettent de prendre en considération des distorsions considérables.

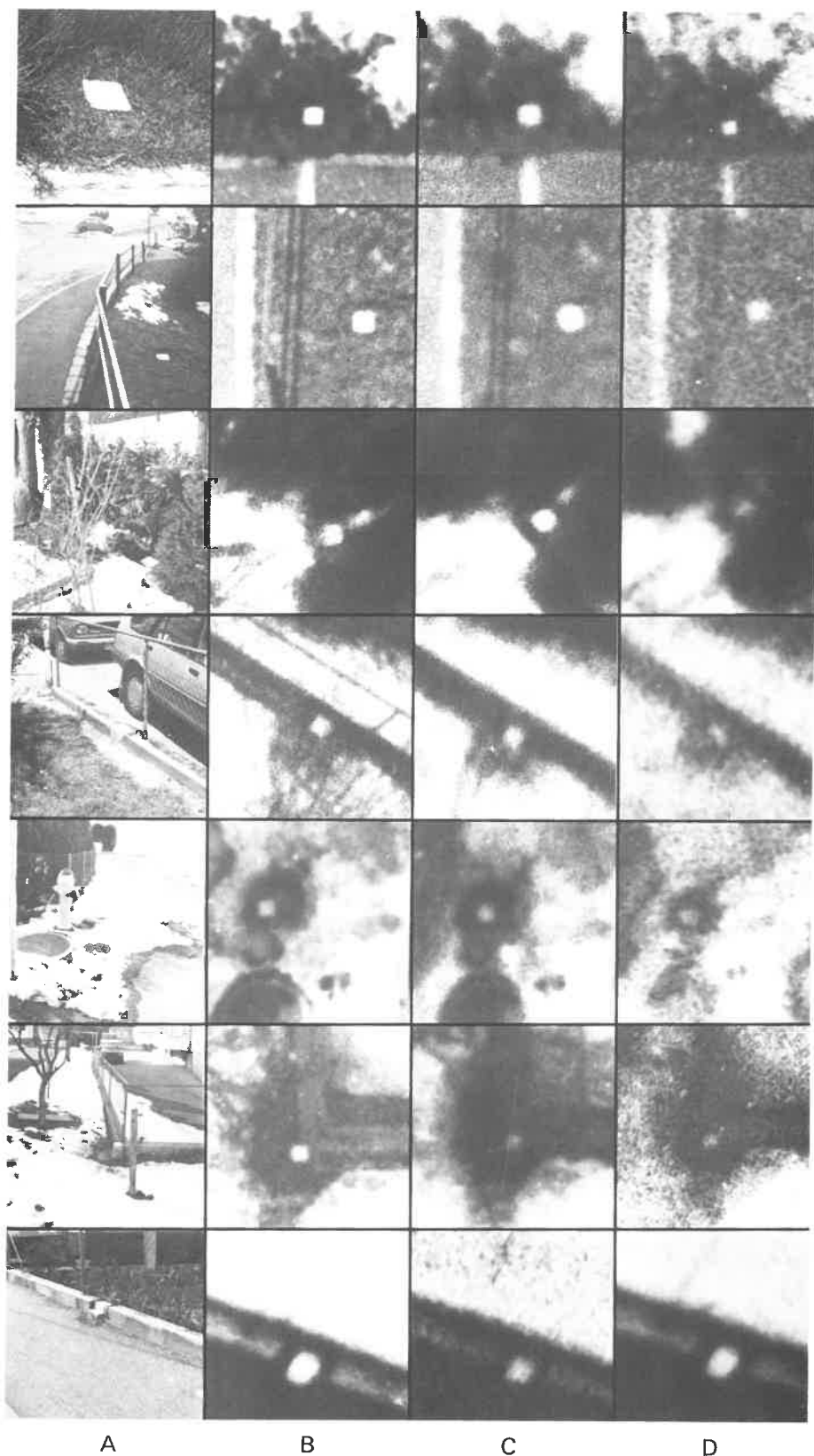


Fig. 3

Micro-agrandissements de points signalisés sur le terrain : extraits de photographies prises avec les chambres LMK et RC10A.

A - Aspect sur le terrain des points signalisés.

B - Image obtenue avec la chambre LMK, avec compensation du filé;
échelle originale 1:3 000, agrandissement 40 x

C - Image obtenue avec la chambre RC10A; échelle originale 1:3 000, agrandissement 40 x

D - Image obtenue avec la chambre RC10A; échelle originale 1:5 500, agrandissement 80 x

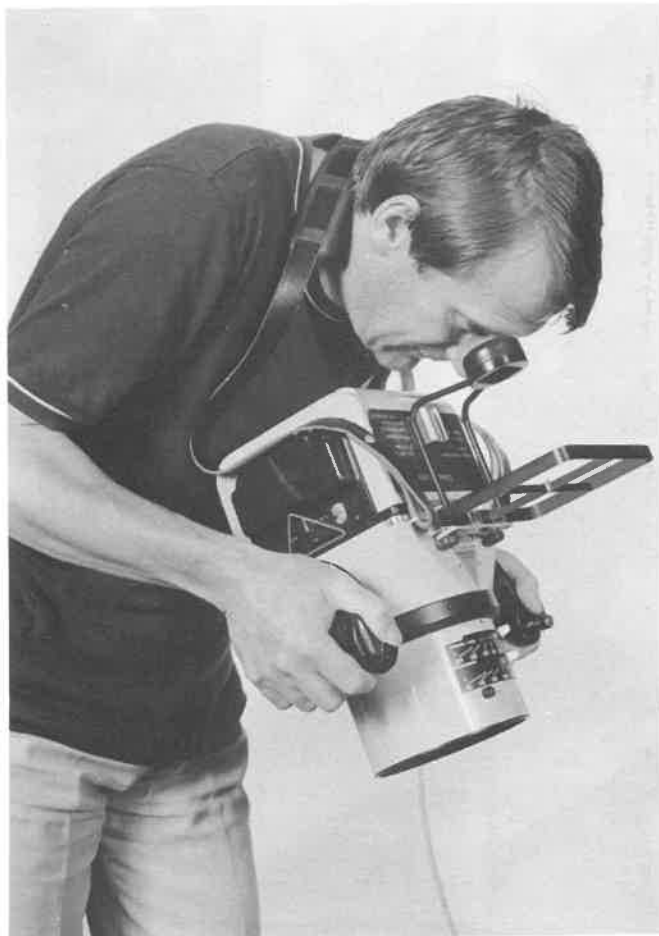


Fig. 4

Chambre de prises de vues aérienne Linhof Aerotechnika.

Fig. 5

Manipulation de la chambre Linhof à partir d'un avion léger. L'opérateur travaille avec la porte ouverte et cherche à obtenir des vues aussi verticales que possible.



Pour un vol photogrammétrique, il est très important de travailler avec des prises de vues de grand format et il n'est pas recommandé d'utiliser des formats encore plus petits. Un tel équipement de prises de vues devrait aussi trouver un champ d'application en photogrammétrie architecturale pour la conservation des monuments. Quelques autres développements, comme par exemple le système Rollei, semblent s'engager dans cette direction.

2.3 Géodésie spatiale

En photogrammétrie, la géodésie spatiale est intéressante à double titre : d'une part pour la navigation, et d'autre part pour réduire le nombre de points d'appui d'un canevas.

2.3.1 Navigation

En règle générale, les vols photogrammétriques se font en navigation à vue, à l'aide notamment de la lunette de navigation et du régulateur de recouvrement. Comme référence, on utilise un plan de vol reporté sur une carte au 1:25 000 ou au 1:50 000. On se sert du régulateur de recouvrement pour déclencher les prises de vues à intervalles réguliers, en fonction du recouvrement désiré (généralement entre 60 et 90%); pour des prises de vues à grandes échelles, on peut de cette manière respecter la ligne de vol avec une précision de ± 50 m. Cependant, un déclenchement manuel demande des précautions particulières; en effet, un bloc formé de plusieurs lignes montre rarement une composition très régulière et les photos sont souvent décalées dans le sens du vol, d'où la nécessité d'augmenter le nombre de points de liaison. L'utilisation de la technique de navigation GPS (Global Positioning System) devrait permettre d'obtenir la formation de blocs réguliers par le déclenchement automatique des prises de vues sur des points préalablement définis. Les frais relativement bas pour des instruments de navigation faciliteraient leur grande diffusion et simplifieraient même les missions de prises de vues avec les techniques alternatives décrites plus haut. C'est malheureusement à partir de 1991 seulement que l'on disposera de satellites en nombre suffisant pour une utilisation opérationnelle.

2.3.2 Positionnement cinématique par GPS

En photogrammétrie, il est aussi intéressant de connaître les coordonnées exactes des prises de vues ainsi que l'inclinaison de l'axe de la chambre. Actuellement, les éléments d'orientation des chambres de prises de vues sont déterminés lors des orientations relative et absolue des clichés ou lors d'une triangulation aérienne. En mode cinématique, la technique GPS permet d'obtenir des précisions de l'ordre du décimètre ou même mieux, ce qui nécessite de recourir à la technique différentielle (fig. 6). Couplé avec un système inertiel pour déterminer aussi l'inclinaison de l'axe de prise de vue, ce procédé permet de réduire considérablement le nombre de points d'appui du canevas, donc de réduire encore le coût d'une triangulation aérienne.

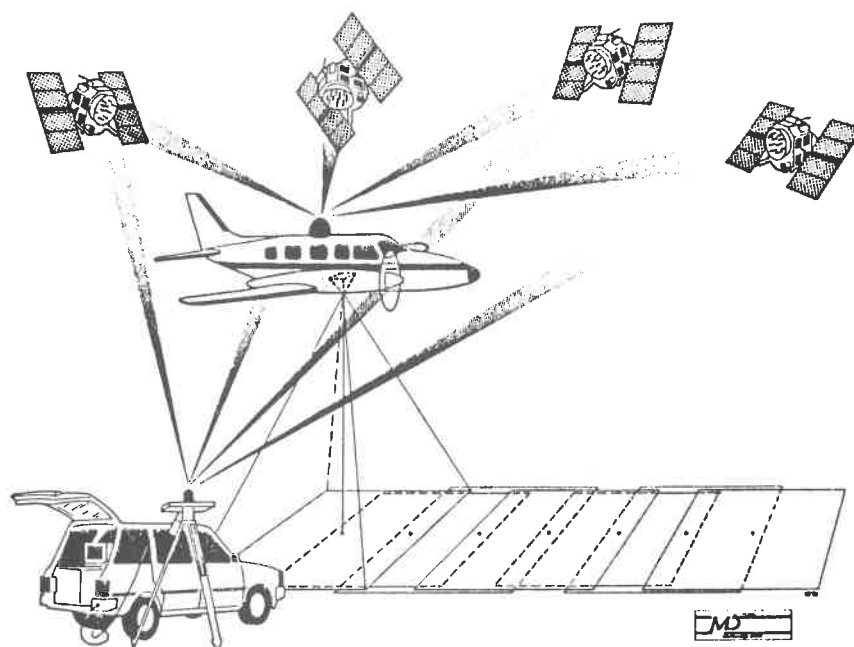


Fig. 6

Utilisation de la géodésie spatiale pour la localisation de la position des prises de vues lors d'un vol photogrammétrique. Une station de référence au sol permet de travailler avec la technique différentielle.

(figure tirée de 'GPS Test Flight Flevoland' par H.J.W. van der Vegt, actes de la 42e Semaine photogrammétrique, Stuttgart 1989)

3. Restitution photogrammétrique

Au cours de ces dernières années, la restitution photogrammétrique a subi de profonds changements. Il y a quelques années encore, le restituteur analogique représentait l'appareil standard; aujourd'hui, par contre, on utilise presque exclusivement des instruments analytiques. Au début, le restituteur analytique ne se distinguait d'un appareil analogique que par le système de projection, composé d'éléments électroniques au lieu d'éléments mécaniques. De ce fait, le travail de l'opérateur lors de la restitution n'était guère modifié, cependant, le processus d'orientation des clichés était largement facilité. La possibilité de diriger l'instrument sur un point déterminé à l'aide de coordonnées prédéfinies a permis l'interaction entre la mémoire des données et le processus de restitution. Avec les méthodes de dessin assistées par ordinateur, l'information cartographique est aujourd'hui stockée sous forme numérique et n'est dessinée que dans la phase finale du travail. On commence aussi à intégrer cette information dans des systèmes d'information à référence spatiale. D'autre part, à l'analyse purement visuelle des photos lors de la restitution vient s'ajouter la possibilité du traitement numérique d'image.

Un restituteur photogrammétrique moderne se compose des éléments suivants :

- porte-clichés avec système de balayage et système de mesure
- système d'asservissement et processeur temps réel
- système d'observation stéréoscopique
- ordinateur-hôte avec système de gestion des données

Comme périphériques, on a notamment :

- table traçante
- dispositif d'injection d'image
- processeur d'image
- traceur électrostatique pour la sortie des documents graphiques ou pictoriels

3.1 Restituteurs analytiques

Les premières recherches pour concevoir un restituteur analytique ont débuté en 1956 sous la direction de U.V. Helava et un premier prototype a été officiellement présenté en 1963. Il a ensuite fallu attendre 1976 pour voir apparaître le Planicomp de Carl Zeiss Oberkochen et, à peu près en même temps, le Traster de Matra. Quelques années plus tard, Wild a produit le AC1 et Kern le DSR1. Dès cette époque, les restituteurs analytiques ont commencé à être largement utilisés dans la pratique, la fiabilité des composants électroniques ayant alors atteint un niveau permettant une grande diffusion de ces instruments.

3.1.1 Instruments avec monoprocesseur

A l'exception du DSR1 de Kern, qui disposait déjà d'un processeur spécial pour le cycle temps réel, les instruments de la première génération avaient encore une structure très simple; le cycle temps réel et l'asservissement des porte-clichés s'effectuaient sur l'ordinateur principal (fig. 7). On pouvait de cette manière travailler avec un seul ordinateur, mais la possibilité d'extension des programmes de calcul était très limitée et représentait une tâche ardue.

3.1.2 Instruments avec multiprocesseur

Dans un restituteur analytique, l'asservissement des porte-clichés est soumis à des contraintes strictes car chaque déplacement nécessite le calcul en continu des coordonnées-terrain; ce calcul doit en outre tenir compte des éléments d'orientation et de la distorsion. Cette opération doit s'effectuer en temps réel, c'est-à-dire 50 à 100 fois par seconde, sinon l'opérateur a le sentiment que la marque-repère "vibre" lors des déplacements. Lors de l'asservissement des chariots, il est aussi primordial de s'assurer que le déplacement est en parfaite synchronisation avec les mouvements des manivelles.

Comme le cycle temps réel requiert un effort de calcul important, il est avantageux de prévoir un processeur spécifique pour cette tâche. Pratiquement tous les restituteurs analytiques de la nouvelle génération sont équipés d'un processeur temps réel spécialement destiné à cet usage.

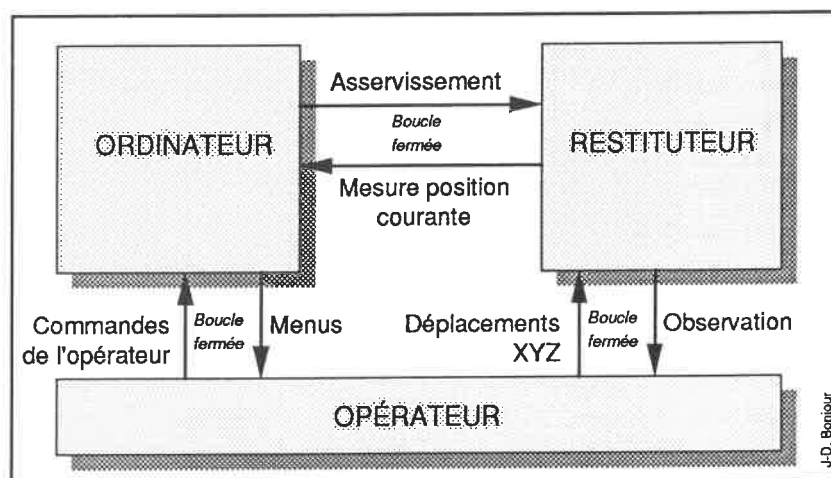


Fig. 7

Schéma de base du restituteur analytique. On remarquera les trois boucles fermées d'interaction entre les 3 composants en présence : opérateur, restituteur et ordinateur.

3.2 Cartographie assistée par ordinateur

Une des caractéristiques principales de la restitution photogrammétrique est la possibilité de restituer directement des lignes et des courbes de niveau. Cette possibilité existait déjà sur les restituteurs analogiques, mais le résultat de la restitution graphique n'était qu'un manuscrit qui nécessitait encore un travail cartographique. Les systèmes de dessin assistés par ordinateur ont permis d'améliorer la présentation graphique; aujourd'hui, un plan est généralement stocké sous forme numérique et n'est représenté graphiquement que sur demande, sur table à dessin ou sur écran graphique.

Le traitement numérique des données cartographiques permet non seulement l'élaboration d'une carte, grâce à un système d'édition, mais également l'incorporation de mesures complémentaires effectuées sur le terrain. Pratiquement tous les restituteurs analytiques utilisés aujourd'hui peuvent être équipés d'un logiciel pour la cartographie numérique.

3.3 Dialogue homme-machine et injection d'image

En photogrammétrie, on attache une grande importance au confort de l'opérateur. La quantité d'informations à traiter lors d'une restitution photogrammétrique est considérable, et un bon confort d'utilisation conduit à un meilleur rendement. Le dialogue avec l'ordinateur d'un restituteur analytique se fait en général par l'intermédiaire de menus et ne nécessite pas un apprentissage trop long. Cependant, ce confort d'utilisation n'atteint pas encore le degré de convivialité d'un Macintosh par exemple. Des essais de commande par la parole ont été tentés mais n'ont pas été concluants.

Si le dialogue avec l'ordinateur se limite à quelques commandes lors de l'orientation des clichés, la restitution elle-même, en particulier pour les mises à jour, nécessite une analyse comparative poussée entre les photographies aériennes et le plan. Ce dernier est généralement placé sur la table à dessin, ou affiché sur un moniteur s'il est fourni sous forme de données numériques. Les photographies aériennes, par contre, sont observées à travers les oculaires du restituteur. La marque-repère dans le restituteur et le crayon sur la table à dessin établissent la relation entre les photos et le plan. Une comparaison entre ces deux documents lors de la mise à jour ou du contrôle de l'intégrité peut se révéler assez laborieuse.

Dans ce contexte, l'injection d'image représente un formidable progrès. Cette technique consiste à injecter dans le système optique du restituteur l'image de la carte, affichée par ailleurs sur un moniteur et correspondant à la zone couverte par le couple de clichés aériens. Le premier système d'injection d'image, développé par Intergraph, a été présenté vers 1983, puis Carl Zeiss Oberkochen a proposé le Video Map. Il s'agissait de systèmes monoculaires, la carte n'étant superposée qu'à une seule photo du couple stéréoscopique. Enfin, en 1986, Wild a produit son nouveau restituteur analytique S9-AP, dont le système d'injection d'image en stéréo a été développé au Laboratoire de photogrammétrie de l'EPF-Lausanne (fig. 8 et 9). Depuis lors, d'autres firmes ont aussi essayé de développer des systèmes d'injection d'image en stéréo.

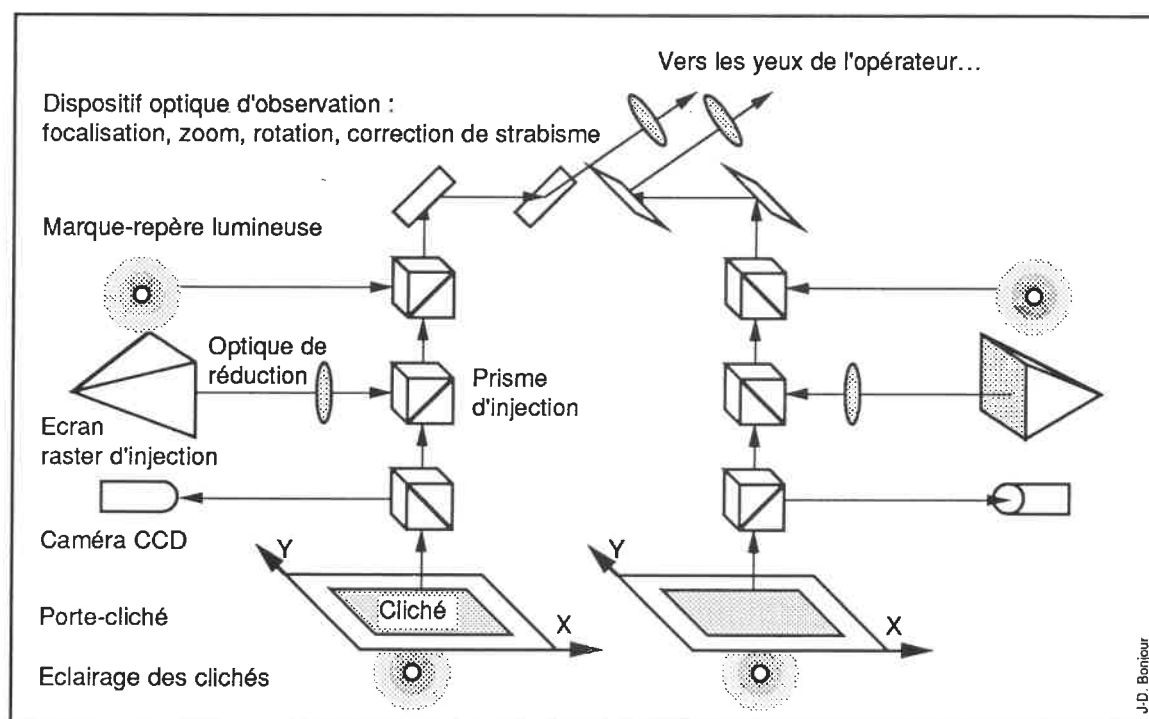


Fig. 8

Vue schématique du dispositif optique d'une station photogrammétrique comprenant un système d'injection d'image stéréoscopique et des caméras CCD.



Fig. 9

Vue d'ensemble du restituteur analytique System9-AP de Prime Wild GIS dans lequel est incorporé un système d'injection d'image; l'appareil travaille en liaison directe avec un système d'information géographique.

Les exigences techniques pour une injection d'image, surtout en stéréo, sont très élevées à cause des déplacements continuels des porte-clichés du restituteur analytique. Ainsi l'image sur le moniteur doit être déplacée, en fonction des mouvements des photos sur les porte-clichés, à une fréquence d'au moins 60 fois par seconde. La résolution optique et la précision géométrique de l'affichage doivent aussi correspondre à celles des photographies aériennes. On réalise très vite la nécessité de disposer d'un écran comportant au moins 1000 x 1000 pixels; la dimension des pixels devrait être de 10 microns au maximum à l'échelle des clichés. Dans le S9-AP, ces conditions ont pu être remplies grâce à une mémoire virtuelle de 32 000 x 32 000 pixels et à l'utilisation de processeurs de signaux spécialisés. Lors de l'injection, il est important que la projection centrale des deux images soit respectée de manière rigoureuse; une parfaite vision stéréoscopique de la carte superposée est indispensable pour pouvoir contrôler l'exactitude de la géométrie et pour assurer une observation confortable.

Les exigences mentionnées ci-dessus sont essentiellement dictées par la qualité actuelle des photographies aériennes. La précision géométrique des restituteurs analytiques est généralement suffisamment élevée; lors d'une triangulation aérienne, on obtient des précisions de mesure d'environ $\pm 2 \mu\text{m}$ avec la plupart de ces restituteurs [3]. Cependant, on a l'impression que l'optique n'est pas toujours adaptée à la qualité des prises de vues actuelles, surtout si l'on travaille avec les négatifs originaux.

4. Le rôle des systèmes d'information en photogrammétrie

L'introduction des systèmes d'information et la gestion des données géométriques par des banques de données représentent une véritable révolution en cartographie. Il est important de réaliser que l'introduction des systèmes d'information n'a pas pour seul but de créer la cartographie numérique. Tout en permettant l'édition de documents graphiques, ces systèmes ont en fait une fonctionnalité beaucoup plus large. En règle générale, un système d'information comporte les fonctions suivantes :

- saisie des données
- gestion des données
- analyse des données
- présentation de l'information

La gestion de données géométriques exige une structuration appropriée de l'information par rapport aux objets et l'on peut de ce fait établir des relations de voisinage, généralement au moyen d'une banque de données relationnelles. Cette particularité différencie un système d'information géographique de la nouvelle génération d'un simple système cartographique.

Pour un profane, la nécessité de structurer les données par rapport aux objets peut paraître utile sans être forcément contraignante. Il ne faut pourtant pas oublier qu'une seule feuille d'une carte nationale représente une énorme masse de données numériques, destinées non seulement à être gérées mais aussi analysées. Pour une feuille à grande échelle, on obtient facilement jusqu'à 100 000 vecteurs, et pour des cartes à petites échelles ce chiffre augmente dans des proportions considérables. S'il s'agit simplement de déplacer une maison ou un tronçon de route, on est vite contraint de rechercher quelque mille points donnés par leurs coordonnées, de changer leur code ou de les éliminer. Si, par contre, l'objet peut être retrouvé en tant qu'entité, il en résulte une plus grande flexibilité, d'où la supériorité d'un véritable système d'information à référence spatiale par rapport à un simple système cartographique.

Un écran graphique et une table de digitalisation constituent la place de travail classique d'un système d'information géographique. Lors de l'introduction des données ou lors de leur mise à jour, l'opérateur en vérifie l'intégrité sur l'écran graphique. Lors de la saisie par photogrammétrie, le même contrôle peut être obtenu si l'image de l'écran du système d'information est injectée dans les oculaires du restituteur, comme c'est par exemple le cas pour le System9-AP. Il est cependant important que le rythme de travail de l'opérateur au restituteur ne soit pas affecté par la liaison avec le système d'information géographique. Cette condition est toutefois difficile à satisfaire vu la lourdeur actuelle des banques de données relationnelles.

5. Traitement numérique d'image et restitution photogrammétrique

Jusqu'ici, toutes les considérations sur les prises de vues et leur restitution se référaient à l'image photographique en tant que document analogique. Cela peut surprendre si l'on songe aux progrès réalisés en télédétection et aux travaux relatifs aux images SPOT. Cependant, l'effort pour mémoriser une image numérique est actuellement considérable et dépasse de beaucoup celui qui est nécessaire au stockage d'une simple image photographique. On recourt néanmoins de plus en plus à des procédés numériques comme étape intermédiaire, par exemple pour l'amélioration d'une image ou pour sa transformation géométrique, mais aussi pour l'élaboration d'un modèle numérique du terrain.

5.1 Reproduction d'images et orthophotos

Pour des travaux de haute qualité, l'imprimerie fait de plus en plus appel à des procédés numériques afin d'obtenir une meilleure adaptation du contraste ou une meilleure harmonisation des couleurs, mais aussi pour des assemblages d'images ou des montages. En photogrammétrie, un tel procédé est particulièrement intéressant pour la réalisation et la reproduction d'orthophotos. Actuellement, l'entreprise belge Eurosense Technologies réalise couramment des orthophotos par procédés numériques. La firme Kern a également équipé son restituteur analytique DSR15 de caméras numériques et offre un système de programmes pour la production d'orthophotos numériques.

Le problème de la numérisation des documents photographiques est aujourd'hui résolu; on peut notamment utiliser un restituteur analytique équipé de caméras numériques. Il faut signaler toutefois que les scanners usuels ne sont pas appropriés pour cette tâche, car ils ne sont pas prévus pour la haute résolution d'une image photographique. Si l'on veut s'assurer que la totalité des informations contenues sur une photographie aérienne soit numérisée, il faut travailler avec des pixels d'environ 5 microns. Le nouvel appareil de numérisation présenté en septembre dernier par Carl Zeiss Oberkochen et développé en collaboration avec Intergraph semble répondre à cette exigence.

L'imprimerie dispose également, pour la reproduction d'images, d'instruments efficaces basés sur des procédés photographiques. De tels procédés ne sont financièrement intéressants que si l'on prévoit des reproductions en grande série. Pour des tirages limités ou des exemplaires uniques, ces solutions sont relativement onéreuses. Jusqu'à maintenant, on a souvent utilisé l'héliographie pour la reproduction d'orthophotos tramées. Pour ce travail, des traceurs électrostatiques de haute qualité ou des imprimantes laser de grand format devraient apparaître prochainement sur le marché. Dans ce contexte, il est intéressant de constater que l'Ordnance Survey a équipé son bureau de vente de Birmingham d'un traceur électrostatique afin d'imprimer sur demande des cartes à grande échelle en couleurs.

Si la reproduction d'image peut être considérée comme un procédé passif, les mesures automatiques de terrain sont par contre des procédés beaucoup plus complexes. Le premier système opérationnel pour les mesures automatiques du terrain et l'établissement d'orthophotos a été élaboré par Hobrough dans les années 70. Divers corrélateurs avaient déjà été présentés auparavant, mais ils n'avaient trouvé qu'une utilisation limitée. La plupart des processeurs utilisés alors étaient basés sur des techniques analogiques et leurs performances étaient par conséquent trop limitées.

Les procédés numériques semblent plus favorables, et une bonne partie de la recherche en photogrammétrie se concentre actuellement sur ce sujet. Il semble que des procédés opérationnels soient déjà disponibles pour des applications industrielles [4]; des procédés intéressants sont aussi disponibles pour la cartographie à petite échelle et pour la mesure automatique des altitudes à partir d'images satellitaires, alors que la cartographie à grande échelle se heurte encore à des problèmes difficiles à résoudre.

Depuis quelques années, le Laboratoire de photogrammétrie de l'EPF-Lausanne a entrepris une recherche sur ce problème en collaboration avec Kern. Tous les tests indiquent que l'on s'achemine vers une solution satisfaisante. Pour la dérivation d'un modèle numérique de terrain, la grande difficulté réside dans le développement d'algorithmes suffisamment robustes pour être aptes non seulement à corrélérer les images, mais aussi à déterminer si les points mesurés se trouvent effectivement sur le terrain proprement dit et non pas sur des maisons ou des arbres par exemple. Une autre difficulté réside dans la mise à disposition de procédés permettant un contrôle complet des résultats des mesures avec possibilité d'introduire des corrections. Le système de corrélation d'images développé au Laboratoire de photogrammétrie travaille avec le 'Multi-Templet Matching', un algorithme de calcul dérivé de la programmation dynamique. Le procédé est basé sur le calcul des parallaxes altimétriques de sections d'images de dimensions variables. Ces parallaxes sont introduites dans un processus de compensation permettant une approximation du terrain par éléments finis. Les sections de photographies aériennes sont ensuite géométriquement déformées pour être adaptées l'une à l'autre et la corrélation d'images est alors réalisée itérativement (fig. 10). Afin d'accélérer ces opérations, les calculs sont exécutés sur un réseau de Transputers. Les éléments indésirables du terrain sont finalement éliminés par filtrage et les données sont injectées dans un restituteur analytique pour contrôle et édition.

Selon les tests actuels, il semble possible de traiter complètement automatiquement un modèle de 50 ha à une échelle-image de 1:5 000 en 2 à 10 heures, en fonction du nombre de Transputers utilisés. La précision obtenue est de l'ordre de 0,1‰ de l'altitude de vol lorsque 70% au moins de la superficie totale sont représentés par du terrain découvert. Ce procédé devrait permettre d'élaborer à moindre frais des documents destinés à des travaux de planification et ouvrirait la voie vers une photogrammétrie numérique complètement automatisée.

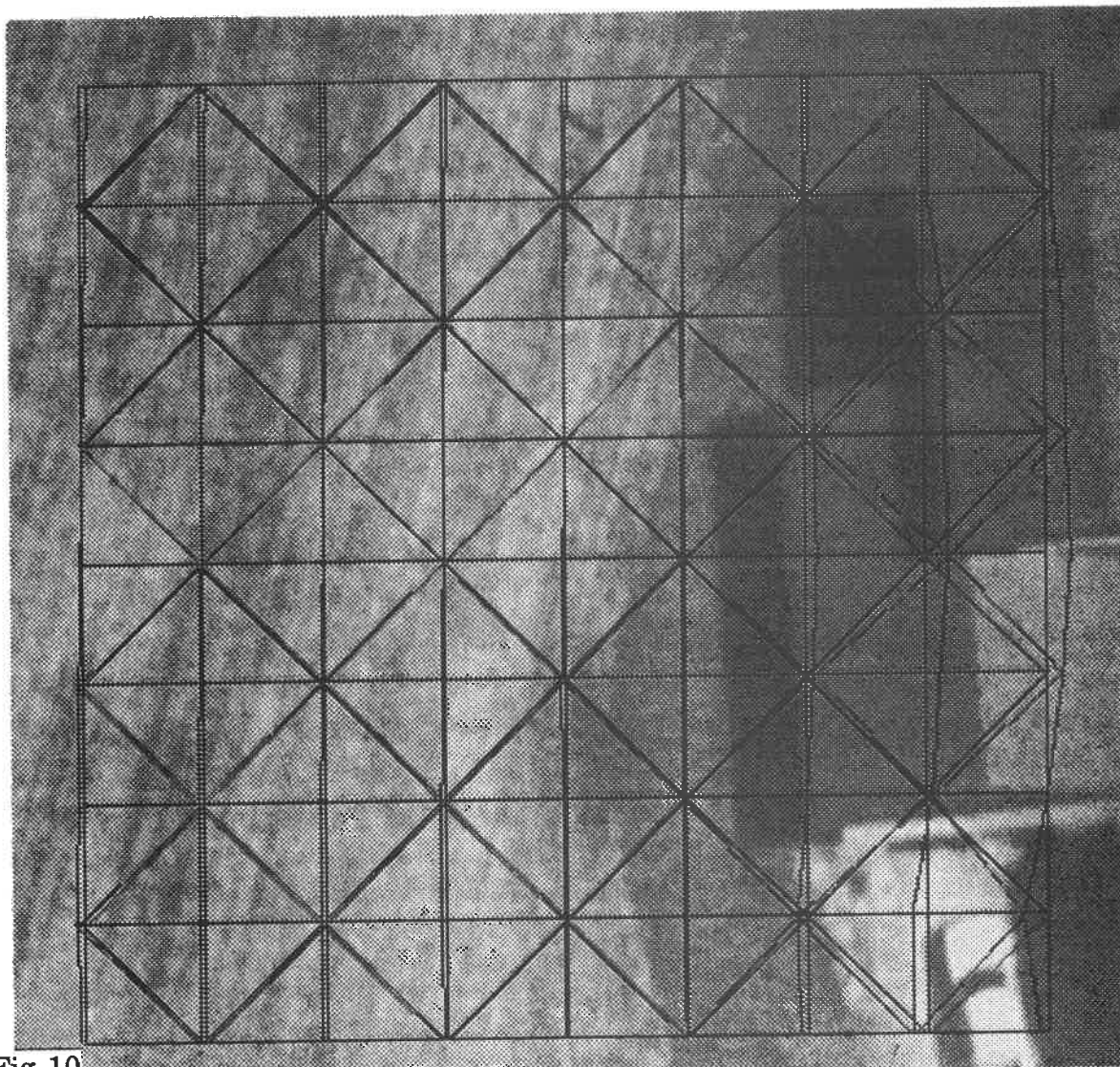


Fig. 10

Résultat d'une corrélation automatique lors de laquelle le terrain a été modelé au moyen d'éléments finis, représentés ici par la grille régulière (triangles) qui sert de référence pour l'appréciation des parallaxes. Les lignes déplacées montrent l'importance des parallaxes, assez considérables au niveau de la maison sur la droite alors que la partie gauche est plus ou moins horizontale.

5.3 Restituteur numérique

Les progrès en traitement numérique d'image laissent entrevoir la possibilité de réaliser des instruments purement numériques pour la restitution des photographies aériennes. Il suffirait, en principe, d'un moniteur de haute résolution et d'une mémoire-image suffisamment grande. L'observation stéréoscopique des images, affichées sur un écran divisé en 2 parties, pourrait être réalisée soit par un système d'observation optique soit au moyen d'un écran de polarisation. La marque-repère serait composée d'un ou plusieurs pixels plus clairs dirigés par un curseur. On peut, de la même manière, afficher sur l'écran des lignes ou des symboles engendrés lors de la restitution en les superposant aux photographies aériennes.

Lors du dernier Congrès de Photogrammétrie à Kyoto, Kern, Matra et Toko ont présenté de tels systèmes. Leur qualité d'image et leurs performances n'atteignent pas encore celles des restituteurs analytiques. On peut toutefois espérer que le coût de tels appareils devienne beaucoup plus accessible dans un proche avenir.

Ces diverses considérations laissent supposer que le traitement numérique d'image influencera de façon décisive la restitution des photographies aériennes. Mais, de même que le restituteur analytique n'a pas simplement repris les fonctions d'un restituteur analogique en les adaptant, il faut aussi s'attendre à ce que la restitution numérique ouvre un large éventail de nouvelles perspectives. Il n'y aura certainement pas d'instrument standard, mais un certain nombre d'appareils qui pourront être regroupés dans un système.

Les éléments suivants feront probablement partie d'un tel système :

- **scanneur** pour la transformation d'images analogiques en images numériques
- **mémoire d'image** de quelques gigabytes pour le stockage de l'information d'image, probablement en liaison avec des disques optiques
- **compositeur d'image**, processeur d'image avec écran graphique pour la correction des tons de gris et l'assemblage des images, ainsi que pour le montage et l'incorporation de l'écriture
- **processeur parallèle** pour l'établissement automatique de modèles numériques du terrain, la production d'orthophotos ou de modèles de paysages, ainsi que pour des triangulations aériennes automatisées
- **système d'information géographique** utilisant comme fond de carte des photographies aériennes (monoplotter)
- **stéréorestituteur avec injection d'image** (numérique ou analogique) pour le contrôle des résultats de la restitution automatique et pour la restitution visuelle

5.4 Photographies aériennes comme fond de carte pour un système d'information géographique

La combinaison d'un restituteur numérique avec un système d'information géographique est une solution intéressante qui a été déjà brièvement abordée. A l'avenir, les systèmes d'information géographique seront utilisés pour les travaux de planification les plus divers. Une partie importante du travail s'effectuera à l'écran graphique, sur lequel sera affiché le contenu des divers plans ainsi que d'autres informations. L'information fournie par une carte de signatures est abstraite et peut facilement mener à de fausses conclusions, surtout si le contenu de la carte est incomplet ou n'a pas été suffisamment bien mis à jour. Dans ce contexte, l'incorporation de photographies aériennes ou même terrestres pourra représenter une aide précieuse; ces photos devraient également être affichées sur l'écran graphique en même temps que la carte de signatures. Des systèmes d'information aptes à combiner photographies aériennes et plans graphiques ont été développés entre autres par Intergraph et par Siemens (système SICAD). Dans ce cas, la photo aérienne est affichée à l'écran; en utilisant des orthophotos, on obtient une référence géométrique précise qui pourrait même être utilisée pour la mise à jour des données du système d'information. Il est évident que cette combinaison d'images exige une numérisation des documents photographiques.

- **traceur électronique** pour la production de documents pictoriels et de cartes de signatures
- **"recorder" d'images photographiques**, pour la production de documents de haute qualité destinés à l'impression

Cette liste n'est certainement pas exhaustive, mais elle montre que le stéréorestituteur n'aura plus le rôle central qu'il a joué jusqu'à maintenant. De nombreux procédés, comme la corrélation d'images, devraient être complètement automatisés. Ces opérations demanderont des processeurs performants, probablement des processeurs parallèles comme les réseaux de Transputers développés actuellement, notamment au Laboratoire de photogrammétrie de l'EPFL. De tels processeurs seront probablement aussi intéressants pour d'autres opérations nécessitant d'importants calculs, comme par exemple l'exploitation d'une banque de données pour un système d'information géographique.

6. Conclusions

Le panorama présenté illustre l'essor actuel des produits de la photogrammétrie et de ses possibilités techniques. Lors de l'élaboration des spécifications de précision, il faut être conscient que les moyens photogrammétriques s'adaptent très facilement aux exigences spécifiques de chaque cas; les frais entraînés par un projet sont cependant toujours en rapport direct avec la précision exigée.

Les techniques de prise de vues sont déjà bien adaptées aux exigences techniques et aux spécifications de précision. Les prises de vues aux échelles 1:3 000 à 1:8 000 ont fait leurs preuves pour des restitutions à grandes échelles. Des clichés aux échelles 1:20 000 à 1:50 000 s'appliquent en règle générale à la cartographie topographique et on essaie même de recourir à des vues prises depuis des satellites. Les frais de prises de vues représentent rarement plus de 10% du coût total d'un projet de cartographie; c'est pourquoi des clichés d'échelles trop petites peuvent augmenter très vite les frais totaux, en particulier en ce qui concerne les mesures complémentaires sur le terrain.

En photogrammétrie, la triangulation aérienne par la méthode des faisceaux permet d'obtenir une précision de $\pm 2-5$ cm pour des prises de vues à grandes échelles; dans ce cas, il suffit en général de disposer de points d'ajustage à la périphérie de la zone à cartographier. L'incorporation de mesures GPS faites à partir de l'avion devrait permettre de réduire encore considérablement le nombre de points d'appui nécessaires.

Les exigences de précision sont souvent trop élevées, ou plutôt pas assez nuancées. Pour des projets de constructions ou des études de tracés, on exige en règle générale pour les plans une précision planimétrique et altimétrique de $\pm 20-50$ cm et la restitution d'un vaste secteur, dont une petite partie seulement sera utilisée. Pour l'étude d'un avant-projet, il suffirait très souvent de travailler sur de simples agrandissements photographiques et une série de profils en long et en travers; ce n'est que pour l'élaboration du projet de détail et l'exécution des travaux que des plans précis sont nécessaires. Selon ce principe, un avant-projet pour la réalisation d'un système de transport de haute capacité a été élaboré à Lausanne, entre le centre ville et la banlieue ouest (fig. 11) ; ce projet est actuellement en cours d'exécution.



Fig. 11

Elaboration d'un avant-projet pour un transport public de haute capacité à l'aide d'agrandissements photographiques et de profils en long et en travers. Le document montre une section du tracé général du futur TSOL à Lausanne ainsi que, schématisé, le profil en long correspondant.

L'avant-projet consistait à fixer le tracé optimal d'une longueur d'env. 6 km sur une surface totale à analyser de 20 km² et à choisir entre 4 différents systèmes de transport (métro léger, bus, monorail ou système suspendu). La zone touchée ayant subi de grandes modifications au cours des dernières années, les cartes à grande échelle n'étaient plus à jour. D'autre part, la région est relativement accidentée avec des différences altimétriques atteignant 200 m. Dans une première phase, un certain nombre de tracés ont été déterminés sur des agrandissements de photographies aériennes à l'échelle 1:1000 environ, et des profils en long et en travers ont été mesurés. Sur la base de ces travaux, le tracé définitif a été choisi et ensuite seulement les documents cartographiques pour la réalisation finale ont été élaborés. De cette manière il a été possible d'obtenir les documents nécessaires à la planification à relativement court terme et à moindre frais.

Dans un proche avenir, les procédés numériques devraient permettre d'élaborer presque aussi avantageusement des orthophotos avec une présentation altimétrique et d'intégrer ces données dans un système d'information. Ainsi les méthodes photogrammétriques devraient trouver une plus large utilisation car elles ne seront plus guère liées à des instruments très spécifiques. Néanmoins, les restituteurs analytiques hautement spécialisés resteront réservés pour des travaux de précision et de haut rendement. Ils seront ainsi revalorisés et un plus grand nombre d'entreprises s'engageront aussi dans ce type d'activités.

[1] O. Kölbl, J. Hawawini : "Analyse comparative de clichés pris avec différentes chambres de prise de vues aériennes", Bul. SFPT n° 102 (1986-2), pp. 37-51.

[2] H. Zügge : "RMK TOP - The New Aerial Survey Camera System from Carl Zeiss Oberkochen", Proceedings of the 42nd Photogrammetric Week, Stuttgart 1989, pp. 79-86.

[3] M. Jaakkola, W. Brindöpke, O. Kölbl, P. Noukka : "Optimal Emulsions for Large-Scale Mapping (Test of Steinwedel)", publ. off. no 15 de l'OEEPE, 1985, 102 pp.

[4] W. Förstner : "Image Analysis Techniques for Digital Photogrammetry, Proceedings of the 42nd Photogrammetric Week, Stuttgart 1989, pp. 205-221.

EVOLUTION DU RESEAU GEODESIQUE NATIONAL, REALISATION, MAINTENANCE ET UTILISATION PAR TECHNIQUES DE GEODESIE SPATIALE

Jean-Jacques LEVALLOIS, Ingénieur Général Géographe honoraire
Claude BOUCHER, Ingénieur Géographe en Chef — IGN France
Pascal WILLIS, Ingénieur Géographe — IGN France

- I. Historique de la Nouvelle Triangulation de la France (J.-J. Levallois).
- II. Etat actuel de la Nouvelle Triangulation de la France (C. Boucher).
- III. Les objectifs du nouveau Réseau Géodésique Français (C. Boucher).
- IV. Description du Réseau Géodésique Français (C. Boucher).
- V. L'apport des techniques spatiales pour la réalisation du Repère de Référence Français — RRF (P. Willis).
- VI. Réalisation et maintenance du Réseau de Base Français — RBF par l'utilisation du GPS de précision (P. Willis).
- VII. Utilisation du GPS pour le réseau de détail (P. Willis).
- VIII. Conclusions (C. Boucher).



J.-J. LEVALLOIS

I — Historique de la NTF

Depuis 1887, le Service Géographique de l'Armée (SGA) était devenu l'organisme chargé, non seulement des questions intéressant la géographie militaire, mais avait, ce qui fut sa tâche essentielle entre les deux guerres, la responsabilité de la cartographie du territoire français, de l'Afrique du Nord et depuis 1920 des états du Levant sous mandat. J'eus la chance d'y être admis en 1937 en qualité de géodésien.

La vie du géodésien se partageait entre les missions en France et Outre-Mer.

Le matériel d'observation était bon, les cercles azimutaux employés en 1^{er} ordre étaient excellents ; les théodolites de Wild T3 et T2 commençaient à se substituer aux anciens théodolites à microscopes de Chasselon beaucoup plus lents ; mais la signalisation luxueuse et remarquable en 1^{er} ordre était alors indigente en triangulation de détail. Le chef de brigade recherchait alors les points au sol à vues dégagées et faisait "suer la station" en intersectant tout ce qu'il pouvait ; les pays plats boisés exigeaient des acrobaties, et les schémas du réseau forcément complexes, n'étaient guère esthétiques.

Les calculs du réseau de 1^{er} ordre étaient l'apanage de quatre calculateurs professionnels civils, experts en

calcul numérique dont ils se transmettaient la tradition de bouche à oreille.

Le matériel de calcul était, outre la table de logarithme à 8 décimales, la calculatrice dérivée directement de l'arithmomètre de Pascal, soit à main (type Vaucauson) pour les opérateurs ou électriques (type Hamman) réservées aux calculateurs professionnels.

Les calculs du réseau de détail étaient effectués par l'opérateur à son retour de brigade ou par un collègue auquel il confiait son dossier. Il existait donc des listes de coordonnées des feuilles observées en NT, je me rappelle guère les conditions dans lesquelles elles pouvaient être communiquées au public, mais le problème militaire était plus complexe.

Le règlement de 1936, de l'artillerie prévoyait une très lourde organisation topographique, type guerre de position, basée sur l'emploi des coordonnées rectangulaires d'un réseau généralisé, le Système Nord de Guerre, héritage de la guerre 1914-1918, les carnets de coordonnées correspondants étaient réputés secrets, ils étaient préparés par une Section Spéciale, le "Canevas d'Ensemble" qui en dehors de ses observations propres, se livrait à la mystérieuse alchimie de leur élaboration. Car c'était une alchimie.

La raison essentielle en était d'ordre topo-cartographique. La NT basée, on le sait, sur la méridienne de France et sur les travaux de 1^{er} ordre qui s'y accrochaient s'était logiquement développée dans la partie Est du pays. Le réseau géodésique de détail avait évidemment suivi un plan analogue, mais les levés topographiques correspondants ne couvraient que partiellement la zone triangulée. Pour les besoins des armées une couverture topographique complète et cohérente avec la carte était nécessaire.

Or, le stock des cartes de mobilisation était encore le même 1/50 000, agrandissement du 1/80 000, revêtu du carroyage Nord de Guerre, auquel il fallut donc référer la géodésie NT pour les carnets de coordonnées. Autrement dit, on devait réaliser une synthèse en Nord de Guerre :

- de la triangulation des Ingénieurs Géographes (1820-1860) non compensée à l'époque, et seulement homogénéisée feuille par feuille de la carte au 1/80 000 dont beaucoup de points géodésiques avaient disparu ;
- de la NT, quitte à la déformer pour la faire rentrer en Nord de Guerre !!!
- les deux triangulations étaient calculées sur des ellipsoïdes différents et les éléments fondamentaux différaient, bien entendu.

Le Service du Canevas d'ensemble, réussit à tirer de ce fourre-tout un canevas suffisant à l'artillerie, dont les exigences géodésiques étaient modestes, mais inutilisa-

bles pour les travaux réguliers. Dans les 3/4 du pays où la NT n'existait pas, le géomètre et en particulier le cadastre devait créer son système local.

Dès l'été 1941, l'Institut Géographique National, héritier depuis 1940 du Service Géographique de l'Armée, reprenait la question à son compte, en se fixant comme but lointain d'établir sur le territoire métropolitain un système homogène topo-cartographique basé sur la Nouvelle Triangulation. Il fallait pour cela pousser les travaux géodésiques, en particulier procéder aux observations de triangulation de 1^{er} ordre dans tout le territoire national que le SGA n'avait pu couvrir, savoir tout le territoire à l'ouest.

Mais une chose est d'observer un réseau, une autre est de le calculer et de le publier.

À l'issue de la guerre, à partir des années 1946 le matériel du géomètre s'était considérablement amélioré, l'antique Sanguet qui avait régné pendant des décennies devenait caduc, surclassé par les appareils modernes, la notion de réseau géodésique évoluait : son usage initialement purement cartographique et militaire se généralisait aux travaux urbains, au cadastre, au remembrement. L'arrêté du 2 juin 1948 imposait aux levés entrepris par les services publics, collectivités et établissements, entreprises concédées, d'être exécutés obligatoirement dans le système de la NT, en projection Lambert, dans le système centésimal.

Commencée timidement en 1941 avec mille difficultés, l'observation du réseau de 1^{er} ordre de la NT se développa ; poursuivie avec continuité suivant un bon plan, elle était terminée en 1957. Il est appuyé sur 15 bases et 9 stations astronomiques de Laplace (orientations), on peut évaluer à $\pm 1''.5$ centésimale l'écart type d'une direction observée de 1^{er} ordre. C'est un bon réseau.

Le calcul allait poser de gros problèmes. Dire qu'un réseau calculé est homogène, revient à affirmer que pour toute observation effectuée en un point quelconque du territoire, les discordances entre observations et calculs correspondants doivent être de l'ordre de grandeur de la précision intrinsèque des mesures : il faut concilier l'homogénéité et précision.

Il ne fallait donc pas, par des méthodes de calcul sommaires ou trop précipitées gâter la qualité du réseau observé.

Premier obstacle, le provisoire : il a fallu à peu près 15 ans pour observer le 1^{er} ordre de l'Ouest dans sa totalité, mais l'urgence des travaux topographiques demandés pour l'étude des grands projets ne pouvait se contenter d'attendre l'achèvement des observations et leur calcul définitif.

Il fallait, quitte à ce que les résultats communiqués soient provisoires et sujets à révision ultérieure, fournir des coordonnées, là où il n'y avait rien et par conséquent calculer tout de suite des réseaux provisoires dans les zones d'urgence, tout en poursuivant par ailleurs la préparation du réseau définitif.

Deuxième obstacle, le personnel ancien du bureau de calcul n'aurait pas pu suffire à traiter le volume des calculs demandés, il fallait donc le renforcer, faire son instruction, acheter des calculatrices modernes. Ce fut un gros travail de déblayage et de mise en route.

On ne pouvait songer à compenser le réseau définitif en un seul bloc, ce qui eut été la solution idéale mais irréalisable — l'ordinateur était encore loin — par contre, sachant qu'un bon calculateur était à l'aise pour traiter un système d'une cinquantaine d'inconnues (soit 15 à 20 stations : V_0, X, Y), on étudia des méthodes nouvelles de regroupement et de répartition des tâches entre calculateurs, permettant par réductions successives et regroupement des résultats partiels d'obtenir la solution mathématiquement exacte qu'aurait obtenue un seul cal-

culateur travaillant sur la totalité. On multipliait ainsi par quatre ou cinq la vitesse d'exécution sans nuire à la précision.

Enfin, autre obstacle purement technique, on s'aperçut que sous leur forme de 1920-1939 les projections Lambert I, II, III, n'étaient pas rigoureusement conformes, elles avaient été calculées par des formules approchées insuffisantes, c'est d'ailleurs pour cette raison que le SGA avait calculé le réseau Est en coordonnées géographiques...! On eut de la peine, à l'IGN même, à convaincre certains de la nécessité absolue de substituer aux tables initiales, des tables de projections rigoureuses, quant aux premiers calculs, ils avaient été exécutés sur une projection Lambert, rigoureusement conforme, couvrant tout le territoire et réservée à l'usage interne, précisément pour éviter les calculs sur l'ellipsoïde et les projections insuffisamment définies.

Finalement en 1959, 1960 la compensation du 1^{er} ordre de la NT était pratiquement achevée, y compris la reprise totale de la partie Est observée par le SGA entre les deux guerres, dont il fallut entièrement reprendre le calcul.

Quant à la triangulation de détail, elle était calculée (avant l'ordinateur) par les opérateurs, rassemblés en ateliers de calcul au retour des brigades. Se borner à cette mention serait considéré bien cavalièrement les efforts et les travaux de ceux-ci. Si l'on veut bien se rappeler que le nombre des points de détail — 2^e, 3^e, 4^e ordre est égal à 60 fois environ le nombre de ceux de 1^{er} ordre, on rétablira à sa vraie valeur la contribution de chacun.

L'édition et la mise à disposition du public des coordonnées géodésiques posait également un gros problème. C'est seulement en 1954, qu'après des essais peu satisfaisants on en arriva au modèle de fiches signalétiques, base des répertoires de coordonnées que vous connaissez et qu'on disposa du matériel de reproduction nécessaire ; les coordonnées NT de certaines feuilles connurent jusqu'à 4 ou 5 calculs successifs avant la définitive. Les géomètres n'appréciaient guère ces variations des coordonnées, mais ils auraient encore moins apprécié de ne pas disposer de données à jour, on passa donc sur leurs protestations. Tels se posent quelques-uns des problèmes de l'observation, du calcul, de la publication d'un canevas géodésique à l'échelon national.

À quoi bon tant d'efforts dépensés dans un domaine dont l'importance échappe souvent à nos concitoyens et au législateur ?

Je me borne à citer deux exemples personnels.

Jeune capitaine affecté depuis juin 1940 au groupe de canevas de tir de la X^e armée vers Amiens, je reçus l'ordre de l'artillerie, de préparer dans la journée et faire reporter sur la carte au 1/50 000 (agrandissement du 1/80 000) un carroyage Nord de Guerre pour lequel nous n'avions aucun élément de préparation. Je m'en tirai par un bricolage incontrôlable assurant simplement la continuité avec une ou deux des feuilles contiguës, ça pouvait toujours servir de système de coordonnées locales. D'ailleurs cela ne servit à rien, l'attaque allemande sur la Somme commença un ou deux jours après ; les Panzerdivisionens et les Stukas ignorèrent superbement ce beau travail, et au tir sur coordonnées succéda le tir à vue directe.

Fin 1940, en zone libre-région de Saint-Gaudens — un camarade et moi observions et calculions à partir de rien, une triangulation locale destinée aux pétroles de Bousens ; on nous avait prié autant que possible de nous rattacher à la NT (qui n'existait pas).

Nos seuls éléments de départ, fournis par Paris, provenaient d'un enchaînement de l'ancienne triangulation des IG rattaché par le calcul à la méridienne à 150 km. Travail intéressant par lui-même, car il fallut tout créer

de toute pièce, y compris la mesure d'une base (avec 4 doubles décimètres). Le résultat ne fut pas trop incorrect — par chance — mais ces deux expériences jointes à quelques autres me firent jurer de contribuer de toutes mes forces à l'établissement du réseau national homogène qui venait d'être décidé et auquel tout l'IGN aspirait.

J'ai eu effectivement la joie et la chance de participer pendant 25 à 30 ans, à cette œuvre collective, entreprise, j'en puis témoigner, avec foi, enthousiasme et continuité par des centaines d'observateurs, de calculateurs, de préparateurs, qui y ont consacré, ce n'est pas exagéré de le dire, plusieurs millions d'heures de travail pendant 40 ans !

On démontre le mouvement en marchant : le succès de l'opération est prouvé par l'emploi encore général du système par les usagers.

Mais des lézardes commencent à apparaître dans l'édifice ; les télémètres actuels du géomètre sont capables de déceler les imprécisions relatives d'échelle, les ordinateurs qui nous ont bien manqué pour le réseau du 1^{er} ordre calculent en quelques heures, et plus rigoureusement, ce qui exigea des mois et des mois de friden. Les méthodes spatiales en particulier le GPS, ouvrent des perspectives grandioses.

Le développement des bureaux topographiques urbains, les exigences de la précision requise posent des problèmes difficiles à la vieille charpente ; le recours aux banques de données implique l'existence d'une référence unique, celle que la NT s'est précieusement efforcée de construire. Dans l'état actuel, est-elle suffisante ? Au point de vue scientifique, tient-elle encore le coup ? Certaines études en ont mis en évidence les points faibles. La plupart étaient inévitables vu les possibilités techniques de l'époque de son élaboration ; mais la vie va plus vite. Que penser d'une extension européenne, mondiale ? La NT subira le sort de ses devancières, celle de Cassini, celle des Ingénieurs Géographes. C'est le destin inéluctable, mais je pense qu'elle méritera elle aussi une inscription au palmarès.



C. BOUCHER

II — Etat actuel de la NTF

Les travaux d'établissement de la Nouvelle Triangulation de la France (NTF), dont l'Ingénieur Général Géographe honoraire J.-J. Levallois vient de donner une excel-

lente description, sont sur le point de se terminer. Ceci, conjointement avec les besoins nouveaux ou accrus des utilisateurs du réseau national, l'apparition de nouvelles techniques (géodésie spatiale, bases de données...) et la proximité de nouveaux défis à l'échelle européenne, rendent opportun de faire le point sur l'état présent et l'évolution souhaitable du canevas géodésique national.

A cet effet, nous allons passer en revue les caractéristiques principales de la NTF, en identifiant notamment les points restrictifs qui seraient potentiellement améliorables.

2.1 — Système de référence et de coordonnées

Le système est :

- national, c'est-à-dire utilisable en France Métropolitaine uniquement ;
- bidimensionnel, c'est-à-dire que l'altitude géométrique, nécessaire en géodésie spatiale, n'est pas diffusée. Néanmoins l'altitude dans le système d'altitude national en vigueur (actuellement IGN 69) est généralement fournie ;
- en 4 zones Lambert. Néanmoins, certains utilisateurs qui souhaitent un système de coordonnées unique ont adopté la représentation Lambert 2 étendu.

2.2 — Précision, exactitude

L'exactitude globale des positions NTF est de 2 m (1 sigma). Ceci a été constaté par des mesures de géodésie spatiale (points Doppler). L'exactitude régionale et locale est spécifiée à 10^{-5} D (spécifications de 1972). Elle reflète principalement la qualité de la compensation du réseau de 1^{er} ordre auquel le réseau de détail est contraint.

Des recompensations rigoureuses de ce réseau de 1^{er} ordre, menées dès les années 70, ont montré clairement qu'une précision de quelques 10^{-6} était accessible à partir de ces données.

Le réseau de 5^e ordre a en revanche une qualité très hétérogène, dépendant de l'origine des points (naturels, déclassés, abaqués, de provenance externe,...).

Enfin, les variations temporelles ont un effet parfois non négligeable, surtout sur un siècle de mesures.

Plus que les déformations de la croûte terrestre, ce sont les déplacements locaux non identifiés qui entraînent des incertitudes (borne "légèrement" déplacée, clocher détruit puis reconstruit "à la même place"...).

2.3 — Matérialisation

L'accès au réseau est directement fonction des informations diffusées (cf 2.4) et de la matérialisation physique sur le terrain : pérennité des repères et aisance d'accès au point.

L'IGN n'a consacré jusqu'à présent que très peu d'efforts à la maintenance physique du réseau, et donc à l'actualité de sa matérialisation du moment où l'utilisateur en a besoin.

Quant au choix des sites, il était principalement guidé par la méthode de triangulation (tout point stationné est matérialisé).

En conséquence, une partie non négligeable des points réalisés seront, du point de vue de l'utilisateur du réseau, d'un intérêt faible ou nul.

2.4 — Diffusion

L'information signalétique (description et coordonnées des points) a été initialement fournie sous forme de répertoires, ultérieurement remplacés par des microfiches. Elle n'est optimale ni dans son contenu (quelques informations utiles manquent), ni dans son actualité, mais répond néanmoins à la plupart des besoins.

III — Objectifs d'un nouveau réseau géodésique

La définition d'un nouveau réseau géodésique français a donc été récemment faite afin d'amener ce produit à un niveau plus optimal pour :

- répondre aux besoins actuels de l'ensemble des utilisateurs ;
- exploiter au mieux les possibilités technologiques désormais disponibles (géodésie spatiale, bases de données...) ;
- être à l'heure européenne le moment venu ;
- valoriser les travaux faits sur deniers publics.

Cette analyse a été faite dans le cadre d'un groupe de travail au CNIG avec la participation active de l'IGN.

Ce groupe a recommandé la réalisation d'un nouveau réseau, dit Réseau Géodésique Français (RGF), dont les principales caractéristiques sont données ci-dessous.

L'IGN a d'ores et déjà inscrit dans son programme, et notamment dans un Schéma Directeur de la Géodésie récemment élaboré, un certain nombre d'actions qui initient le développement du RGF.

IV — Description du réseau géodésique français (RGF)

Le nouveau RGF a été défini comme un réseau tridimensionnel géocentrique.

Le système géodésique sera identique ou très proche du système officiel international ITRF réalisé par l'IERS. Les coordonnées seront exprimées en géographiques sur l'ellipsoïde GRS 80.

Une représentation plane cartographique unique pourrait être définie ultérieurement, de préférence dans un cadre européen.

Le groupe du CNIG devra se prononcer à cet effet.

Ce système couvrira la France métropolitaine (Corse incluse). Par son caractère mondial, il peut s'étendre aisément (Europe, DOM-TOM...).

Le RGF est structuré en 3 parties :

- le Réseau de Référence Français (RRF), constitué d'une vingtaine de stations déterminées régulièrement par les techniques de géodésie spatiale (SLR, VLBI, GPS cf exposé de Pascal Willis) et servant de densification en France de l'ITRF. Une exactitude de 1 cm est escomptée ;
- le Réseau de Base Français (RBF), reprenant les réseaux de 1^{er} et 2^e ordre de la NTF, avec quelques changements éventuels (sites plus accessibles par GPS), soit 6 000 points environ, avec une exactitude de 10^{-6} D ;
- le Réseau de Détail, incluant le réseau NTF actuel, et d'autres contributions (cadastre, OGE...) avec une exactitude de quelques 10^{-6} D.

Des documents normatifs devront donner des spécifications précises sur le produit et son utilisation, remplaçant les errements présents.

La détermination initiale du RGF sera faite selon les étapes suivantes :

- établissement initial du RRF (en cours par l'IGN) ;
- recompensation des mesures terrestres de la NTF correspondant au RBF, appuyé sur le RRF (prévue en 1993 par l'IGN) ;
- adaptation du détail.

La diffusion du RGF sera réalisée à partir de 1993 par un Serveur dont la définition précise reste à étudier par le groupe du CNIG.

L'information de base d'un point comportera :

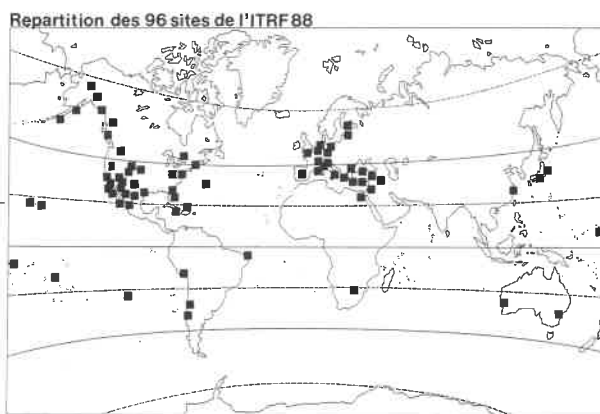
- les données signalétiques ;
- les coordonnées NTF (X, Y Lambert et H en IGN 69) ;
- coordonnées géographiques RGF ;
- coordonnées planes RGF (à définir).



P. WILLIS

V — L'apport des techniques spatiales pour la réalisation du RRF

De nombreuses techniques de géodésie spatiale, parmi les précises, sont mises en jeu pour réaliser le Repère de Référence Français (RRF).



Le système de référence ITRF

On peut considérer que le RRF sera une densification au niveau Français du système mondial de référence ITRF (IERS Terrestrial Reference Frame). Ce système de référence terrestre mondial tridimensionnel est réalisé à l'IGN dans le cadre de l'IERS (International Earth Rotation Service). Les coordonnées de 96 sites dans le monde sont obtenues chaque année en cumulant les résultats de plusieurs centres d'analyses de radio-interférométrie à très longue base (Very Long Baseline Interferometry ou VLBI), de télémétrie laser sur la Lune (Lunar Laser Ranging ou LLR) et de télémétrie sur satellite artificiel (Satellite Laser Ranging ou SLR). Au total, pour 1988, 50 sites ont été déterminés par VLBI, 62 par SLR (dont 19 en colocation avec un site VLBI et 3 par LLR). L'exactitude des coordonnées ITRF, obtenues par combinaisons de ces diffé-

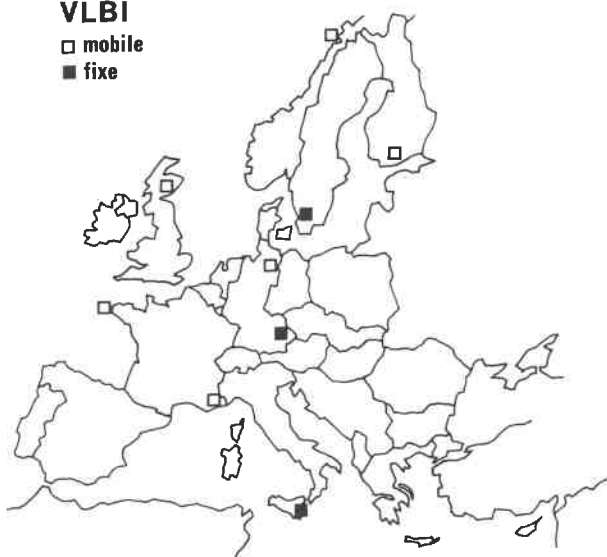
rents résultats, est estimée à quelques centimètres partout dans le monde. Malheureusement seuls 96 sites principalement en Amérique du Nord et en Europe sont définis dans l'ITRF. Il convient donc de densifier ce système de référence afin de le rendre plus accessible aux utilisateurs.

La commission EUREF

Conscients de ces problèmes de réalisation d'un meilleur système de référence Européen, les géodésiens avaient déjà obtenu une nouvelle compensation des mesures de 1^{er} et 2^e ordre de la plupart des réseaux Européens (RETRIG). En août 1987, une nouvelle sous-commission de l'AIG, nommée EUREF (European Reference Frame), a été créée afin de constituer un système de référence Européen de précision. Pour cela EUREF utilisera les données et études déjà réalisées dans le cadre de RETRIG et coordonnera toute campagne de géodésie spatiale susceptible d'améliorer les résultats. A ce jour, deux campagnes importantes ont déjà été entreprises : une campagne d'observations de VLBI mobile et une campagne d'observations GPS.

VLBI

- mobile
- fixe

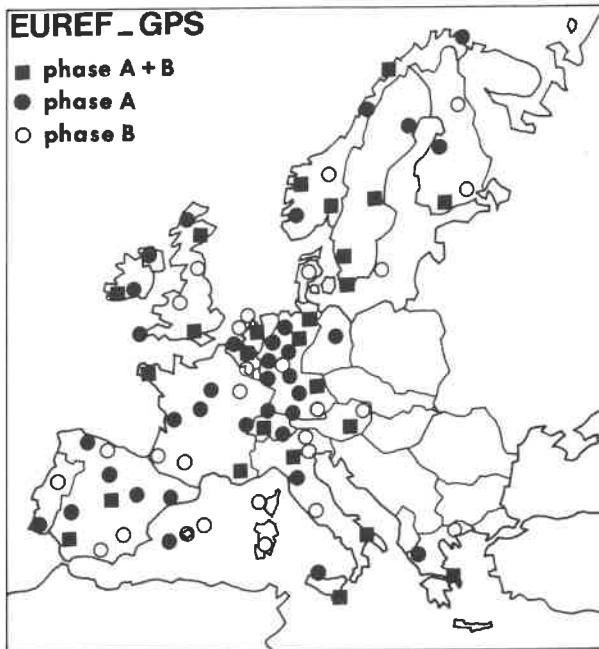


La campagne d'observations VLBI mobile

De juin à septembre 1989, plusieurs pays Européens ont loué au National Geodetic Survey (NGS) une antenne mobile VLBI (MV3). Les observations étaient réalisées, pour chaque site, pendant 5 jours. L'antenne observait les signaux des quasars 24 heures sur 24. Au total, compte tenu des temps de déplacement de cet équipement, 6 sites seulement ont été déterminés en Europe (dont 2 sites en France), à Brest et à Grasse. Actuellement, l'ensemble de ces données est en cours de traitement dans plusieurs centres de calculs dont l'IGN. L'exactitude des résultats de localisation devrait être de l'ordre de 1 à 2 centimètres en planimétrie et environ 3 centimètres en vertical. Les coûts de cette campagne ont été entièrement supportés par les différents Instituts Européens concernés. Le coût total estimé de cette campagne est d'environ 3,5 MF (sans tenir compte des salaires des personnels).

EUREF - GPS

- phase A + B
- phase A
- phase B

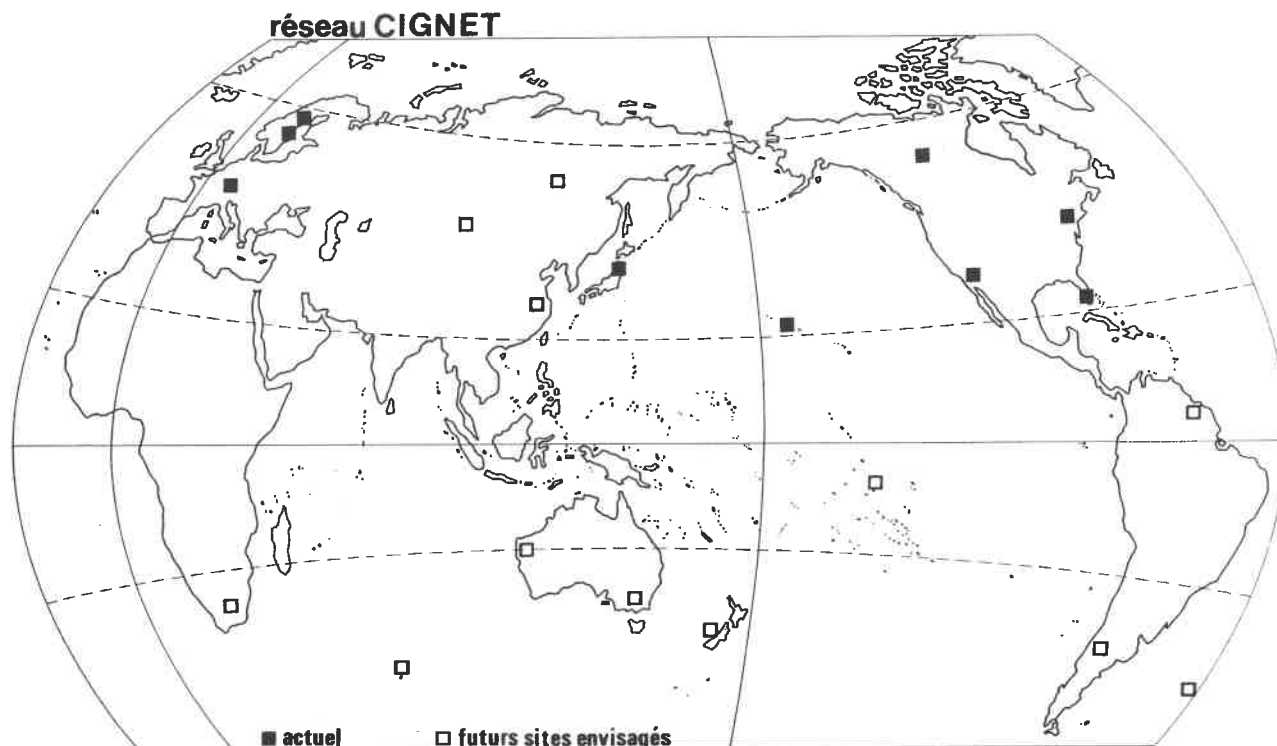


La campagne européenne d'observations GPS

Dans le cadre d'EUREF une première campagne d'observations GPS a été réalisée durant deux semaines du 16 au 28 mai 1986. Chaque récepteur observait les signaux des satellites GPS six jours consécutifs pendant environ 5 heures par jour. Au total, 69 récepteurs GPS bifréquence ont été utilisés pour cette campagne (TI 4100, Trimble 4000 SLD (SXD), Minimac, WM 102). Grâce à cette campagne, 93 sites seront déterminés en Europe (dont 8 en France) avec une exactitude meilleure que 5 centimètres partout en Europe. Pour obtenir ces excellents résultats, il est essentiel de calculer les mesures GPS avec un logiciel adapté permettant de calculer une orbite précise (interpolée) des satellites GPS au-dessus de l'Europe. Actuellement, toutes les données sont prétraitées (110 Mb de mesures GPS) et sont en cours de traitement dans différents centres Européens. Les premiers résultats préliminaires de cette campagne sont attendus pour le printemps 1990.

VI — Réalisation et maintenance du RRF par l'utilisation du GPS de précision

Afin que les utilisateurs puissent accéder facilement au réseau national, il est essentiel que le réseau soit suffisamment dense. C'est le but du Réseau de Base Français (RBF). Ce réseau, comprenant environ 6 000 points en France, sera déterminé par l'IGN à l'aide de récepteurs GPS bifréquence. Les distances interpoints étant importantes il devient nécessaire d'utiliser des orbites précises à la place des orbites radiodiffusées dans le message des satellites GPS. Cette orbite précise proviendra d'un effort de coopération international.



Le réseau CIGNET

Le réseau CIGNET (Cooperative International GPS Network) est un réseau civil de poursuite des satellites. Il comporte actuellement 9 stations (récepteurs bifréquences fixes) dont 7 stations en Amérique du Nord ou en Europe. A terme (91-92), il comportera environ 20 stations de poursuite GPS réparties sur la surface de la Terre de manière la plus uniforme possible. La France, quant à elle, devrait participer en fournissant deux à trois stations dans l'hémisphère Sud (Tahiti, Afrique du Sud, Kerguelen). Ce projet devrait regrouper le CNES et l'IGN dans le cadre du GRGS (Groupement de Recherche en Géodésie Spatiale).

Le Réseau de Base Français (RBF), ainsi déterminé à l'aide de GPS bifréquence et d'une orbite de bonne précision doit être redéterminé avec une cadence d'environ huit ans.

VII — Utilisation du GPS pour le réseau de détail

A partir de ce réseau de base (RBF), l'IGN déterminera et maintiendra un réseau d'environ 80 000 points à l'aide de récepteurs GPS monofréquence dont les mesures seront traitées avec l'orbite radiodiffusée par les satellites GPS. En effet, la distance entre les points considérés est suffisamment réduite pour autoriser l'utilisation de tels récepteurs sans perte de précision (au niveau centimétrique). A partir d'un tel réseau géodésique (d'une exactitude de 10^{-6} en relatif entre points) l'utilisation du GPS ne doit plus poser aucun problème de cohérence. On voit donc que le but est de constituer un réseau géodésique national possédant une qualité suffisante pour que les différents utilisateurs puissent utiliser les techniques les plus avancées sans aucun problème et de densité équivalente à l'ancien réseau.

VIII — Conclusions

Nous espérons avoir montré la qualité et la continuité des efforts des géodésiens français pour établir et maintenir un réseau géodésique national.

Au réseau NTF doit donc succéder le RGF, qui sera :

- *plus exact* (1 cm pour les points de base, 10^{-6} D pour le détail ;

- *plus à jour*, grâce à une politique de maintenance ;
- *plus accessible*, par un choix nouveau du détail et par l'incorporation au réseau IGN initial d'autres données ;
- *mieux diffusé*, par un ou des centres serveurs ;
- enfin, disponible *en plus* de la NTF, afin d'éviter des confusions et des changements obligatoires à court terme.

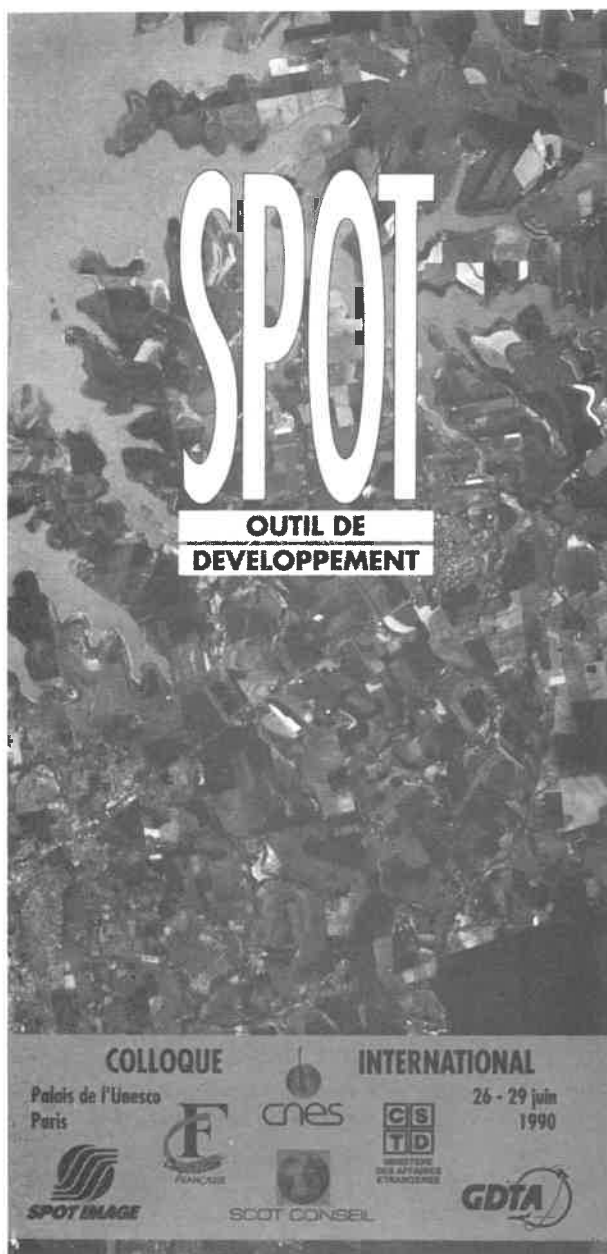
Pour mener à bien ce projet, diverses questions restent à l'étude :

- définition précise du réseau de détail (source des données, densité et répartition, maintenance) ;
- définition du centre serveur ;
- choix d'une projection unique nouvelle ;
- établissement des documents réglementaires.

La tâche est importante, mais elle se justifie amplement par les retombées socio-économiques dans un cadre national, et aussi international.

Références

- C. Boucher, P. Willis (1988), le système GPS et son impact sur les travaux topographiques, XYZ, revue de l'Association Française de Topographie, n° 36, pp. 5-13.
- J.-J. Levallois, C. Boucher, J. Bourgoïn, A. Complet-Tirman, A. Robertou (1988), Mesurer la Terre : 300 ans de Géodésie Française, de la toise du Châtelet au satellite, Association Française de Topographie, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- P. Willis (1989), Méthodes de traitement de la phase GPS pour la localisation relative (statique et cinématique), Applications à la géodésie, Thèse de Doctorat de l'Observatoire de Paris.
- H. Seeger, W. Augath, R. Bordley, C. Boucher, B. Engen, W. Gurtner, W. Schluter, R. Sigl, Status-Report on the EUREF-GPS-Campaign 1989, Workshop "GPS for Geodesy and Geodynamics", Walferdange (Luxembourg), novembre 1989. GPS Bulletin, Commission VIII, International Coordination of Space Techniques for Geodesy and Geodynamics (CSTG).



COLLOQUE INTERNATIONAL

OUTIL DE DEVELOPPEMENT

PALAIS DE L'UNESCO - Salle 1
125, avenue de Suffren / 75007 PARIS

26 - 29 juin 1990

ORGANISE PAR :

- Centre National d'Etudes Spatiales (CNES),
- Ministère des Affaires Étrangères,
- Ministère de la Coopération et du Développement,
- Groupement pour le Développement de la Télédétection Aérospatiale (GDTA).
- Spot Image,
- Scot Conseil,

Au moment où le satellite Spot 2 est lancé et compte tenu des décisions prises par le gouvernement français en 1987 et en 1989 de réaliser les satellites Spot 3 et Spot 4 pour assurer la continuité du système jusqu'à la fin du siècle, il convenait de faire un bilan global de l'utilisation de Spot en tant qu'outil opérationnel au service du développement.

Un grand nombre de projets ont été menés à bien à partir des 1.500.000 scènes acquises sur l'ensemble du globe par Spot 1 au cours de ses quatre premières années de fonctionnement.

Le colloque international réunira au Palais de l'Unesco à Paris du 26 au 29 juin 1990, les décideurs et les responsables de la planification des pays en voie de développement, les représentants des organismes bailleurs de fonds nationaux et internationaux et les experts des bureaux d'étude et sociétés de services.

Il permettra de dresser un premier bilan de l'expérience acquise et d'examiner les perspectives d'utilisation de l'outil Spot à plus long terme pour les projets de développement.

SECRETARIAT DU COLLOQUE

CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES
DIVISION AFFAIRES INTERNATIONALES
C. IVANOV

2, place Maurice Quentin / 75035 PARIS CEDEX 01
Tél. : (33) 1.45.08.78.01 / Fax : (33) 1.45.08.77.73

Société de fabrication et distribution équipements électroniques de positionnement recherche un **jeune technicien topographe** (25/30a) intéressé par la vente.

Connaissance de l'**anglais**, mobilité et forte motivation indispensables. Secteur géographique : **France**.

Adresser lettre manuscrite de candidature + CV + prétentions à :
G. Jacq - 8, rue Souchal - 92110 Clichy qui transmettra.

LYCEE GAUDIER-BRZDEKA
(45 - ST-JEAN-DE-BRAYE)

recrute

ENSEIGNANT CONTRACTUEL
(1 an renouvelable)

A partir 9.90 pour cours (20 h hebd.) matières professionnelles dans classe préparatoire brevet technicien topographe.

Niveau DPLG ou ing. ENSAIS-ETP.
Congés scolaires.

ENVOYER CV + REF. A LA REVUE, XYZ 14142

REPRODUCTION PHOTOGRAPHIQUE

- agrandissements
- réductions
- remises à l'échelle en tous formats
- réductions/assemblages de plans à échelle imposée

- confection
- reproduction
- travaux spéciaux sur mosaïques topographiques

- travaux sur supports polyester
- typons offset tramés ou trait

LART

PHOTO-REPROGRAPHIE PHOTO-CARTOGRAPHIE

LES APPLICATIONS DE LA
REPRODUCTION TECHNIQUE

5, rue de la Véga
75012 PARIS

HAUTE PRECISION

(1) 43.47.15.92

REPertoire DES ANNONCEURS - N^{os} 41-42

WILD LEITZ	2 ^e CV
SIG-GIS	2
LART	4-55
SAGEM	6
CORALIS	10
BORNES ET BALISES	11
SETAM INFORMATIQUE	12
LE PONT	15
APEI	19
MESURES ET SYSTEMES	20
SPOT	46
SLOM	49
JENOPTIK	50-51
GEOTRONICS	52
SOKKISHA FRANCE	54
GEOGRAPH	64
MICROS G.	70
GEOID	72
L.M.P.	73
MESURES ET SYSTEMES	80
FIG	82
C.R.M.	3 ^e CV
TOPO CENTER	4 ^e CV

URGENT

N'oubliez pas de régler votre cotisation 1990

Merci



La vie et l'œuvre d'Etienne Wolff, tel est le sujet du livre, telles en sont les deux subdivisions. Une première partie est consacrée au chemin qui, du lycée d'Elbeuf, mena l'auteur au Collège de France et à l'Académie française. Chemin d'abord tortueux, puis semé de mésaventures et d'épreuves, mais aussi favorisé par de "bons génies", tels ses maîtres de l'Université Edouard Chatton et Paul Ancel, et par de grands amis, parmi lesquels Jean Rostand et Robert Courrier.

Une deuxième partie relate sommairement quelques-unes des découvertes qu'il a réalisées dans le domaine de la biologie expérimentale appliquée aux embryons. Une des spécialités d'Etienne Wolff fut la production expérimentale des monstruosités. Il réussit à obtenir à volonté presque

toutes les malformations que l'on rencontre incidemment chez l'Homme et les Vertébrés. Il en créa même de nouvelles, inconnues dans la nature. Ainsi, pour beaucoup de lecteurs, il devint "l'Homme des monstres", comme Jean Rostand était "l'Homme des grenouilles". "Sans doute", écrit Etienne Wolff, "ai-je fabriqué beaucoup de monstres, ... mais je crois avoir fait plusieurs autres choses aussi importantes depuis lors. N'importe ! Je suis catalogué comme faiseur de monstres, et je le resterai !" C'est d'eux qu'il nous entretient dans ce livre, mais aussi de la manière de transformer des poulets en poulottes, de reconstituer chez l'embryon des organes disparus depuis des temps paléontologiques, et enfin de faire développer en culture *in vitro* des ébauches d'organes soutirées à un jeune embryon. Rien n'est plus frappant que de voir s'organiser dans un verre de montre un œil, digne de Caïn, ou des tibias croisés, évocateurs d'une danse des morts. Bref, une véritable fantasmagorie devenue réalité, non point mystérieuse, mais explicative.

Ouvrages d'Etienne Wolff

Les bases de la tératogenèse expérimentale des Vertébrés Amniotes d'après les résultats de méthodes directes. Arch. Anat. Hist. Emb., t.22, pp. 1-382 (Thèse de Doctorat ès Sciences 1936).

Les Changements de Sexe. Paris, Gallimard, 297 p. (1946).

La Science des Monstres. Paris, Gallimard, 265 p. (1948).

Les Chemins de la Vie. Paris, Hermann Editeur (1963).

Les Pancrates, nos nouveaux maîtres. Paris, Julliard (1975).

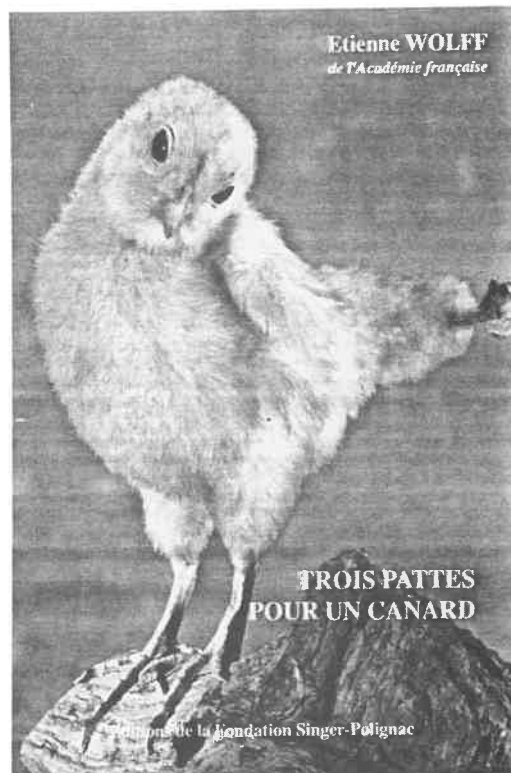
Dialogues avec mes Animaux Familiers. Atelier Marcel Jullian, Paris (1979).

De la Causalité à la Finalité. A propos de la Turbulence. A. Favre. H. et J. Guittou, A. Lichnérowicz, Et.

Wolff. Collection Recherches Interdisciplinaires dirigées par Pierre Delattre. Maloine, Paris (1989).

PRIX : 130 F

Membre de l'Académie des Sciences 1963.
Membre de l'Académie de Médecine 1966.
Membre de l'Académie Française 1971.



ALBERTVILLE 92, c'est parti !

Deux ans avant que ne se déroulent en Savoie les XVIe J.O. d'hiver, MICHELIN propose en librairie

la CARTE OLYMPIQUE France - Rhône Alpes.

Tout le savoir-faire cartographique des Services de Tourisme MICHELIN associé à un thème original et précis.

Le document routier de référence pour se rendre sur les sites et mieux suivre les épreuves.

Disponible à partir de début avril.
Prix public : 20,00 F.

❑ L'IDEE DE DEPART

Le Comité d'Organisation des XVIe Jeux Olympiques d'hiver (C.O.J.O.) ayant déjà sélectionné la Manufacture MICHELIN comme "fournisseur officiel" au titre des pneumatiques, il était logique qu'il s'adresse également à Bibendum pour établir la cartographie routière d'accès aux stations sélectionnées.

N'attend-t-on pas en ces deux semaines de février 1992 sur les routes de Savoie près d'un million de spectateurs venus du monde entier ?

❑ LA REALISATION

Reprenant le cadre général de la carte Michelin traditionnelle n° 244 à l'échelle 1/200 000, qui couvre le massif des Alpes jusqu'au Léman et à la vallée du Rhône, ce document "prend en charge" l'automobiliste, d'où qu'il vienne : par Genève, Lyon, les tunnels du Mont-Blanc ou du Fréjus, par les autoroutes débouchant du Jura, de la Bourgogne, de l'Auvergne, du Midi... Il le mène ensuite à bon port jusqu'aux dix sites

sportifs, où seront disputés les 55 épreuves olympiques et les 8 sports de démonstration, chaque discipline étant mise en évidence sur la carte par son pictogramme officiel rouge et blanc.

Un autre type de symbole, jaune et noir, distingue le village d'accueil de Valmorel ainsi que le Centre International de Radiotélévision de Moutiers et le Centre Principal de Presse de la Léchère, qui rendront compte des compétitions pour deux milliards de téléspectateurs.

❑ LES PERSPECTIVES

Les travaux d'infrastructure routière et sportive, nécessaires au bon déroulement des Jeux de 92, ne sont certes pas encore achevés. Cette première édition de la Carte Olympique Michelin s'adresse donc aujourd'hui à la fois aux personnes et aux services concernés par la préparation et l'organisation de cette rencontre (Comités Olympiques Nationaux, équipes sportives, bureaux d'information, Syndicats d'Initiative, agences de voyages, etc...) comme à tous les touristes que la curiosité peut attirer dès cette année en Savoie.

A l'automne 1991 sera, bien sûr, publiée une nouvelle édition actualisée, prenant en compte le réseau routier et l'équipement sportif définitifs que les visiteurs et spectateurs trouveront sur place en février 92.

Assurément, les prochains J.O. d'hiver constitueront un sommet sportif de premier plan. Ils seront aussi une exceptionnelle occasion de tourisme international dans notre pays.

La Carte Olympique Michelin servira, à son niveau, à leur parfaite réussite.



ALLOCUTION D'OUVERTURE - 2^e SEANCE

par J. DENEGRÉ, Secrétaire Général du Conseil National
de l'Information Géographique

Si l'on devait chercher aujourd'hui un équivalent technique à l'événement que fut la tenue des Etats Généraux en 1789, le thème de la session de ce matin le fournirait aisément : l'avènement des banques de données géographiques, c'est-à-dire la mutation complète, via l'informatique, des cartes et plans en systèmes d'informations numériques, n'est pas sans évoquer l'avènement, en 1789, d'autres innovations et conquêtes sur le plan moral et politique, puis sur le plan technique quelques années plus tard avec, par exemple, la naissance du système métrique, basé sur la mesure du méridien terrestre.

Mais le parallèle... avec nos travaux d'aujourd'hui s'arrête là, du moins sur le papier. Il va de soi que l'intégration de l'informatique dans la topographie ne date pas d'hier, et qu'elle ne présente pas les caractères d'une révolution subite. Il est remarquable que les premières applications du calcul électronique au secteur géographique aient d'abord concerné des opérations typiquement topographiques : la triangulation, tant en géodésie qu'en topométrie. Tous ceux qui ont vécu cette évolution se rappellent quelle lourdeur accompagnait cette automatisation, à grand renfort de cartes perforées, de câblages et d'acrobaties de programmation pour surmonter le handicap de mémoires trop petites. Et pourtant cette informatique des années 60, que pulvériseraient aujourd'hui les performances du premier micro venu, donnait le sentiment d'un extraordinaire et stimulant pas en avant.

C'est progressivement qu'elle a permis d'automatiser les autres sciences et techniques géographiques, dont notamment la photogrammétrie, dont elle n'a cessé d'améliorer les performances en matières d'aérotriangulation et de restitution analytique ; mais aussi la cartographie, grâce au dessin automatique, d'abord en mode vecteur puis en mode rastré ; et enfin la télédétection et le traitement d'images, également appliqué aux techniques d'impression en quadrichromie.

Quant aux systèmes d'informations géographiques (SIG), ils résultent de la prise en compte de l'ensemble des ces automatismes mis en œuvre aux différents niveaux de la chaîne de traitement, mais intégrés selon une logique supérieure, qui est celle de la modélisation complète des données et, plus fondamentalement, de la représentation numérique de l'espace géographique lui-même.

On voit ainsi se bâtir en de nombreux endroits des SIG appropriés aux modèles qu'ils ont vocation à représenter : territoires urbains ou départementaux, domaines d'activités agricoles ou routiers, ou de surveillance de l'environnement, etc. Au sein de ces SIG sont assemblées des données d'origines diverses, parmi lesquelles les données topographiques constituent la couche de base, le référentiel commun à toutes les autres couches. L'on voit ainsi que les SIG confirment ou même accentuent le rôle des topographes producteurs de données, qu'ils soient publics ou privés. C'est pourquoi les "serveurs" des grandes bases de données générales, telles que celles de l'Institut Géographique National ou du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, que nous verrons tout à l'heure, présentent une importance et un intérêt particuliers : elles sont l'aliment quasi obligatoire de tous les futurs SIG, à quelque niveau qu'ils se placent, et à quelque vocation qu'ils obéissent.

Outil commun à toutes ces mutations, l'informatique procède, comme on vient de l'évoquer, selon deux démarches : celles de l'automatisation des levés (mesures, calculs, etc.) et celle de l'intégration des données en systèmes d'informations. La session d'aujourd'hui nous offre l'occasion d'en découvrir des aspects significatifs au sein de réalisations de pointe : la topométrie industrielle au Centre Européen de Recherche Nucléaire, et les bases de données topographiques et cartographiques de l'IGN.

Partons donc à cette découverte.

LE N°1 MONDIAL VOUS PROPOSE UN SYSTEME COMPLET DE TOPOGRAPHIE



■ Un seul interlocuteur pour tous vos besoins topographiques :

plus
plus

La performance des stations totales SET et SETC.

La série des carnets SDR, véritables ordinateurs de terrains.

Les logiciels révolutionnaires SDR CAD sur compatibles PC.

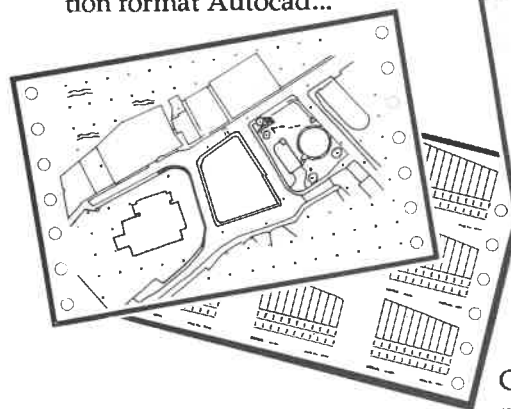
■ Robuste sur le terrain, fiable et convivial.
Le «1er choix» pour tous les géomètres et les professionnels du génie civil...

■ Les solutions à tous vos calculs topographiques :
... Profils en long et en travers... calculs de volumes ...digitalisation... projet... reports...

UN SYSTEME MODULAIRE INTERACTIF
PILOTABLE PAR SOURIS

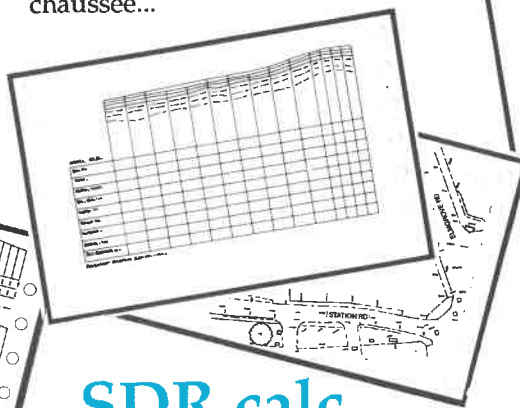
SDR map

Création et traitement de macro-codes, symbolisme, mise en page et report interactif, génération format Autocad...



SDR profils

Profils en long et en travers, interpolation et mise en page automatique d'après l'axe de chaussée...



SDR volumes

Calcul de volumes, comparaison avant et après travaux, modelé de terrain en 3 D...



SDR digit

Digitalisation de haute précision, lissage de courbes, calculs de surfaces...

SDR calc

Construction géométrique de points, lignes, arcs, division de lots, habillage de plans, implantation axes de chaussées...

SDR contour

Interpolation par triangles, génération des courbes de niveau en automate de calcul...

LA CLE D'UN SYSTEME COMPLET

SOKKISHA FRANCE

SOKKISHA FRANCE

12, avenue Gabriel-Péri
78360 MONTESSON
Tél. : **3053 09 73**

SOKKISHA RHONE ALPES

174, avenue Jean-Jaurès
69007 LYON
Tél. : **78 69 14 28**

EVOLUTION DES TECHNIQUES ET METHODES DE LA GEODESIE INDUSTRIELLE

C. LASSEUR, M. MAYOUD, J.-P. QUESNEL

CERN - LABORATOIRE EUROPEEN DE PHYSIQUE DES PARTICULES



I. INTRODUCTION

Dans le domaine de l'industrie et de l'ingénierie, il semble que l'on constate un recours plus pressant aux techniques de métrologie géodésique, qui sont les seules à pouvoir satisfaire aux problèmes de mesure dimensionnelle et/ou de positionnement d'objets de grande ou très grande dimension. Parallèlement, les besoins de la robotique ou du montage mécanique de haute précision poussent à des développements qui conjuguent divers moyens sophistiqués - jusque là réservés à quelques applications rares ou quasi confidentielles. Enfin, certaines réalisations gigantesques - comme le dernier accélérateur du CERN avec ses 27 km de circonférence - posent des problèmes purement géodésiques plutôt inattendus, tels que la prise en compte des déviations de la verticale pour matérialiser un plan parfait de l'espace.

Ces quelques considérations préliminaires laissent entrevoir la variété des problèmes posés par divers secteurs d'activité tels que le génie civil, le génie nucléaire, le génie mécanique, la physique des hautes énergies, l'avionique, la construction navale, l'industrie automobile, la robotique, la plasturgie, etc.[1].

Les mesures demandées par ces secteurs exigent en général une grande précision dans les observations ainsi qu'une grande rigueur dans le calcul des résultats et dans l'expression de leur validité par rapport aux tolérances requises.

Ces mesures non-topographiques requièrent bien souvent une application appropriée des techniques géodésiques, que l'on pourra dénommer "métrologie géodésique", "géodésie industrielle", "micro-géodésie", "topométrie fine" ou "travaux spéciaux". Les

deux premières appellations nous paraissent mieux convenir à ce domaine.

II. PANORAMA DES METHODES

Sans vouloir couvrir ici toute la panoplie des moyens possibles, il est néanmoins utile de rappeler et commenter une classification qui établit les distinctions élémentaires qui caractérisent les méthodes [2].

II.1. Méthodes opto-mécaniques directes

Ces méthodes se rapprochent des mesures conventionnelles du mécanicien et se caractérisent par le fait qu'elles sont directes et immédiates : contrôles de planéité, construction d'alignements droits ou d'angles droits. Les mesures ne comportent généralement pas de surabondance et elles doivent être directement "bonnes" par rapport aux exigences initiales. Elles se font soit directement sur l'objet, soit par l'intermédiaire d'un banc polygonal de mesure ("tooling dock"), qui définit un référentiel local simple et permet la translation des télescopes, des cibles de visée et des miroirs d'autocollimation.

De telles méthodes, assez prisées par les anglo-saxons, utilisent des instruments et appareillages du type Rank Taylor Hobson (GB) ou Brunson Bruning (USA). Par leur mise en oeuvre, on ne peut pas vraiment les qualifier de "légères" ou "mobiles" et elles sont le plus souvent employées à poste fixe.

II.2. Méthodes photogrammétriques

Lorsque l'objet à mesurer constitue par lui-même ou par sa situation un environnement hostile (trop chaud/trop froid, radioactif, inaccessible), lorsque l'on s'impose un minimum d'immobilisation de l'objet pour sa mesure, ou

lorsque sa forme est particulièrement complexe et requière un grand nombre de points à mesurer, les techniques à support photographiques peuvent s'imposer: photogrammétrie, moiré ou - très rarement - hologrammétrie.

Au niveau de l'observation et du traitement des données, les exigences de l'industrie ont déjà conduit à une sophistication poussée des moyens : utilisation de caméras métriques spéciales, à grand format et grande focale (d'où une haute-résolution angulaire dans un champ pas trop étroit), ou inversement, utilisation de caméras non-métriques - avec ou sans réseau en fond de chambre - et avec correction analytique des aberrations, monocomparateurs de haute précision avec dispositifs de pointé automatique (barrette CCD sur barillet ou matrice CCD), logiciels de traitement et d'analyse statistique (mesures comparatives) extrêmement élaborés, etc. L'exemple de référence en la matière nous vient des USA par les travaux de Clive S. Fraser (Geodetic Services Inc., Melbourne, Floride), qui montrent que des précisions de quelques centièmes de millimètre sont garanties sur des gabarits de montage utilisés en avionique et en aérospatiale [3].

II.3. Méthodes géodésiques

Tout comme la photogrammétrie, ces méthodes indirectes et sans contact passent par des observations multiples et redondantes effectuées à partir d'un réseau de stations à l'aide d'instruments géodésiques ou assimilés : théodolites, niveaux, distancemètres, écartomètres (CERN) à fil ou à laser. Les mesures permettent un traitement tridimensionnel direct (compensation 3D) ou séparé (planimétrie + altimétrie) - la première méthode étant souvent la plus recommandable. La plupart des instruments sont désormais électroniques et numériques, pouvant être aussi reliés directement à un ordinateur de saisie et de traitement.

Il faut observer que les premiers systèmes proposés à l'industrie par les constructeurs étaient assez primaires : observation et traitement à partir de deux théodolites seulement. Ils ont fort heureusement évolué vers une complexité louable puisque l'apport des redondances d'une troisième station (ou plus) et le traitement en bloc des observations du canevas de base sont venus enrichir la qualité du produit - à laquelle sont fondamentalement attachés les géodésiens intègres. Néanmoins, par les nouvelles facilités offertes, on constate que

s'est ainsi effectué un transfert de nos techniques vers les services de Métrologie et Contrôle Qualité de l'Industrie. Même si leur usage en est fait par des techniciens n'ayant pas la même formation et ne connaissant pas toutes les finesses de l'art, l'évolution des instruments et des moyens de traitement fait qu'il y a ici une ouverture et un progrès. Mais il n'est pas évident de passer de la mesure unidimensionnelle à la géodésie tridimensionnelle. Même si les moyens proposés sont encore perfectibles, l'analyse et l'interprétation des résultats restent encore une affaire de spécialistes.

A l'instar de ce qui s'est développé dans des organismes très spécialisés, il est donc souhaitable que l'évolution conduise à des méthodes géodésiques encore plus complètes, permettant une grande diversité d'observations, de calculs et d'analyse. Vu les performances et la capacité des ordinateurs portables, la différence entre les moyens simplifiés dits légers ou mobiles et ceux dits lourds devrait très vite disparaître. Cela ne tient qu'aux possibilités des logiciels de traitement - qui conditionnent la méthodologie - et les programmes "lourds" peuvent aujourd'hui être portés par des ordinateurs fort légers [4].

III. EVOLUTIONS ET PERSPECTIVES

Après cette classification préliminaire, nous passerons en revue - non exhaustive - quelques étapes récentes de l'évolution de l'instrumentation et des méthodes, en soulignant quelques changements significatifs et quelques développements pertinents qui affectent déjà notre pratique coutumière ou qui changeront bientôt notre approche technique des problèmes à traiter.

III.1. Photogrammétrie terrestre

Outre l'automatisation de la mesure (pointé - déplacements) sur quelques monocomparateurs [5, 6], on a vu récemment s'élaborer l'usage direct des caméras "numériques" à matrice CCD dans des processus de mesure en temps réel [7] similaires à ce qui se fait avec les systèmes micro-géodésiques. Ainsi disparaît le support photographique et apparaît ce qui pourrait être appelé la "vidéogrammétrie", dont les prémisses furent le système de suivi du bras de la navette spatiale (NRB - Canada / NASA) par des caméras TV à tube cathodique, permettant le contrôle positionnel des manutentions.

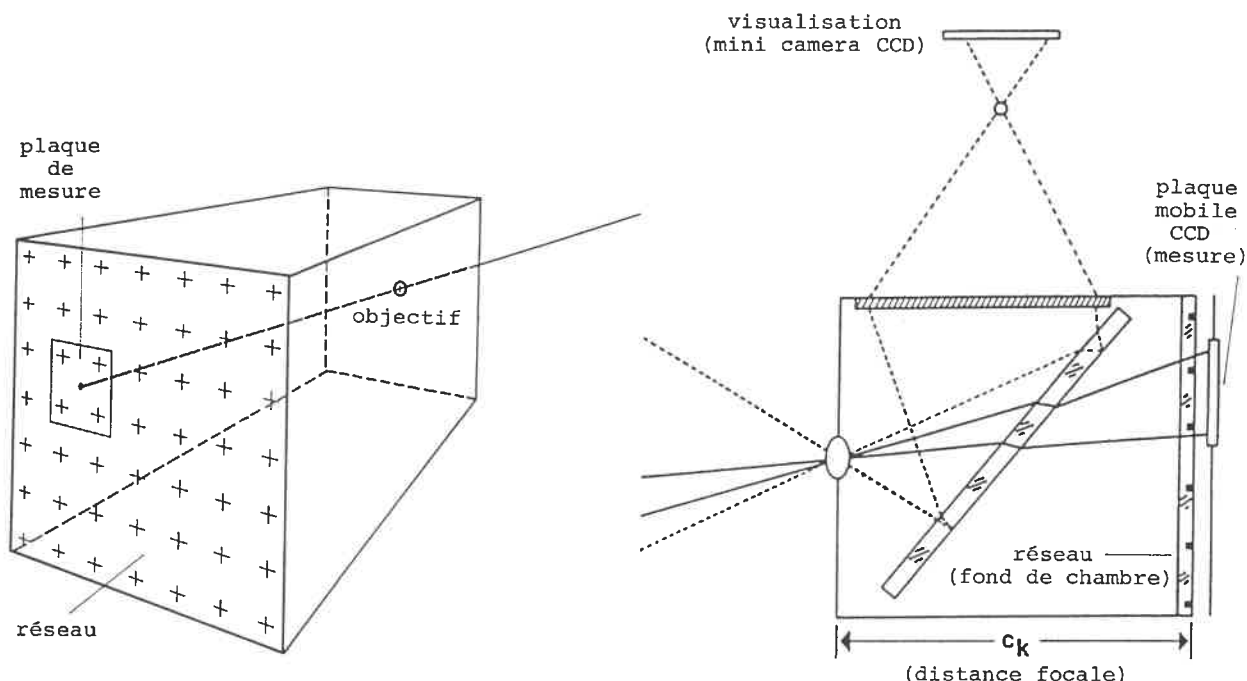


Figure 1 : Principe d'une caméra CCD sur réseau (schémas extraits de [7])

La firme ZEISS a mis en oeuvre une caméra CCD dans son système à balayage "Inducer". Dans la recherche d'un optimum, on observe que l'usage d'un réseau en fond de chambre résout le problème de correction des aberrations (Réseau - Scanning camera ROLLEIMETRIC RSC1) de manière identique à ce qui est fait dans le monocomparateur automatique ROLLEIMETRIC RS1, tout en augmentant le champ d'observation.

Outre quelques autres applications plus simples dans le domaine de l'anthropométrie orthopédique (relevé de profils), il faut mentionner les développements effectués pour la corrélation des stéréo-couples CCD par l'utilisation d'un semis de points lumineux projetés successivement par une grille de diodes-laser [8].

Par rapport à d'autres techniques de projection globale d'un semis de points à l'aide d'un laser diffracté, celle-ci a le mérite d'alléger les algorithmes d'identification et de calcul.

III.2. Théodolites électroniques motorisés

Les demandes émanant du génie minier - suivi d'exploitation, suivi d'engins ou contrôle de stabilité des terrains - puis celles plus exigeantes de l'industrie (Boeing, GMC, Mc Donnell Douglas) ont amené à des constructeurs comme WILD, KERN [5] et AGA à concevoir et produire des théodolites motorisés entièrement automatiques.

Les caractéristiques des instruments les plus performants sont les suivantes:

- les images des points visés sont digitalisées et analysées par caméra CCD intégrée dans l'optique (Fig. 2), la précision de reconnaissance étant de 0.1 pixel (chaque pixel représente un carré de $23 \mu\text{m} \times 23 \mu\text{m}$);
- les mouvements sont entièrement automatisés, avec une précision de

positionnement de 0.1 mgon et une vitesse de motorisation de 60 gon par seconde;

- des procédures de saisie automatique ou semi-automatique permettent, soit la mesure de points par balayage continu, soit l'exploration d'une fenêtre prédéterminée, soit le pointé de positions fixées à l'avance;
- la rapidité des systèmes permet le traitement complet avec les calculs et diffusions de près de 600 points par heure.
- en outre, afin d'assurer la seconde centésimale, WILD a construit le théodolite étalon TPM1 qui introduit directement les courbes de corrections dans le processeur de l'instrument étalonné.

De telles performances viennent concurrencer sévèrement quelques avantages de la photogrammétrie : l'observation devient extrêmement rapide, sans limitation du champ de vision, et le traitement est plus simple et plus immédiat.

En outre, avec l'automation du pointé - qui reste la faiblesse (humaine) des systèmes de triangulation spatiale - constatons que l'on arrive à exclure entièrement l'homme en tant qu'observateur de la mesure.

Enfin, si l'on ajoute à cela l'étalonnage fourni par le WILD TPM1, on peut dire que le "théodolite à seconde" existe par lui-même, sans mode opératoire complexe, sans le doigté délicat et l'oeil exercé d'un opérateur hautement entraîné.

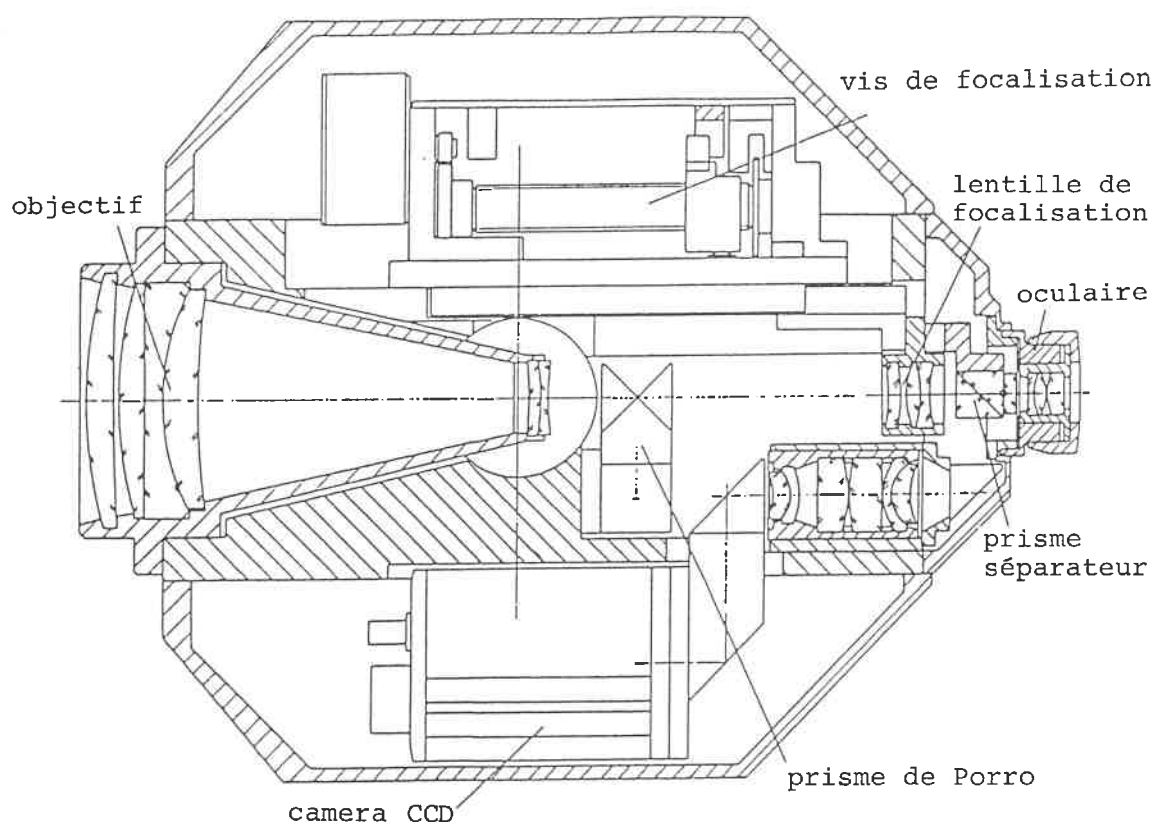


Figure 2 : Schéma de conception du théodolite KERN E2-SE (extrait de [9])

III.3. Systèmes dynamiques rapides

Les besoins de la robotique amènent les constructeurs à concevoir des systèmes sophistiqués qui, par des asservissements appropriés, permettent un suivi dynamique rapide - en sus des autres utilisations industrielles plus ordinaires.

Le plus simple de ces systèmes est une station totale développée par KERN et API aux USA - le "Laser tracking System LTS 310" -, qui associe un laser interférométrique à un montage de théodolite électronique spécial portant le miroir de déflexion. Avec une précision angulaire de 2 cc et une résolution en distance de 1 micron, un tel système fournit des coordonnées polaires de haute précision jusqu'à environ 25 m. En outre, ce véritable "turbo-tachéomètre" peut suivre sa cible, constituée d'un mini coin de cube creux de grande qualité - à des vitesses pouvant atteindre (latéralement) 1 m/s.

Un autre système américain - de la firme LK Tool - consiste en l'usage de trois interféromètres asservis à suivre un minuscule rétro réflecteur sphérique, sans mesures angulaires. On se trouve donc en présence d'un système de trilatération permettant de calculer avec une grande précision les coordonnées spatiales du centre de cette sphère.

De nombreux autres systèmes, basés cette fois sur la triangulation, ont été développés ça et là. Avec, en sus l'automatisme intégral de pointé et de suivi à l'aide d'un laser asservi, on retrouve la même situation que les systèmes basés sur l'usage de deux théodolites.

III.4. Distancemètres électro-optiques

Les instruments de mesure absolue et directe d'une distance (et non différentiels comme les interféromètres) ont fait des progrès notables quant à leur précision et laissent même espérer encore davantage.

Une innovation en la matière s'est appuyée sur le principe qu'on mesure mieux, aujourd'hui, une fréquence qu'une différence de phase. Associé à un cyclage rapide de la modulation sur deux longueurs d'onde, cela a produit le Terramètre (USA), puis le Georan (F/GB), utilisables en géophysique et en géodésie avec des précisions de 10^{-7} .

Deux instruments mono-fréquence plus abordables, appliquant ce principe, sont apparus

sur le marché : le Geomensor (COMRAD) et le Mekomètre ME 5000 (KERN). Nous avons largement testé et utilisé ce dernier, pour constater une précision de l'ordre de 0.06 mm sur la base d'étalonnage interférométrique (de 12 à 50 m) et une précision conforme aux prétentions du constructeur (0.2 mm + 0.2 mm) sur de nombreux réseaux de micro-géodésie, sous abri et dans une gamme de mesures allant de 10 m à 105 m, et avec toutes les précautions d'usage en la matière : centrages forcés, répétitions, etc..

Reprenant complètement le programme d'opération de l'instrument écrit par le constructeur, nous avons pu explorer les possibilités de mesures plus courtes (de 1 m à 10 m), définir les plages mesurables et optimiser le processus [10]. En outre, nous avons constaté une amélioration significative des performances par l'usage de prismes réflecteurs de qualité interférométrique, avec un montage et une calibration appropriés.

On constate qu'un instrument de ce type permet de remplacer allègrement l'usage du Distinvar (CERN) dans un certain nombre d'applications - en permettant notamment des mesures en pente - sans nous en dispenser totalement pour les distances courtes ou pour plus de précision.

Le chaînon manquant, pour la métrologie géodésique, reste encore le distancemètre absolu permettant de mesurer des longueurs très courtes avec une résolution inférieure ou égale à 0.01 mm. Sans trop d'indiscrétion, on peut révéler que KERN a entrepris des développements allant dans ce sens et il est quasi certain qu'un super-Mekomètre pourrait voir le jour si la volonté de l'entreprise (et le marché) s'y prêtent. Un prototype compact arrive à une résolution proche de 1 μ m et à des précisions étonnantes sur quelques mètres.

Dans les instruments plus classiques, à fréquence fixe et mesure de phase, il faut signaler les performances du WILD Di 2000. La bonne résolution et la répétabilité de cet instrument laissent espérer une bonne précision après soustraction des erreurs cycliques. Des étalonnages effectués sur la base interférométrique du CERN ont vite mis en évidence une reproduction systématique des erreurs de phase, qui sont modélisées par une analyse de Fourier. Dans de bonnes conditions et pour des distances courtes (inférieures à 50 m) nous avons constaté un gain notable sur tous les

instruments ainsi étalonnés, la précision passant de 1 mm (valeur annoncée) à environ 0.2 mm [11].

Enfin, dans des précisions un peu moins bonnes, signalons la fiabilité de certains instruments à laser pulsé (type Di 3000 de WILD) qui ont l'avantage de permettre des mesures sans rétroreflecteur, directement sur l'objet.

Pour conclure, rappelons que si les instruments s'améliorent, il n'en va pas toujours de même avec les accessoires qui les accompagnent.

On doit alors en venir à considérer les problèmes de centrage (embases et prismes), de hauteurs réciproques, de basculement, d'excentricité et d'interchangeabilité. Sans ces considérations et calibrations appropriées, la mesure de précision perd sa crédibilité. C'est ce qui a conduit le CERN à revoir parfois les standards de centrage et de montage des prismes (ainsi que leur qualité) pour mieux garantir la vérité de la mesure dans tous ses éléments, lorsque cela est nécessaire.

III.5. Mesures complémentaires

Sous cette appellation générale, nous nous attacherons à rappeler ou suggérer quelques moyens utiles de renforcer la cohésion et l'homogénéité d'un réseau micro-géodésique. Pour autant que les logiciels soient aménagés à cet effet, il ne faut pas se priver d'améliorer une configuration en ajoutant quelques mesures pertinentes qui en économisent d'autres, et qui permettent aussi de contourner quelques difficultés.

Parmi les observations directes et bénéfiques, il faut d'abord citer les mesures de dénivelées, de distances dans l'espace et d'écart à l'alignement dans un plan quelconque, ou les écarts à une verticale.

Les deux premières sont simples, accessibles. Une différence de niveau se mesure sans contact et se traite facilement. Des distances de liaison ne sont pas toujours mesurables sur l'objet mais elles sont parfois données par surcroît, telles que celles résultant d'un marquage de repères à l'aide d'un gabarit ou



Rétroreflecteur CERN et embase magnétique.

Prisme dans sphère sur embase magnétique

issues d'une calibration sous machine à mesurer. Il est alors bien dommage d'ignorer ces précieuses données dans une triangulation d'ensemble et d'altérer ainsi la précision relative des points concernés.

Les mesures d'écart à un alignement sont un peu plus difficiles. Le CERN a développé des écartomètres à fil ou à laser, maintenant automatisés, pour la détermination des réseaux de référence. Un modèle plus simple a été adapté à la mesure dans un plan quelconque de l'espace pour des intervalles courts, afin d'effectuer des liaisons entre des modules. Ce système est basé sur l'utilisation de capteurs capacitifs linéaires (type pied à coulisse ou trusquin électronique). C'est en quelque sorte une simple "règle électronique" qui, selon adaptation, devient un distancemètre ou un

écartomètre ayant une précision in-situ de 0.1 à 0.3 mm (pour une résolution de 0.01 mm).

En ce qui concerne les lasers d'alignement ou de nivellement, tous les problèmes ne sont pas encore résolus lorsque l'on recherche la grande précision et la fiabilité. Les altérations venant du montage et de la dérive du laser ainsi que les variations du barycentre optique le long du faisceau n'ont pas trouvé de solutions vraiment idéales. Sous certaines bonnes conditions, on arrive néanmoins à sortir une précision crédible de l'ordre de 0.1 mm sur quelques dizaines de mètres.

III.6. Clinomètres

Des progrès notables ont été effectués en ce qui concerne les clinomètres électroniques avec diverses conceptions technologiques : potentiomètre liquide (EMACO, SPERRY), masse suspendue (CERN, SENSOREX,

TALYVEL, WYLER), réflexion sur un liquide (KERN) ou pendule horizontal (TELEMAC). Certains sont bi-axes et les meilleurs ont des résolutions atteignant 10^{-8} radian [12]. Néanmoins, leur fiabilité, répétabilité et performances réelles ne peuvent être appréciées qu'après une modélisation correcte des défauts de linéarité, de sensibilité à la température et de dérive électronique.

Ils constituent des moyens utiles d'effectuer des mesures complémentaires directement sur l'objet mais ils sont aussi des outils de télémessure d'auscultation, éventuellement associés à des niveaux hydrostatiques et/ou à des accéléromètres.

Devenus numériques, ils sont assez directement connectables à un ordinateur portable et leur usage mérite d'être considéré attentivement dans certains problèmes d'auscultation et de stabilité.



Règle Sylvac/CERN.

IV. TRAITEMENT DES DONNEES

Il serait hors de propos de détailler ici les principes et algorithmes des différentes méthodes de calcul et de traitement des données. Nous nous limiterons donc à citer - et commenter - quelques-uns des outils logiciels indispensables à la métrologie géodésique.

IV.1. Logiciels de saisie

L'apparition des mini-ordinateurs portables a permis d'améliorer notablement le traitement des données dès leur acquisition. S'il est indispensable de conserver aux logiciels de saisie leur nature première - qui est la transcription informatique du carnet de mesure traditionnel, ils peuvent aussi judicieusement permettre d'imposer des procédures appropriées : pilotage de la saisie, contrôles statistiques et validation des mesures. Un tel processus d'acquisition aura pour vertu de diminuer le nombre de fautes, d'oublis ou de maladresses mais il ne doit pas être inutilement contraignant.

IV.2. Logiciels de traitement des observations et des résultats

La recherche rigoureuse d'une grande précision et de l'expression des erreurs sur les résultats conduit impérativement à compenser les observations par moindres carrés, puis à procéder à une analyse stochastique suffisante des paramètres ajustés - pour en apprécier objectivement la validité par rapport aux critères fixés. Enfin, des facilités de simulation et d'optimisation ne sont pas un luxe inutile dans l'étude des configurations possibles des observations, ou pour tester le comportement stochastique d'un réseau sous l'influence des erreurs aléatoires et/ou systématiques [13].

Que ce soit en métrologie photogrammétrique [14] ou géodésique [15, 16], ces considérations nous ont toujours amenés à élaborer des programmes très complets, permettant un traitement en bloc de l'ensemble des paramètres, avec un maximum de possibilités offertes : grande variété d'observations de diverse nature, faculté de laisser libre ou d'imposer sélectivement certains paramètres, modélisations rigoureuses, analyse statistique des résidus, expression des erreurs absolues ou relatives sur les résultats.

Le programme de photogrammétrie terrestre du CERN permettait, dès 1975, de compenser en bloc les faisceaux perspectifs et -

simultanément - des observations topométriques telles que distances ou dénivelées, en offrant un choix d'options utiles : imposition sélective des paramètres externes et internes de chaque prise de vue, calibration "in situ" des caméras, correction des aberrations, simulations.

Le programme de géodésie tridimensionnelle LGC (Logiciel Général de Compensation) a été conçu et développé pour être aussi exhaustif que possible : compensation dans un référentiel cartésien local calé sur l'ellipsoïde "Geodetic Reference System 1980", évaluation et modélisation du géoïde local et des surfaces équipotentielles, traitement de tous types d'observations utiles (y compris mesures complémentaires citées en III.5), calcul en figure totalement libre (adaptation conforme barycentrique) ou sous diverses contraintes de localisation (points fixes, orientations, "couloirs" de passage), analyse stochastique, simulations d'erreurs aléatoires et/ou systématiques par des perturbations contrôlées (proche de la méthode dite "Monte Carlo").

Le programme de micro-triangulation sur ordinateur portable a aussi été développé dans cet esprit - à défaut de produit existant - et s'est enrichi de quelques-unes de ces facilités.

Enfin, tous ces logiciels sont complétés par des programmes de traitement des résultats et de gestion en bases de données : adaptation conforme dans le plan ou dans l'espace (avec pondération) pour superpositions comparatives ou changements de repère, adaptation de courbes ou de surfaces pour paramétrisation des résultats, lissage local non paramétrique, gestion de plus de 100 000 paramètres géométriques dans un système de base de données sous ORACLE.

Ces divers développements ont été effectués pour nos besoins propres, à des périodes où les logiciels proposés par le marché étaient inexistants ou encore rudimentaires. Il faut désormais se féliciter de l'effort accompli par les constructeurs et par divers promoteurs d'informatique professionnelle, qui offrent aujourd'hui des produits plus satisfaisants : TMS (WILD), ECDS II (KERN), BINGO (ZEISS), GSI, etc. Sans vouloir faire ici une énumération complète et une analyse critique, on peut cependant souhaiter que cet effort se poursuive en ce qui concerne le nombre et la variété des observations, l'expression des erreurs sur les paramètres compensés, les facultés de simulation ou d'optimisation, le traitement des mesures comparatives (sauf pour GSI).

CONCLUSION

Ce panorama des techniques et méthodes de la géodésie industrielle ne pouvait prétendre à une revue détaillée des moyens mis en oeuvre par de nombreux professionnels ou à l'inventaire des réalisations notoires effectuées par les uns ou par les autres. Que ceux qui ne sont pas cités nous pardonnent nos choix limitatifs ou nos ignorances. Le sujet mériterait de plus amples développements et nous sommes heureux d'annoncer ici que l'AFT organisera un colloque consacré à la métrologie géodésique et photogrammétrique qui se tiendra au CERN, probablement en avril 1991.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Second Industrial and engineering Survey Conference, FIG/ISPRS, London, 1987
- [2] C. LASSEUR, M. MAYOUD, J.P. QUESNEL, **Cours de Métrologie**, Cours donné à l'Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes, Paris
- [3] C.S. FRASER, **Periodic Inspection of Industrial Tooling by Photogrammetry**, Proceedings of the 2nd Industrial and engineering Survey Conference, FIG/ISPRS, London, 1987
- [4] C. LASSEUR, **Methods and Results of Three-dimensional Metrology**, Large Scale Metrology Seminar, University College London, 1988
- [5] C.S. FRASER, D.C. BROWN, **Industrial Photogrammetry - New Developments and Recent Applications**, The Photogrammetric Record, 1986
- [6] T. LUHMANN, W. WESTER-EBBINGHAUS, **Rolleimetric R.S., a New Digital Image Processing System**, ISPRS Commission II Symposium, Baltimore, 1986
- [7] T. LUHMANN, W. WESTER-EBBINGHAUS, **Image recording with opto-electronical Metrix Sensor-possibilities for on-line Processing**, Proceedings of the 2nd Industrial and engineering Survey Conference, FIG/ISPRS, London, 1987
- [8] J.-P. MULLER, A. ANTHONY, **Synergistic Ranging Systems for Remote Inspection of Industrial Objects**, Proceedings of the 2nd Industrial and engineering Survey Conference, FIG/ISPRS, London, 1987
- [9] R. GOTTWALD, **KERN E2-SE, a New Instrument for Industrial Surveying**, AVN Nr 4, 1987
- [10] T. COPPELAND-DAVIS, E. MENANT, **The KERN Mekometer Me 5000 and Short Distance Measurements**, CERN, Document LEP/SU 89.2, 1989
- [11] J.-P. QUESNEL, C. STEEL, **Etalonnage des E.D.M**, Note Interne CERN/SU, 1989
- [12] B. SALEM, **Développement d'une nouvelle instrumentation pour les mesures de déformation**, Institut de Physique du Globe, 1986
- [13] M. MAYOUD, **Applied Geodesy for CERN Accelerators**, Part II, Seminar on High Precision Geodetic Measurements, University of Bologna, 1984
- [14] M. MAYOUD, **Photogrammetric Metrology at the European Organization for Nuclear Research (CERN)**, International Society for Photogrammetry, Commission V, Inter-Congress Symposium on Photogrammetry for Industry, Stockholm, 1976
- [15] M. MAYOUD, **Applied Metrology for LEP, Computing and Analysis Methods**, Proceedings of the CERN Accelerator School "Applied Geodesy for particle Accelerators", CERN, Geneva, 1986
- [16] J.C. ILIFFE, **Three-dimensional Adjustments in a Local Reference System**, Proceedings of the CERN Accelerator School "Applied Geodesy for particle Accelerators", CERN, Geneva, 1986



Un Logiciel peut en cacher beaucoup d'autres

Confrontés à l'évolution constante des besoins, les hommes qui ont créé GEOGRAPH se doivent de l'enrichir sans cesse de nouvelles fonctions: grâce à son puissant module d'échange graphique/alphanumérique, de nombreuses applications de gestion du Parcellaire, des Réseaux, des Espaces Verts, des Bâtiments et des Cimetières ont été développées. De plus, GEOGRAPH dispose désormais d'un Modèle Numérique de Terrain triangulé, permettant le calcul des cubatures et le tracé des courbes de niveau.

Distribution, Conseil, Maintenance
et Formation GEOGRAPH:

INFO - TP

Immeuble le Mazière
1, rue des Mazières 91033 EVRY CEDEX
TÉL. (1)-60.79.29.91 FAX. (1) 60.77.95.66

LES BASES DE DONNEES CARTOGRAPHIQUES ET TOPOGRAPHIQUES DE L'IGN

Loïc PRESSENSE, Ingénieur Général Géographe



I — Objectifs généraux des bases de données de l'IGN

A la suite des recommandations de la Commission Nationale de l'Information Géographique et dans le cadre de ses missions nationales, la constitution de bases de données géographiques répond, pour l'IGN, à un double objectif d'ensemble :

- un objectif interne, qui est l'*automatisation* de la production de l'établissement ;
- un objectif externe, qui est la *diffusion* des produits sous des formes nouvelles, adaptées aux besoins des utilisateurs, et où l'informatique est prépondérante.

Un troisième aspect, corollaire des deux autres, se trouve également présent dans cette évolution : il s'agit de l'*archivage* des informations, dont le volume croît rapidement et pour lequel l'assistance de l'informatique est reconnue depuis longtemps comme indispensable.

Dans tous les cas, le but recherché vise donc à la fois l'amélioration de la productivité (via la modernisation des processus) et l'amélioration de la qualité (via la modernisation des produits).

Essentiellement producteur d'informations géographiques l'IGN voit ces objectifs recouper pratiquement toutes ses activités, sous forme de projets que l'on peut regrouper en deux grandes familles :

- 1) projets de bases de données documentaires, ou plutôt de diffusion, qui sont essentiellement des répertoires informatisés, facilitant aux usagers l'accès aux documents ou données qu'ils désirent : répertoires des communes, des points géodésiques, des repères de nivellement, des toponymes, etc...
- 2) projets de bases de données "cartes" qui consistent en la réalisation puis la présentation sur support informatique, du *contenu* lui-même des cartes existantes ou à venir, ceci constitue évidemment la majeure partie de l'effort entrepris :

- la carte de base à 1 : 25 000 destinée à devenir la "base de données topographiques du territoire", sous sa forme modernisée ;
- la carte dérivée à 1 : 100 000 destinée à devenir la "base de données cartographiques" avec, entre autres, l'assistance de SPOT ;

— des projets complémentaires, également d'intérêt général : données urbaines, réseaux routiers, images spatiales rectifiées à haute précision, planisphères...

Afin de prendre en compte la synthèse des besoins des principaux utilisateurs, en termes de contenu, deux enquêtes approfondies ont été menées en 1986, concernant les deux principales bases de données "cartes" (topographiques et cartographiques).

II — Aspects techniques généraux des bases de données

Toutes ces bases de données sont conçues en fonction d'une utilisation externe à l'IGN et pas seulement comme moyen interne d'amélioration des processus de production. D'ailleurs, leur réalisation est programmée en tenant le plus grand compte des demandes, le système actuel comporte une partie obligatoire et une partie optionnelle susceptible d'être modifiée en fonction des demandes externes.

La création de ces bases de données est l'occasion d'innovations fondamentales, par rapport à la cartographie traditionnelle, dues au traitement numérique des données. La plus importante d'entre elles est sans conteste le fait de séparer complètement la saisie des données de leur exploitation ultérieure. Ceci permet d'améliorer la précision de l'enregistrement d'autant plus que chaque détail est numérisé à sa position réelle, ainsi que la richesse du contenu notamment dans les zones très chargées. Par ailleurs, au moment de la saisie, les objets sont enregistrés avec des attributs descriptifs, mais indépendamment de toute symbolisation, celle-ci n'intervenant éventuellement qu'au stade de la rédaction. Cette différence essentielle permettra à terme la diversification des produits cartographiques et une plus grande souplesse d'adaptation aux besoins du marché.

Dans ces bases de données, est également prise en compte la topologie des divers réseaux (routier, ferré, hydrographique...), phénomène souvent mal représenté sur les cartes classiques.

La diffusion vers l'extérieur de l'IGN de ces données localisées numériques fait également l'objet d'études attentives. Outre la diffusion traditionnelle sous forme graphique, sont également prévues :

- la diffusion par minitel au moins pour les données documentaires, tant à destination du grand public que vers les techniciens (géomètres-experts...) ;
- l'édition d'extraits de bases de données sur support optique compact (CD ROM) ;
- la diffusion des cartes sous forme numérique en mode maillé (par scannage des planches graphiques existantes et stockage sur support tel que le disque optique numérique) ;
- la cession d'extraits des bases de données aux organismes équipés pour les traiter et qui en feront la demande.

L'entretien et la *mise à jour* de chacune de ces bases de données seront assurés avec une périodicité régulière par compilation puis saisie des informations fournies, autant que faire se peut, par les organismes gestionnaires des données concernées. Ces différentes bases de données sont étudiées et réalisées en parallèle, et toutes les passerelles possibles seront développées afin d'assurer leur cohérence et d'optimiser les opérations de saisie et de mise à jour.

L'utilisation externe des bases de données IGN qui est prévue et même souhaitée, moyennant la protection des droits d'auteur, aura inéluctablement des conséquences à moyen et long terme sur l'établissement. Elle entraînera vraisemblablement une décentralisation progressive de la cartographie thématique, le rôle de l'IGN en matière d'acquisition et d'entretien des données étant par contre renforcé.

III — Base de données cartographiques (BD carto)

La constitution de cette base de données a été décidée en 1982 par la direction générale de l'IGN, avec comme principal objectif l'automatisation progressive de la production des cartes dans la *gamme d'échelles* 1 : 100 000 à 1 : 500 000. Dans cette optique, il était prévu de l'établir de manière exhaustive tous les thèmes par zones géographiques et de l'étendre progressivement à tout le territoire.

La consultation menée auprès d'un échantillon représentatif des partenaires techniques de l'IGN demandeurs d'informations géographiques dans cette gamme d'échelles, a été conduite au cours de l'année 1986. Elle a montré avec beaucoup de netteté le besoin de traiter prioritairement certains thèmes (routes, lignes EDF...) alors que d'autres, bien que nécessaires, s'avèrent moins urgents. Les principaux objectifs de cette base de données, dont la saisie doit être achevée vers 1992 sont les suivants :

- servir de référentiel commun aux organismes qui ont pour mission de saisir des données thématiques localisées justiciables de cette gamme d'échelles ;
- pouvoir être fournie sous une forme numérique adaptée (extractions, sélections thématiques,...) à tous les organismes demandeurs, leur permettant des croisements avec leurs propres données, des traitements thématiques...
- enfin, elle doit permettre à l'IGN d'automatiser au moins partiellement la production de ses cartes dans cette gamme d'échelles (série verte, série rouge...) et de fournir des produits à la demande (cartes départementales, cartes thématiques...).

Les principales spécifications de cette base de données sont :

- précision décimétrique ;
- contenu, au moins aussi riche que celui de la carte à 1 : 100 000 série verte.

Ainsi, la base de données cartographiques sera une bonne réponse aux problèmes d'informations géographiques à précision décimétrique, elle permettra d'éviter des numérisations non coordonnées qui conduiraient à des double-emplois et à une hétérogénéité quasi irréversible des données produites.

IV — Base de données topographiques (BD Topo)

Le principe de la constitution de cette base de données

a été retenu par la Commission Nationale de l'Information Géographique, dans le cadre de la réfection de la carte à 1 : 25 000 et pour asseoir le plan topographique à 1 : 5 000. La décision de réalisation a été prise au cours des réunions interministérielles des 6 décembre 1984 et 22 avril 1985, qui ont également conduit à la décision de réaliser un plan topographique à grande échelle et à la mise en place du CNIG.

Les principaux objectifs visés par cette base de données topographiques sont les suivants :

- permettre une automatisation maximale de la cartographie dans la gamme d'échelles 1 : 5 000 à 1 : 50 000. De cette base de données seront donc issus :
- la carte de base à 1 : 25 000 et la carte dérivée à 1 : 50 000 ;
- des plans topographiques à 1 : 5 000 à la demande et, en particulier la partie topographique du plan topographique dans les zones rurales ;
- des cartes à échelles diverses et notamment à 1 : 10 000.

Les spécifications de cette base de données ont été arrêtées après examen détaillé des résultats de l'enquête lancée par le CNIG en 1986 et analyse des essais réalisés. On peut donner les indications suivantes :

- précision de l'ordre du mètre en XY et de 0,6 mètre en Z (sur des détails bien définis) ;
- contenu, voisin de celui de l'actuelle carte à 1 : 25 000 ;
- prise en compte de l'altitude de certaines superstructures (constructions et peut-être végétation).

Ces caractéristiques, permettant effectivement des sorties de qualité jusqu'à l'échelle de 1 : 5 000, seront obtenues par restitution photogrammétrique numérique de photographies aériennes à l'échelle de 1 : 30 000 principalement.

Les levés numériques seront bien entendu complétés par compilation de l'existant (cartes en service notamment) et passage sur le terrain ; les données complémentaires, ainsi que les corrections, seront introduites sur poste interactif.

L'objectif actuel est de réaliser la couverture complète du territoire en une trentaine d'années, d'où la nécessité de produits d'attente tels que les cartes scannées.

Avant de clore sur ce sujet, il faut signaler que cette base de données existe déjà dans sa partie altimétrique. L'IGN a, en effet, terminé, après plus de dix ans de travail, la collecte des données du relief couvrant la totalité du territoire métropolitain, y compris la Corse. Pour les deux tiers, ces données sont issues de la numérisation des courbes de niveau des cartes à 1 : 25 000, le tiers restant (zones montagneuses) étant issu de restitutions photogrammétriques de clichés à l'échelle de 1 : 60 000. Les données de cette base ne sont donc pas parfaitement homogènes, elles seront améliorées chaque fois que leur qualité sera jugée insuffisante, au fur et à mesure de la constitution de la base de données topographiques.

Enfin, sans attendre, l'IGN a commencé la constitution d'une base de données des toponymes. Au fur et à mesure de la réalisation de la base de données topographiques, ces deux bases seront croisées, chaque toponyme venant alors en attribut de l'objet qu'il désigne.

Je laisse le soin aux deux chefs des projets, Marie-Noëlle Sclafer et Christian Faad, de vous présenter plus précisément chacune de ces deux bases. Ils insistent sur la méthodologie de saisie, l'avancement des travaux et les procédures de mise à jour, en illustrant visuellement leurs propos.

BASES DE DONNEES LOCALISEES DE L'INSTITUT GEOGRAPHIQUE NATIONAL

Christian FAAD, Ingénieur Géographe



L'Institut Géographique National a entrepris depuis quelques années la constitution de deux bases de données destinées à constituer une référence géographique dans leur domaine respectif. Il s'agit de la base de données cartographiques (BDCARTO) et la base de données topographiques (BDTOPO).

Ces deux bases de données font l'objet d'une présentation détaillée. Cependant, un certain nombre de caractéristiques sont communes aux deux bases. Celles-ci sont abordées ici.

1. Principes généraux

Les détails contenus dans les deux bases de données sont localisés. Leur position a été saisie "en place".

Deux types d'informations ont été saisies : la géométrie et la description physique ou fonctionnelle des objets. Les deux bases de données ne contiennent pas d'informations liées à une symbolisation quelconque.

Les objectifs de ces deux bases de données sont :

- la rédaction des cartes de l'IGN (séries bleues, oranges, vertes et rouges) ;
- la fourniture aux utilisateurs qui le demandent de données localisées structurées.

2. Structuration

Les détails contenus dans les deux bases de données sont décrits par deux niveaux logiques d'information :

- le niveau géométrique qui fournit leur localisation ;
- le niveau descriptif qui précise leurs caractéristiques et les liens entre ceux-ci.

2.1. Niveau géométrique

Il repose sur deux concepts : topologique et métrique.

La topologie repose sur la notion de couches.

Chaque couche constitue un graphe topologique. Elle est composée d'arcs, de sommets et de faces reliés entre eux par des relations topologiques. Tout sommet connaît les arcs incidents. Chaque arc connaît son sommet de départ et son sommet d'arrivée. Chaque face est définie par un (ou plusieurs) chemin d'arcs décrivant son périmètre.

La métrique est constituée par les coordonnées des points : x , y et z (pour la BDTPO). Les données numériques fournies aux clients sont dans le système souhaité, en général, en Lambert zone (1, 2, 3 ou 4) ou en Lambert 2 étendu.

A chaque arc peuvent être associées des informations les caractérisant (source de l'information,...).

2.2. Niveau descriptif

Trois concepts : objets, attributs, relations.

Le niveau descriptif repose sur la définition d'objets. Ces objets correspondent à la partie descriptive des éléments du terrain à représenter. Ils sont regroupés en classes (ex. tronçon d'axe routier). Une classe est caractérisée par :

- un nom ;
- une liste d'attributs.

Il existe deux types d'objets :

- des objets élémentaires qui sont directement en relation de construction avec le niveau géométrique (ex. arbre, tronçon de route, zone boisée, lac,...) ;
- des objets complexes constitués à partir d'objets élémentaires (ex. route nationale).

Un attribut est un qualificatif associé à une classe d'objet.

Des relations peuvent exister entre certains objets (ex. clocher associé à une église ou bas de talus associé au haut de celui-ci).

Indépendamment du graphe topologique décrit dans le niveau géométrique, existe pour chacun des réseaux (routiers, ferrés et électriques) un graphe de niveau supérieur qui ne comprend que les tronçons (chaussées,...) et les nœuds (carrefour,...) de ceux-ci. Ces graphes de niveau supérieur sont planaires. C'est un de ces graphes qui permet par exemple la gestion d'itinéraires routiers.

3. Organisation informatique

Les deux bases de données seront implantées sur un serveur général (en fait un ordinateur disposant de suffisamment de mémoire auxiliaire sur lequel est intégré un système d'informations géographiques).

Ce serveur général sera installé à l'Institut Géographique National. Il sera relié au réseau général Ethernet de l'IGN.

La saisie des données est organisée en atelier (atelier de restitution photogrammétrique et atelier de corrections interactives).

Dans chaque atelier, on trouve :

- un serveur d'atelier relié au réseau général Ethernet et à un réseau local au niveau de l'atelier. Ce serveur d'atelier est comparable au serveur général, mais il ne gère que les données concernant un chantier (unité de travail) ;
- des postes de saisie interactive reliés au réseau local de l'atelier.

Les postes de saisie ont fait l'objet d'appels d'offre. Les appareils de restitution analytique Prime Wild Système 9 ont été retenus pour la saisie photogrammétrique et les stations de travail Intergraph Tigris pour les corrections interactives.

L'appel d'offre concernant les serveurs d'atelier est en cours.

Base de données topographiques IGN

Christian FAAD, Ingénieur Géographe

1. Historique

L'Institut Géographique National a entrepris depuis 1987 la constitution sur l'ensemble du territoire français d'une base de données topographiques.

Ceci répond à un besoin exprimé par la Commission Nationale de l'Information Géographique dans son rapport publié en 1983.

Depuis cette date, l'IGN s'est mis au travail. Des spécifications de la base de données ont été définies, après une enquête menée auprès de 650 utilisateurs. Ces spécifications sont maintenant entérinées par la Commission Topographique sous l'égide du Conseil National de l'Information Géographique.

2. Concept

La Base de Données Topographiques est une base de données localisée de précision métrique en trois dimensions. Elle correspond au niveau de synthèse de la carte de base à l'échelle du 1 : 25 000 en terme de contenu avec une précision notablement supérieure (de l'ordre du mètre).

Elle constitue une référence géographique et permet le croisement de l'information qu'elle contient avec d'autres thèmes (cadastre, données statistiques, réseaux,...). La BDTOP peut donc être, chez un utilisateur, le premier élément d'une base de données pluridisciplinaire couvrant une zone pouvant aller de la communauté urbaine au département.

3. Domaine d'utilisation

La base de données topographiques est un outil privilégié dans les domaines suivants :

- établissement du plan topographique — POS ;
- planification et entretien du réseau routier ;
- entretien du réseau hydrographique ;
- avant-projets d'aménagement : routiers, urbanistiques, agricoles, hydrologiques, touristiques,...
- études d'impact ;
- cartographie des risques (fond de plan) ;
- cartographie touristique (fond de plan) ;
- cartographie topographique aux échelles comprises entre le 1 : 5 000 et le 1 : 50 000 ;
- schéma urbain.

Dans chacun de ces domaines, c'est un outil d'étude, de gestion, d'aide à la décision et de communication.

4. Produits

Trois produits peuvent être élaborés à partir de la BDTOP :

— Produit 1 : données numériques structurées selon le modèle de données de la BDTOP pouvant être intégrées, chez un usager, dans une base de données localisées pluridisciplinaire (les données de la BDTOP constituant une couche de celle-ci).

— Produit 2 : une version dégradée du produit peut être fournie sous la forme de données numériques graphiques (type AUTOCAD). Dans ce cas, la zone couverte est réduite (de l'ordre de quelques kilomètres). Ce produit ne permet bien sûr pas le croisement des informations topographiques avec d'autres informations. Il permet uni-

quement la sortie de documents graphiques. Son intérêt réside dans le fait que le logiciel AUTOCAD a été diffusé à de très nombreux exemplaires, qu'il fonctionne sur un micro-ordinateur et qu'il ne demande qu'une compétence limitée dans le domaine.

— Produit 3 : lorsque la BDTOP a déjà été constituée sur une zone, des documents graphiques monochromes sur support stable (film polyester) à l'échelle du 1 : 5 000 peuvent être fournis. Ces documents graphiques constituent la partie topographique du plan topographique.

5. Spécifications

5.1. Définition générale

Elle repose sur des spécifications de contenu précises décrites dans un document technique détaillé.

Les thèmes couverts sont les suivants :

- 1 — Réseau routier.
- 2 — Réseau ferré.
- 3 — Réseau électrique.
- 4 — Hydrographie.
- 5 — Végétation.
- 6 — Bâti, équipements divers.
- 7 — Limites administratives.
- 8 — Relief ou orographie : courbes de niveau et points cotés.
- 9 — Equipement géographique (points géodésiques, repères de nivellement).
- 10 — Toponymie.

5.2. Géométrie

Les coordonnées des points de la base de données topographiques sont en coordonnées géographiques (en grades par rapport au méridien de Paris) pour les abscisses et les ordonnées, et en mètres pour les altitudes.

Les coordonnées des points figurant sur les extraits qui seront livrés pourront être en coordonnées Lambert par zone ou en coordonnées Lambert étendu, voir grand champ. Le changement de système ne pose pas de problème.

Les spécifications techniques sont les suivantes :

- géoïde de référence : NGF ;
- datum ;
- croix du Panthéon ;
- ellipsoïde de référence : Clarke 1880 IGN ;
- nouvelle triangulation ;
- nivellement : réseau "IGN 1969".

La base de données topographiques couvrira l'ensemble du territoire métropolitain et les départements d'Outre-Mer. Au niveau des frontières, on se limite à un léger débordement de l'ordre de 250 mètres.

5.3. Réseau routier

Le réseau routier est défini géométriquement par l'axe des chaussées (de façon tout à fait exceptionnelle par les bords).

Indépendamment du graphe topologique décrit dans le niveau géométrique, le réseau routier constitue un graphe de niveau supérieur qui ne comprend que les tronçons et les nœuds de celui-ci. C'est ce graphe qui permet la gestion d'itinéraires routiers.

Les carrefours, les parcs de stationnement, les péages, les aires de service sont des nœuds de ce graphe de niveau supérieur.

Les routes nationales, départementales, les chemins de grandes randonnées sont des objets complexes composés de tronçons d'axe de routes,...

5.4. Réseau ferré

Le réseau ferré est défini géométriquement par l'axe de l'emprise des voies.

Indépendamment du graphe topologique décrit dans le niveau géométrique, le réseau ferré constitue un graphe de niveau supérieur. A chaque tronçon de voie est associé le tronçon précédent et le tronçon suivant.

Les établissements ferroviaires (gares, arrêts, stations) sont associés aux tronçons.

5.5. Réseau électrique

Ne figurent dans la BDTOPO que les lignes électriques dont le voltage est supérieur à 63 kV (réseau de transport).

Le réseau électrique constitue un graphe dont les lignes sont les arcs et les centrales et les postes de transformation (sur réseau de transport uniquement) les nœuds.

5.6. Hydrographie

Les rivières et les canaux sont définis dans la BDTOPO par leur axe s'ils ont une largeur inférieure à 7,5 mètres, par leurs bords dans le cas contraire.

Un cours d'eau est un objet complexe avec un toponyme et constitué d'une succession de tronçons d'axes de rivières (ou de canaux) et d'éléments zonaux définis par les bords de rivières (ou de canaux).

Les cours d'eau, les lacs et les mers constituent un graphe de niveau supérieur dont les cours d'eau sont les arcs et les lacs et les mers les nœuds : la Marne se jette dans la Seine, elle-même dans la Manche.

5.7. Bâti

Les coordonnées des angles des bâtiments sont prises au niveau des gouttières. Les limites intérieures des toits sont saisis lorsque la plus grande dimension de ceux-ci est supérieure à 50 mètres et l'écart en z est de plus de 2 mètres.

La hauteur des bâtiments ne figure pas explicitement dans les données BDTOPO. Elle peut être estimée dans la majorité des cas à partir d'un modèle numérique de terrain, mais il existe un certain nombre de cas particuliers qui posent problème.

Les enceintes à caractère public ou administratif (mairie, cimetière, musée,...), à caractère commercial (centre commercial, marché,...) et à caractère industriel (usine, carrière,...) sont définies par leur périmètre.

5.8. Végétation

Les arbres isolés, les haies et les limites de bois (dans

la mesure où cette limite ne correspond à aucun autre détail topographique (route, rivière,...) sont saisis au sommet des arbres (autant que cela est possible sur un appareil de restitution).

Cela ne permet pas de connaître la hauteur des arbres des zones boisées car :

- le périmètre n'est pas saisi en entier au sommet de ceux-ci ;
- les limites intérieures de bois correspondant à des arbres de hauteurs différentes ne sont pas obligatoirement saisies.

5.9. Orographie

L'équidistance des courbes est identique à celle de la carte à l'échelle du 1 : 25 000. Elle varie de 5 à 20 mètres selon le relief.

Les points cotés ont un attribut qui précise la nature du détail topographique qui les portent (point naturel : quelconque, sommet, col, cuvette ; point sur route ou sur voie ferrée). Cet attribut a pour but de pouvoir distinguer ceux d'entre eux qu'il est utile d'intégrer dans un calcul de MNT.

5.10. Limites administratives

Les unités administratives (régions, départements, arrondissements, cantons (ruraux uniquement), communes) sont des objets complexes composés d'un certain nombre de limites.

Une hiérarchie précise les inclusions entre les différents types d'unités administratives.

5.11. Equipement géographique

Les points géodésiques et les repères de nivellement sont issus de la base de données géodésiques.

5.12. Toponymie

La toponymie de la BDTOPO se situe à deux niveaux :

- un certain nombre d'objets simples (carrefour aménagé, pont,...) ou complexes (unités administratives,...) ont un attribut toponyme ;
- toutefois ceux des toponymes de la carte à l'échelle du 1 : 25 000 qui correspondent à des détails topographiques à limite floue (lieu-dit non habité,...) sont intégrés dans la BDTOPO avec leur nature et leur position approchée (kilomètre Lambert).

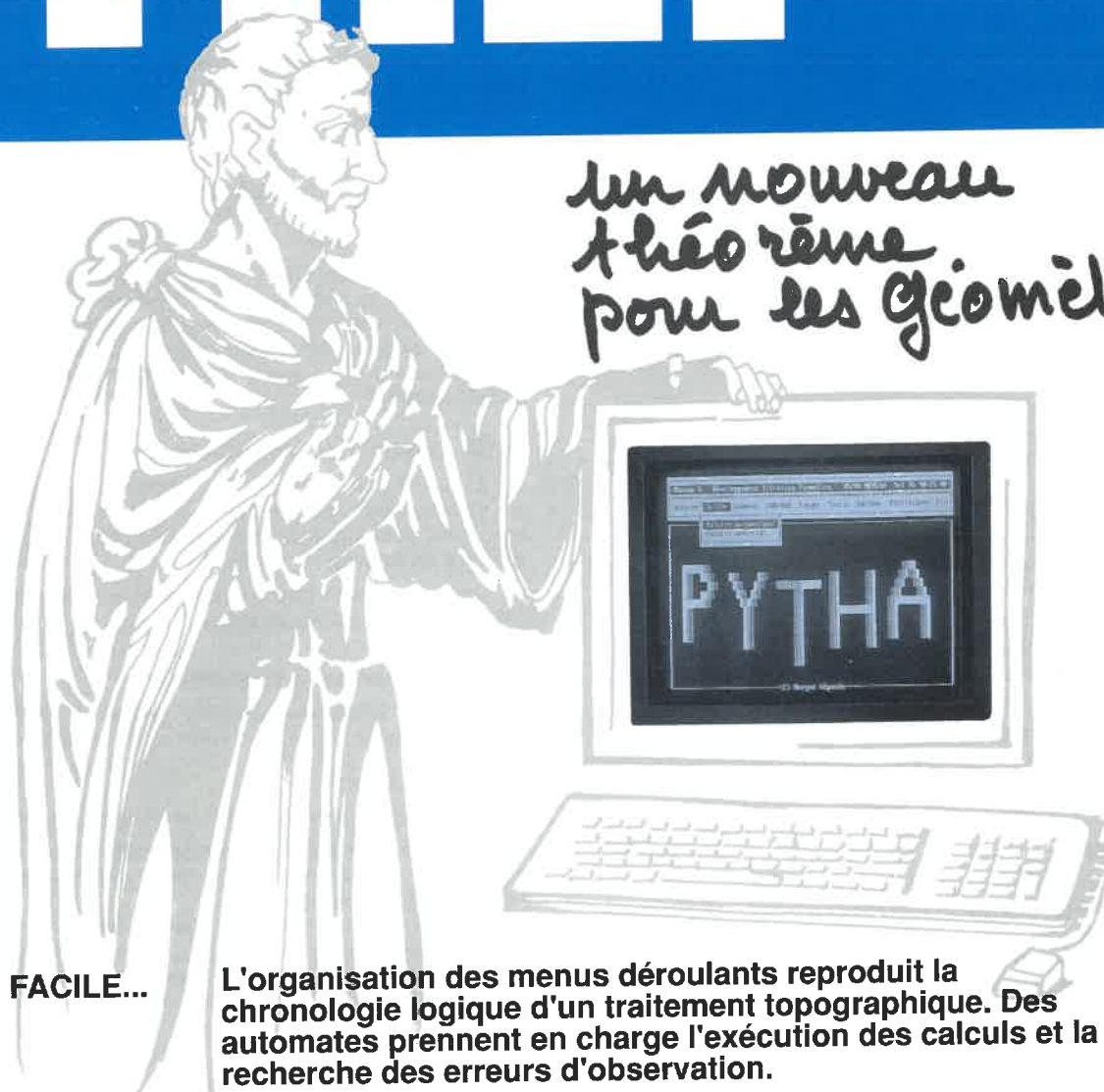
6. Processus de numérisation

Le processus de saisie comprend les phases suivantes :

- prise de vues aériennes verticales ;
- stéréopréparation et aérotriangulation ;
- restitution photogrammétrique ;
- complètement sur le terrain ;
- corrections sur poste interactif graphique ;
- intégration des données dans la BDTOPO.

PYTHIA

VERSION 3.0



*un nouveau
théorème
pour les géomètres...*

FACILE...

L'organisation des menus déroulants reproduit la chronologie logique d'un traitement topographique. Des automates prennent en charge l'exécution des calculs et la recherche des erreurs d'observation.

RAPIDE...

Un minimum d'interventions suffit toujours pour obtenir les résultats. Les traitements automatiques sont fréquents et optimisés.

COMPLET...

Dès sa version de base, PYTHA comprend :

- l'acquisition des carnets manuels et électroniques
- le traitement de canevas en bloc par moindres carrés
- une bibliothèque complète de commandes de constructions géométriques accessibles depuis le clavier, la souris ou le digitaliseur
- des fonctions de digitalisation
- la génération de reports et dessins sur tous traceurs.

parce qu'une démonstration vaut mieux qu'un long discours

MISEZ SUR L'EFFICACITE, CONSULTEZ-NOUS



la géo-informatique

17, chemin des Sources
38240 MEYLAN
Tél. 76.90.25.40

Base de données cartographiques IGN

Marie-Noëlle SCLAFER, Ingénieur Géographe



1. Définition et historique

Prévue au début des années 80 pour renouveler la production cartographique de l'IGN aux échelles du 1 : 100 000 à 1 : 500 000, la base de données cartographiques a été conçue et spécifiée de 1985 à 1987 en tenant compte des bouleversements que l'avènement des SIG apporte dans le monde de l'information géographique.

La base de données cartographiques (BDCARTO) est une base de données structurée d'information géographique. Elle correspond au niveau de synthèse du 1 : 100 000 avec un contenu enrichi. Elle permet la gestion de l'espace de l'échelle départementale à l'échelle nationale.

Associée à un logiciel d'application (SIG, système cartographique...), la BDCARTO est un outil d'étude, de gestion, d'aide à la décision et de communication particulièrement adaptée :

- aux avant-projets d'aménagement ;
- aux études d'impact ;
- à la gestion administrative ;
- à la cartographie thématique des données ;
- à la gestion des réseaux.

2. Spécifications

2.1. Caractéristiques techniques

Les informations géographiques contenues dans la base de données sont structurées conformément au modèle général des bases de données géographiques de l'IGN.

Toutes les informations contenues sont localisées avec une précision décimétrique, précision compatible avec une cartographie régulière au 1 : 100 000 et avec les images SPOT.

Les informations sont mises à jour tous les ans pour les informations principales, tous les trois ans pour les informations secondaires.

Ayant vocation à devenir une référence géographique unique pour des informations variées, elle a été conçue pour être ouverte et permettre le croisement avec les données de ses utilisateurs.

Chaque thème de la BDCARTO constitue une couche topologique séparée, néanmoins la cohérence entre les couches est assurée. Elle contient huit couches :

- réseau routier et ferré ;
- réseau hydrographique linéaire ;
- franchissement entre réseaux ;
- réseau électrique ;
- objets isolés ;
- unités administratives et techniques ;
- occupation et usage du sol ;
- orographie.

La géométrie est saisie en 2 dimensions. L'altitude n'est pas donnée, mais pourra être recalculée à partir de la couche orographie.

2.2. Processus de saisie

Les sources géométriques principales des données, sont la carte à 1 : 50 000 et l'imagerie spatiale SPOT pour l'occupation du sol. Les informations qualitatives et descriptives associées sont issues de la documentation technique recueillie à l'IGN.

Pour l'ensemble des couches, exceptées les couches occupation du sol et la couche orographie, les principales étapes du processus de saisie sont les suivantes :

- sélection et dessin au trait des éléments à conserver ;
- scannage du film résultant de cette opération de sélection ;
- vectorisation du fichier maillé ;
- préparation de codage à partir des sources documentaires ;
- codage des fichiers vectorisés sur poste interactif ;
- vérification automatique de cohérence et dessins de contrôle ;
- correction des données ;
- intégration dans la base de données cartographiques.

Pour la couche occupation du sol, l'interprétation d'image SPOT ou la classification automatique viendront se substituer aux premières étapes. La couche orographie sera, elle, dérivée de la base de données altimétriques.

2.3. Contenu

La BDCARTO contient l'ensemble du réseau routier principal et classé, toutes les routes revêtues ou non constituant une desserte locale (chef-lieu de commune, gros hameau, aéroport, zone industriel, centre commercial...), toutes les routes ou chemins permettant de desservir les zones sensibles au feu. D'une manière générale, il n'existe pas de point du territoire national desservi par une route dans la réalité qui soit à plus de 1 km d'une route retenue dans la BDCARTO.

Les tronçons de routes sont décrits par leur axe et portent des attributs parmi lesquels : classement administratif, numéro de route, type de revêtement, nombre de chaussées, nombre de voies... L'ensemble du réseau routier a une structure de graphe qui permet la gestion d'itinéraire ou le chaînage des itinéraires, par exemple les routes N7 ou D1. Les obstacles ou équipements : péage,

échangeur, carrefour aménagé, aire de service sont des sommets de ce graphe.

L'ensemble du réseau ferré principal et des voies industrielles de plus d'un kilomètre est décrit par un graphe ; les gares et arrêts sont les sommets de ce graphe.

Le réseau hydrographique linéaire est décrit par son axe. Lorsque la largeur de la rivière dépasse 50 mètres, la surface en eau est traitée dans la couche occupation du sol et est en relation avec l'axe qui la représente dans le réseau hydrographique linéaire. L'ensemble des ruisseaux ou rivières portant un toponyme sur les cartes à 1 : 25 000 porte ce toponyme comme attribut dans la BDCARTO. Le réseau hydrographique est continu même lors de la traversée des étendues d'eau ; il est structuré en graphe. Il est donc possible d'utiliser ces données pour calculer un écoulement.

Les franchissements sont calculés et gérés (notion de niveau et de communication possible ou impossible) pour les réseaux routier, ferré et hydrographique linéaire et entre eux.

L'ensemble du réseau de transport d'électricité est saisi sous contrat avec EDF. Il possède la structure de graphe correspondant à la logique des lignes EDF.

Les unités administratives constituent un graphe de domaines couvrant l'ensemble du territoire français. Le numéro INSEE constitue un identifiant univoque de chaque commune.

L'occupation du sol constitue un graphe de domaine

portant comme attribut la nature de l'occupation du sol : zone bâtie, équipements d'infrastructure, zone boisée, hydrographie de surface, surface minérale à nu...

3. Calendrier de réalisation et produits

La saisie de la Base de données cartographiques s'effectue thème par thème. Elle a débuté en 1987 pour la saisie des réseaux et des limites administratives. A la fin de l'année 1989, la moitié du territoire français sera déjà couvert. La saisie des thèmes occupation du sol et orographie, amorcée en 1989, deviendra opérationnelle dès le début de l'année 1990. L'ensemble de la saisie pour tous les thèmes et tout le territoire français doit être terminée au début de l'année 1992. La mise à jour des données débutera en 1991.

Les données de la BDCARTO pourront être extraites par sélection thématique (réseau départemental, zones bâties, lignes électriques très haute tension, réseau hydrographique complet, etc...) et/ou par sélection géométrique (unité administrative, polygone quelconque...). Les opérations de traitement des données sont prévues pour fournir un lot de données cohérent : simplification de graphe, chaînage... Trois types de format sont prévus pour des livraisons standards selon la complexité de la structure livrée : un format de dessin (DXF) pour des livraisons simplifiées, un format spaghetti (SIF) et un format topologique (en cours de définition) permettant de transmettre toute la richesse de l'information.

LE POSITIONNEMENT PAR SATELLITES G.P.S

Pour profiter au mieux de ces possibilités nouvelles
EFFICACITE - PRECISION - RENTABILITE



GEOID



Ses ingénieurs topographes

Son matériel de pointe

Son expérience

PEUT DEVENIR VOTRE ALLIE

- EN FRANCE
- A L'ETRANGER



INNOVONS ENSEMBLE



GEOID
CAP ALPHA - MONTPELLIER TECHNOPOLE
Avenue de l'Europe
34830 - clapiers

Nouvelle adresse

Tél : 67 59 30 48

Fax : 67 59 30 10

UNE NOUVELLE GAMME DE PORTABLES DIGNES DE CE NOM

PSION MOBILE COMPUTER

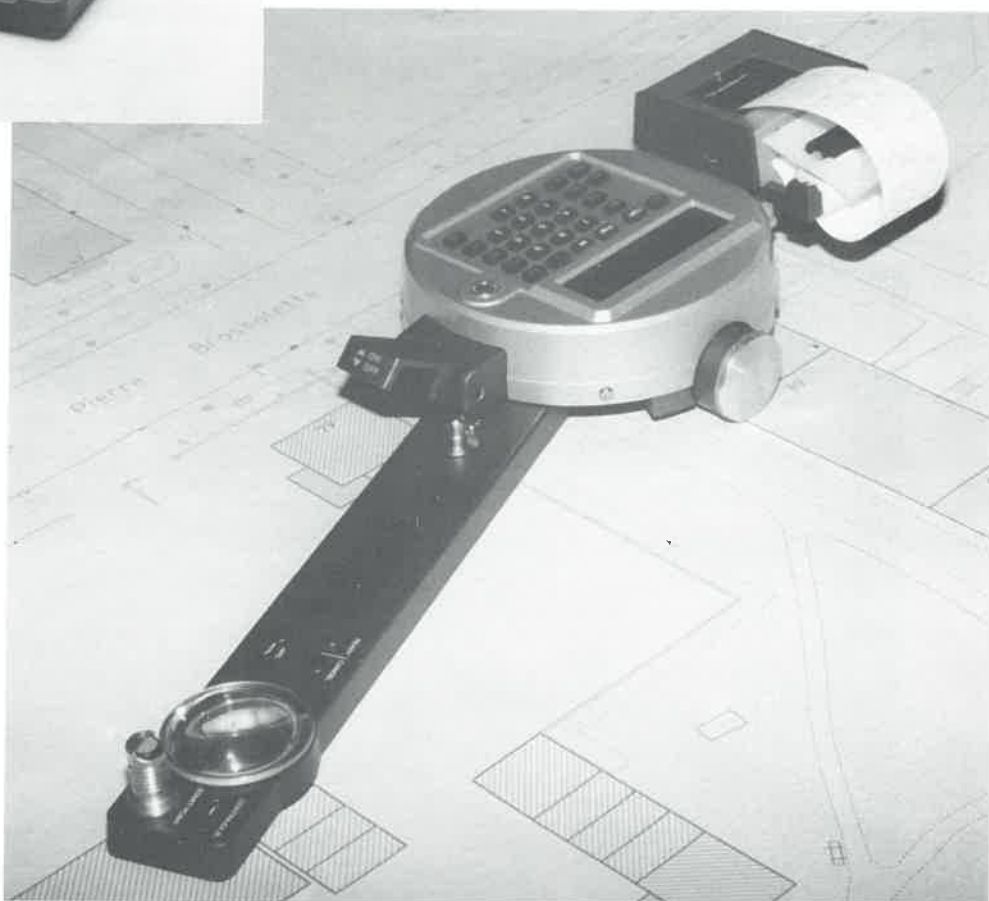
LE PLUS AUTONOME DE TOUS LES PORTABLES (30 à 75 heures)



**RENDEZ-VOUS A GEOMAT
au Futuroscope de Poitiers
du 30 mai au 1^{er} juin
STAND H63**

**DIGITALISEUR
MULTIFONCTIONS**

**L'OUTIL
INDISPENSABLE
DU BUREAU D'ETUDES**



X-PLAN 360iR



LE MATERIEL DE PRECISION

110, rue de Charenton - 75012 Paris - Tél. : (1) 43.07.85.45

Tout le matériel de topographie et informatique

PSION - HP - NEC - EPSON - TOSHIBA - SVC - OCÉ GRAPHICS

Jules et Paul Marmottan
Collectionneurs prestigieux
au Musée Marmottan

du 8 juin au 1er octobre 1990

Quatre-vingts oeuvres feront l'objet d'une exposition, parmi lesquelles des toiles primitives provenant des écoles espagnole, allemande, flamande et italienne collectionnées par Jules Marmottan, ainsi qu'un large choix d'huiles, de dessins, d'aquarelles et de gravures d'époque napoléonienne, d'un intérêt historique particulier.

Du mobilier ayant appartenu à l'Empereur sera également exposé, agrémenté de bronzes et de porcelaines de la même époque. Cet ensemble a été réuni par Paul Marmottan, fervent admirateur de Napoléon.

Arnaud d'Hauterives, Conservateur du Musée, membre de l'Académie des Beaux-Arts, et Marianne Delafond, Adjointe au Conservateur, ont organisé cette manifestation en hommage à Jules et Paul Marmottan, généreux mécènes et collectionneurs prestigieux.

Le Musée Marmottan situé 2 rue Louis Boilly, dans le XVII^e arrondissement, est ouvert tous les jours sauf le lundi de 10 H à 17 H 30.
Prix d'entrée : 25 F
Tarif réduit : 10 F (étudiants, Amis du Louvre, groupe.)
Visite commentée sur demande.

LEICA : UN GRAND NOM POUR UN GRAND GROUPE

OPTIQUE, ELECTRONIQUE ET MECANIQUE DE HAUTE PRECISION :
Naissance du Groupe LEICA Plc par fusion de Wild Leitz (Suisse) et de Cambridge Instruments (Grande-Bretagne)

En Août 1989, on annonçait le projet de fusion entre la Holding suisse Wild Leitz et la société britannique Cambridge Instruments. Après l'accord des Commissions de Monopole allemandes et britanniques et la toute récente approbation du Département de Justice américain, l'opération de fusion a pu avoir lieu le 2 Avril dernier.

Le Groupe réunissant les 2 sociétés se nommera LEICA, du nom de la prestigieuse marque du Groupe Wild Leitz jusqu'alors réservée aux produits photographiques. Le Groupe sera coté à la Bourse de Londres.

Avec cette fusion, le Groupe LEICA devient l'un des plus importants constructeurs mondiaux dans le domaine de l'optique, de l'électronique et de la mécanique de haute précision. LEICA a une position de leader mondial dans les secteurs de la géodésie, de la microscopie optique et électronique et de la microtomie. Les célèbres appareils photographiques et jumelles LEICA donnent au Groupe une place de premier rang dans ce secteur d'activité.

La majorité des actions, à la hauteur de 70%, est détenue par UNOTEC, holding appartenant au groupe de l'industriel suisse, le Dr Stephan Schmidheiny.

Le Groupe LEICA emploie environ 11.500 collaborateurs dans le monde, dont la majorité se situe dans les centres de production répartis sur 8 pays et dans les filiales commerciales localisées dans 20 pays.

Parmi les objectifs du nouveau Groupe citons le renforcement des organisations commerciales des 2 sociétés dans le monde et la création de filiales au Japon, en Corée, en Espagne et en Belgique. La priorité a également été donnée à la production avec l'installation d'une nouvelle usine à Singapour, la modernisation du centre de Buffalo aux U.S.A et l'extension de celui de Nussloch (R.F.A.).

Le CA du Groupe pour sa première année fiscale (1er Avril 1990-31 Mars 1991) est évalué à 5,5 milliards de Francs Français.

GRAND PRIX D'ARCHITECTURE DE L'ACADEMIE DES BEAUX-ARTS

Le Grand Prix d'Architecture a été créé en 1975 par l'Académie des Beaux-Arts dans le but de remplacer le concours du Grand Prix de Rome, supprimé en 1968 et de perpétuer la tradition pluriséculaire.

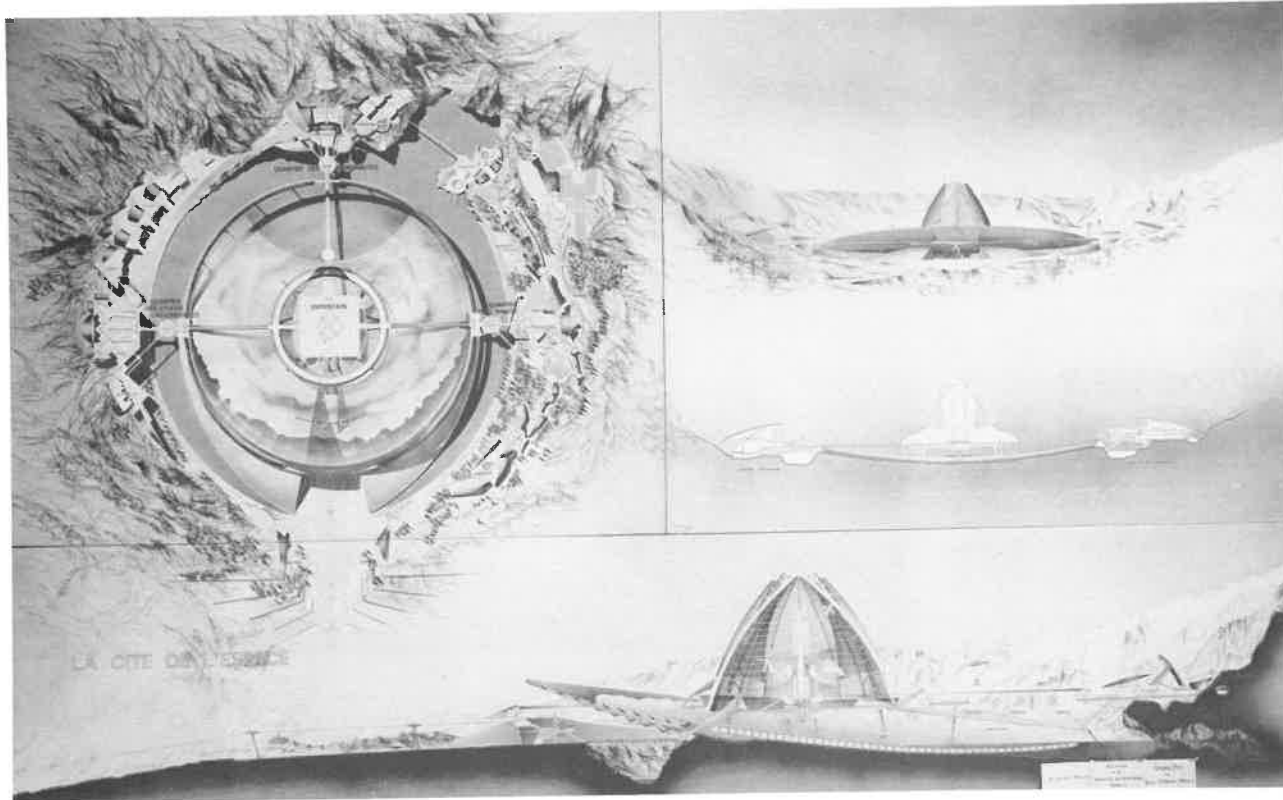
Ce concours comporte trois épreuves (une première et une deuxième esquisse en loge, puis un projet d'architecture).

Ce prix est décerné sur proposition de la section d'Architecture et de ses correspondants, ratifiée par l'Académie des Beaux-Arts dans son entier.

Chaque année un thème différent est choisi.

En 1990 le sujet "La Cité de l'Espace" a été proposé par M. Remondet, Président du Jury.

Ce jury était composé de MM. Henry BERNARD, Jacques COUELLE, Christian LANGELOIS, Maurice NOVARINA, André REMONDET, Marc SALTET, Roger TAILLIBERT, Bernard ZEHRFUSS (section d'Architecture) et de MM. André DUNOYER de SEGONZAC, Claude FERRET, Henry-Jacques LE MEME, Paul MAYMONT, Paul de NOYERS et Gustave STOSKOPF (Correspondants).



Laurent Rollin, grand prix d'architecture 1990 de l'Académie des Beaux-Arts.

GEODIMETER 140 SMS

PILOTAGE DE TUNNELIER ASSISTÉ PAR ORDINATEUR AU TUNNEL SOUS LA MANCHE.



Photo: World Tunnelling

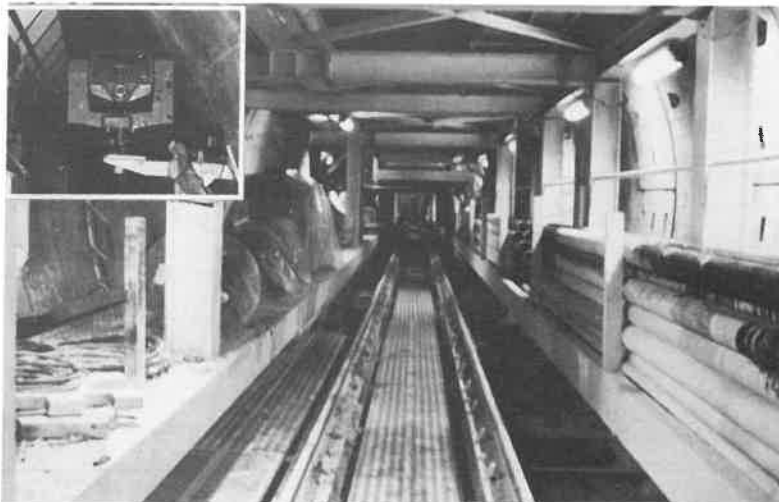


Photo aérienne du chantier du tunnel sous la Manche, à Sangatte près de Calais sur la Côte Française. La zone blanche représente les dépôts des matériaux extraits. Le bâtiment en forme de croix est construit sur l'emplacement où les tunneliers furent descendus.

PILOTAGE DE TUNNELIER SOUS LA MANCHE A L'AIDE DU GEODIMETER 140 SMS

GENERALITES

Le chantier du tunnel sous la manche est entré dans sa phase active en fin d'année 1988.

Ce n'est pas la première fois qu'on essaie de construire un tunnel sous la Manche. Un projet très avancé a même existé récemment en 1974. Des tests de forages furent effectués mais sans qu'une décision politique fut prise, annulant ainsi toute réalisation pratique pour l'époque.

Cependant, l'idée ne fut pas complètement abandonnée. De nouvelles négociations entre la Grande Bretagne et la France au cours des années 80 eurent un aboutissement plus favorable : le 27 Juillet 1987, Margaret Thatcher et François Mitterrand signent l'accord de construction du tunnel, mettant fin à une longue "dispute", la France et l'Angleterre avaient déjà négocié sur l'éventualité d'un tunnel en 1983. Comme en 1974, cela n'avait pas abouti, mais à présent, le rêve du tunnel est devenu réalité.

TROIS TUNNELS

Le "tunnel" est en réalité constitué de trois tunnels parallèles : deux pour le trafic et au milieu, un tunnel de service. C'est le trafic ferroviaire qui a été retenu. Des trains à deux niveaux spécialement étudiés vont transporter passagers, voitures et poids lourds entre les terminaux actuellement en construction de part et d'autre de la manche. Le terminal Britannique est situé à Folkestone, à 8 km de Douvres. Côté Français, le terminal se trouve à Coquelles, à proximité de Calais.

Lorsque le tunnel sera ouvert au trafic (en mai 1993, si les délais sont respectés) le trajet de 50 Km se fera environ en 33 minutes. Les trains rouleront à la vitesse maximum de 160 Km/heure. La sécurité est bien sûr primordiale. Les trains ne se croiseront jamais mais suivront une boucle sans fin entre les terminaux. 3 à 4 trains par heure circuleront dans chaque direction. Les trains des réseaux ferrés Britanniques et Continentaux ne seront admis dans le tunnel

qu'à des intervalles de sécurité suffisants entre les trains "navettes" spéciaux.

Fin 1988, le forage du tunnel sous la Manche commença de part et d'autre. Les Britanniques continuèrent à percer l'ancien tunnel de 1974 vers la mer. Les Français ne disposaient pas d'un ancien tunnel pour démarrer et utilisèrent de ce fait une méthode différente :

UN TROU GIGANTESQUE

Près du village de Sangatte situé sur la côte, à proximité de Calais, un gigantesque trou de 40 m de diamètre et 60 m de profondeur fut creusé verticalement dans la terre.

Des tunneliers géants furent descendus dans ce trou. Les tunneliers vont "manger" leur chemin sous la Manche à travers la roche et l'argile, vers l'Angleterre. Ils rencontreront les tunneliers partis du côté Anglais quelquepart au milieu de la Manche, environ à 100 mètres de profondeur sous le niveau de la mer.

Cependant comme le terminal ferroviaire de Coquelles est construit sur terre à l'air libre, il a également fallu percer 3 Km de tunnel vers l'intérieur des terres pour rejoindre la surface au niveau de l'emplacement du terminal.

30 M PAR JOUR

Le premier des trois tunnels vers Coquelles fut terminé en Mai 1989. Le percement s'est effectué à une vitesse d'environ 30 m par jour, ce qui, dit-on passe pour être un record du monde dans cette catégorie de tunnel.

Les délais de réalisation de ce projet de tunnel sont très serrés. Il est donc d'une extrême importance que les équipements utilisés fonctionnent parfaitement. Les travaux s'effectuent en trois équipes : deux pour le percement effectif et la troisième pour la maintenance et le nettoyage des équipements utilisés.

PILOTAGE DU TUNNELIER

L'extrême importance de respecter un alignement parfait au cours du percement est l'évidence même. Il est facile d'imaginer les conséquences financières d'une déviation même légère du tunnelier.



Photo 2 : L'instrument Geodimeter 140 SMS fixé sur la paroi du tunnel. A gauche, un détail de gigantesque tunnelier Mitsubishi.

UN SYSTEME DE PILOTAGE ASSISTE PAR ORDINATEUR

Le consortium construisant le tunnel du côté Français a été contacté par une Société Allemande, Ingénieur und Vermessungsbüro Marx, possédant un Geodimeter 140 SMS. La Société Marx a développé en collaboration avec le professeur Jacobs de l'Université d'Essen, un programme spécifique pour le contrôle et l'alignement automatique de tunneliers, appelé TUMA.

La combinaison du Geodimeter 140 SMS et de ce logiciel constitue un système efficace destiné au contrôle automatique et au pilotage de tunnelier.

QUEL EN EST LE PRINCIPE ?

Le système peut être décrit comme un système de mesure assisté par ordinateur, entièrement automatique, fournissant en continu durant le perçage la position spatiale du tunnelier. Le résultat des mesures est présenté à la fois graphiquement et numériquement sur un écran d'ordinateur, montrant la position théorique du tunnelier comparée à sa position effective. Le logiciel calcule aussi les corrections nécessaires, la tendance du mouvement et donne automatiquement les instructions nécessaires au pilotage correct du tunnelier. De plus, il facilite également l'utilisation optimale des anneaux de béton préfabriqué qui scellent la voûte du tunnel.

DANS LA PRATIQUE

Un bras métallique est fixé sur la paroi en béton du tunnel, quelques mètres derrière la tête de forage. L'instrument de mesure Geodimeter 140 SMS y est monté à l'aide d'une embase (voir photo 2). Un prisme réflecteur est placé sur le corps du tunnelier, juste derrière la tête de forage. Une mesure de référence initiale est effectuée vers l'arrière du tunnel, ainsi que sur le prisme.

UNE STATION TOTALE MOTORISEE

L'instrument de mesure Geodimeter 140 SMS, station totale électronique motorisée, recherche le prisme et mesure automatiquement, à des intervalles de temps définis, la dénivellée et la distance horizontale ainsi que l'angle horizontal sur le prisme, pendant que le forage s'effectue. En plus de l'instrument 140 SMS, deux détecteurs sont également utilisés pour mesurer toute inclinaison horizontale et le long de l'axe de rotation. Toutes ces valeurs de mesures contenant un code de temps sont transférées



Photo 3 : La cabine de l'opérateur à bord du tunnelier. Notez les boutons pressions en face de l'opérateur. En les actionnant, il peut changer la direction du tunnelier. Les informations du Geodimeter 140 SMS, des détecteurs d'inclinaison, du système de mesures radiales, des caméras TV sont transmises en temps réels dans cette cabine ainsi que vers le bureau de chantier en surface.

vers un ordinateur situé dans une pièce de contrôle, dans le corps du tunnelier. La même information est aussi affichée sur un ordinateur au bureau de chantier en surface.

COMPARAISON DES VALEURS EFFECTIVES ET THEORIQUES

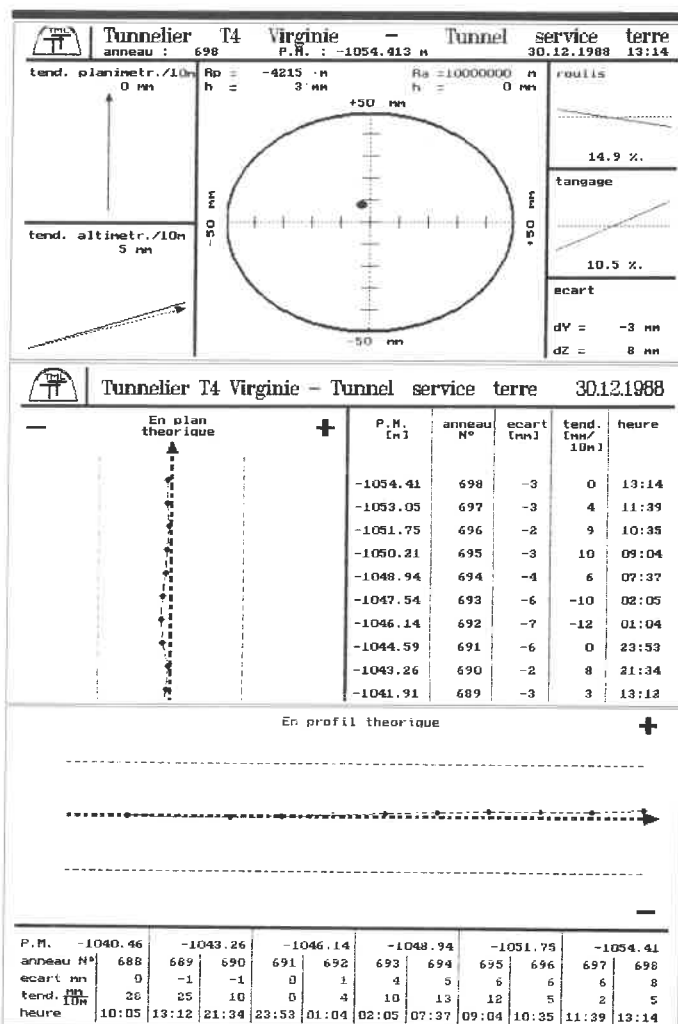
Les lectures sont affichées à l'écran de l'ordinateur, sous forme graphique et numérique, rendant facile la comparaison des valeurs effectivement mesurées avec les valeurs théoriques et la détection d'éventuels écarts. Pendant que le tunnelier est au repos entre les équipes, des mesures de contrôles complémentaires sont effectuées le long du corps de la machine.

Les graphiques à la page suivante montrent des informations qui apparaissent à l'écran du PC. Ces trois extraits montrent la direction effective du tunnelier, comparée à la direction théorique = le point zéro sur le graphique circulaire, = la ligne pointillée sur les graphiques linéaires ; on y voit également l'heure et les numéros consécutifs des anneaux en béton préfabriqué.

PILOTAGE HYDRAULIQUE

Si la direction effective du tunnelier dévie par rapport à la direction calculée, il faut la corriger. Ceci est réalisé par l'intermédiaire de 20 cylindres hydrauliques qui appuyent de l'arrière sur la tête de forage. En augmentant ou en réduisant la pression sur les cylindres, l'alignement du tunnelier peut être ajusté sous tous les angles, verticalement et horizontalement (voir photo 3).

Les anneaux préfabriqués en béton qui sont appliqués sur les parois du tunnel juste derrière le carter de protection du tunnelier ont certaines tolérances. Ils doivent sceller les parois du tunnel pour que la terre et la craie ne retombent pas après la fin du carter. Les anneaux sont constitués de segments, chaque segment ayant des dimensions et des formes différentes selon que le tunnel décrive une courbe vers la droite ou vers la gauche, vers le haut ou vers le bas. Une fois monté, chaque anneau est aussi repéré à l'aide d'un numéro consécutif. Pour faciliter les contrôles ultérieurs, ce numéro est toujours enregistré en même temps que les résultats des mesures.



Graphiques montrant les informations apparaissant à l'écran du PC (source : Marx Documentation)



GEOTRONICS PRESENTE LE GEODIMETER 460 : UNE STATION TOTALE MOTORISEE POUR ENCORE PLUS DE RAPIDITE ET DE PRECISION EN TOPOGRAPHIE.

La Société Suédoise Geotronics AB vient d'introduire le Geodimeter 460, première station totale motorisée du marché. Ce nouvel instrument topographique permet d'éliminer les aspects les plus fastidieux lors des mesures de distances et d'angles : la répétition des visées ainsi que la manipulation des vis de pointé au cours de la procédure de visée.

OPTIMISATION DES ELEMENTS PREFABRIQUES

L'espace est très limité à l'endroit où se trouve le tunnelier. (La tête de forage a le même diamètre que le tunnel lui-même). Le corps du tunnelier qui comprend aussi le moteur, la cabine de l'opérateur, la chambre de récupération des déchets, les éléments préfabriqués en béton, le convoyeur qui fait avancer les segments etc... occupe la presque totalité du tunnel derrière la tête de forage. C'est pourquoi, il est important de connaître le type de segment en béton à envoyer vers l'avant : courbe ou droit, angle vers le haut ou le bas. Une fois qu'il a été envoyé vers l'avant du tunnelier, il ne peut plus être tourné. C'est aussi pour cela qu'il est important de connaître l'alignement exact du tunnelier. En sachant cela, il est possible d'optimiser l'utilisation des anneaux en béton. Cela va ainsi accélérer la progression du travail et minimiser les périodes d'immobilisation.

SYSTEME D'ALARME INTEGRE

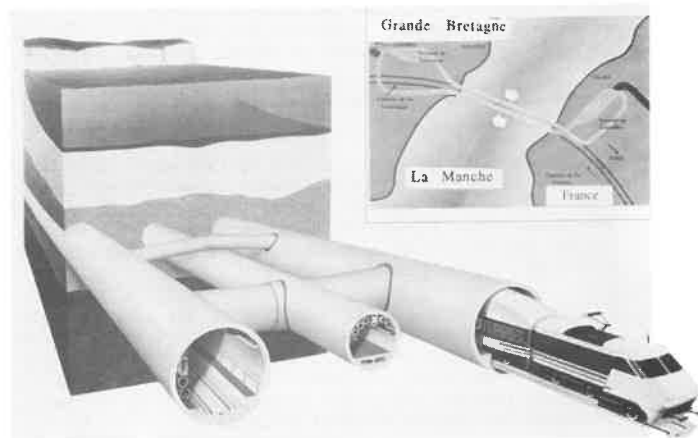
Le système TUMA dispose également de signaux d'alarme intégrés en cas de problèmes dans le système. L'environnement d'un tunnel est extrêmement hostile aux équipements électroniques. Si des valeurs incorrectes étaient enregistrées par l'instrument de mesure ou si celui-ci venait à s'arrêter de fonctionner, un message d'erreur apparaîtrait à l'écran avec des instructions de mesures manuelles jusqu'à ce que le problème soit résolu.

CONCLUSION

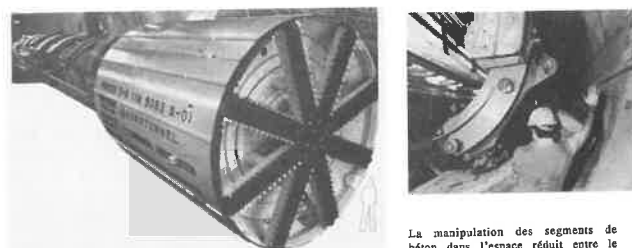
Le Geodimeter 140 SMS a très bien fonctionné au cours de ce premier essai d'utilisation appliqué aux tunnels.

La vitesse de 887 m de tunnel achevé en l'espace d'un mois, réalisée au cours du percement du tunnel de service reliant Sangatte à Coquelles, est considérée comme un record du monde pour ce type de tunnel. Le Geodimeter 140 SMS a apporté une contribution efficace à cette réalisation.

La société Marx a déjà passé commande d'un autre instrument destiné à un projet de métro à Mülheim en RFA, dont le début des travaux est prévu pour l'été 1989.



Le tunnel sous la Manche (appelé EUROTUNNEL du côté Français de la Manche) constitue un gigantesque système de transport sous la Manche. Cette photo montre comment les trois tunnels sont reliés par des traverses tous les 375 mètres pour des raisons de sécurité (source : Dépliant Eurotunnel information).



La manipulation des segments de béton dans l'espace réduit entre le tunnelier et la paroi du tunnel n'est pas aisée (photo : World Tunneling).

La tête de forage d'un tunnelier avec ses dimensions impressionnantes. Les tunneliers utilisés pour le tunnel de service ont une tête de forage d'un diamètre de 5,6 m, ceux utilisés pour les tunnels principaux font 8,8 m (photo : Eurotunnel information).

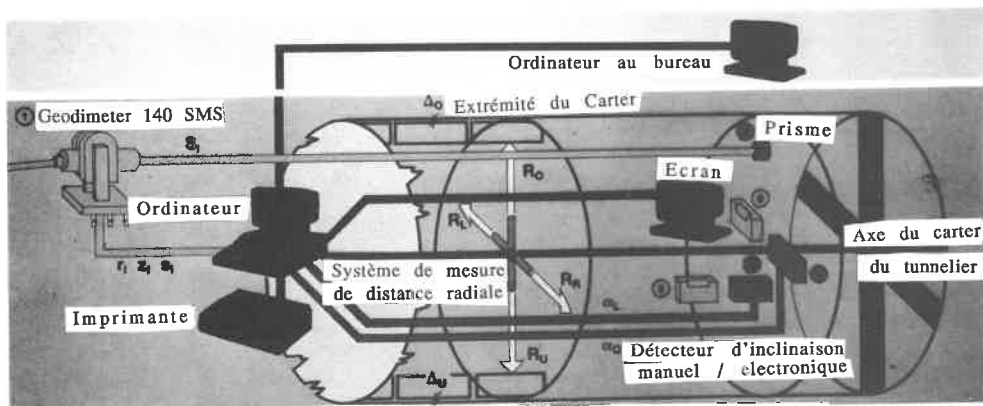
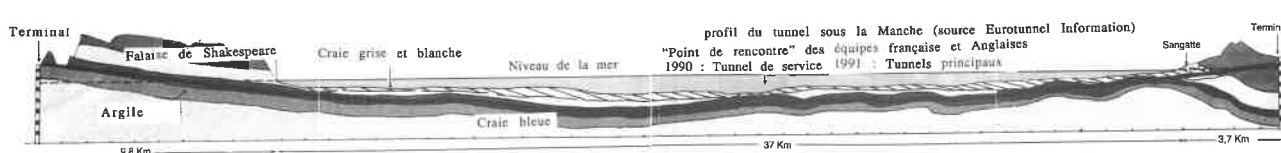


Schéma montrant l'installation du système de pilotage automatique (d'après Marx documentation)

- | | | |
|--|-------------------------------|--|
| 1. Geodimeter 140 SMS | r_i Angle horizontal | α_0 Roulis |
| 2. Réflecteur | z_i Angle vertical | α_t Tangage |
| 3 et 4 Indicateurs Electroniques d'inclin. | s_i Distance au prisme | R_0, R_U, R_L, R_R Distance radiale |
| 5 et 6 Indicateurs manuels d'inclinaison | F_i Station de l'instrument | $\Delta_0, \Delta_U, \Delta_L, \Delta_R$ Valeurs de fin de car |



HISTORIQUE DE LA TOPOGRAPHIE

L'ASSOCIATION FRANCAISE DE TOPOGRAPHIE envisage de recenser :

- d'une part les membres de l'Association s'intéressant à l'histoire de la Topographie
- d'autre part les personnes non membres de l'A.F.T. ayant déjà effectué des études et des recherches sur la Topographie antique, médiévale et celle avant la Renaissance jusqu'au 19^e siècle inclus.

Il y a beaucoup d'études sur l'histoire de la cartographie, moins sur l'histoire de la Géodésie, mais peu sur l'histoire de la Topographie, parfois annexée par les historiens de la Cartographie, mais traitée alors de façon très superficielle.

Si ce recensement révèle un nombre suffisant de personnes intéressées, il est envisagé d'organiser une réunion annuelle d'une demie-journée ou d'une journée, avec communications ou conférences sur l'historique de la Topographie (y compris l'Hydrographie) civile et militaire, procédés, méthodes, instruments, organisation des travaux depuis l'Antiquité jusqu'au 19^e siècle. Les textes rédigés de ces communications ou conférences pourraient paraître dans XYZ.

Les membres de l'A.F.T. qui seraient intéressés par la question sont priés de se faire connaître au Siège de l'A.F.T. avant le 1er Octobre 1990 en précisant :

- 1°) s'ils comptent assister en simples auditeurs à la réunion annuelle envisagée
- 2°) s'ils envisagent d'y présenter éventuellement : soit une communication (exposé d'un quart d'heure à vingt minutes), soit une conférence (une heure environ).

R. d'HOLLANDER

" Etudiant allemand, 25 ans; 6^e semestre d'Etudes Techniques Supérieures à ESSEN, souhaite effectuer un stage de vacances du 7.07 au 17.08.90; portant sur le traitement des données graphiques, relatif à des travaux fonciers et cadastraux - Région indifférente -

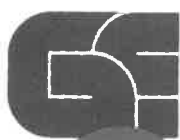
Rémunération couvrant au moins les frais de séjour :

Propositions à : Peter SCHLURMANN

Sabinastrasse 13

DE - 4300 ESSEN 1 R.F.A.

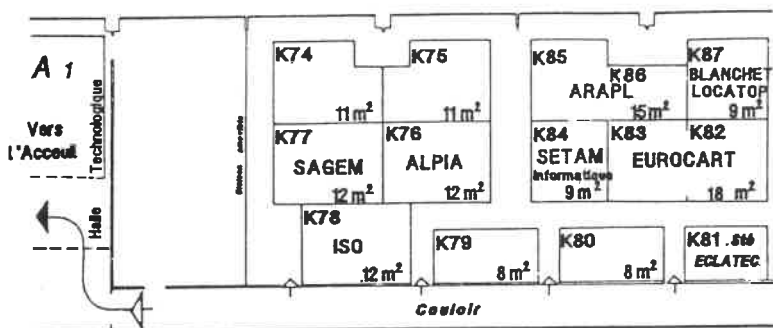
ou à l'A.F.T. qui transmettra. "



MIEUX GERER L'ESPACE :
L'IMMOBILIER DU FUTUR



Extension de l'Exposition



MESURES ET SYSTEMES

6, rue des Jardins - 60500 CHANTILLY

recherche

TECHNICO-COMMERCIAL

Pour diffusion de :

- Equipements de **photogrammétrie analytique** d'une nouvelle conception, portables.
- Applications photogrammétriques aériennes, terrestres, industrielles
- Applications multiples, perspectives intéressantes.

PROFIL

Etre attiré par une activité commerciale impliquant dynamisme et facilité de contact.

Bon niveau de connaissances en photogrammétrie. Expérience de quelques années en applications photogrammétriques appréciée. Connaissances en informatique nécessaires, et DAO Autocad appréciées.

MERCI D'ADRESSER VOTRE DOSSIER DE CANDIDATURE (LETTRE MANUSCRITE + CV + REF.) A LA SOCIETE

AMFM

A.T.G.T.

L'ASTRONOMIE

C.N.I.G

CHAMBRE SYNDICALE NATIONALE DES
GEOMETRES TOPOGRAPHES

COGERAT

COMMUNAUTE URBAINE DE STRASBOURG

CRM COMPAGNIE RADIO MARITIME

EDF REGION TOURS

ETS MICHEL BONVARLET

GERARD ALLAIRE

LART

MICHELIN

ORDRE DES GEOMETRES EXPERTS

SCP ALBENQUE REIGNER LEVEILLLE

SITES

SNBATI FORMATION

TECHNIP

PETITE ANNONCE GEOMETRE en industrie

NANCY. Le groupe SOLVAY (chiffre d'affaires de 36 milliards de francs) appuie sa forte présence dans l'Est sur 3 sites industriels, fers de lance de ses excellents résultats. Il recherche le géomètre de son usine de Dombasle. L'importance des installations (plusieurs centaines d'hectares) et les différents projets en cours offrent à un géomètre l'opportunité de jouer un rôle prépondérant : études V.R.D., détermination des implantations, gestion de la cartographie numérique, interface entre le bureau d'études et les équipes chargées des constructions. Le candidat recherché a une formation supérieure (géomètre, DUT + spécialisation) complétée par une expérience du terrain et des études acquise en cabinet ou en entreprise. La mission proposée saura également motiver un ingénieur topographe en tout début de carrière et désireux de prendre rapidement des responsabilités élargies à la hauteur de son fort potentiel. Renseignements sur simple demande. Les entretiens auront lieu, selon convenance, à Nancy, Strasbourg ou Paris. Ecrire à Ch. QUENTIN en précisant la référence A/6780. PA CONSULTING GROUP - 3 QUAI KLEBER 67055 STRASBOURG CEDEX - TEL. 88.22.01.54. (PA MINITEL 36.15 CODE PA)

A.F.T

"2 EME CONGRES INTERNATIONAL DE TOPOGRAPHIE"

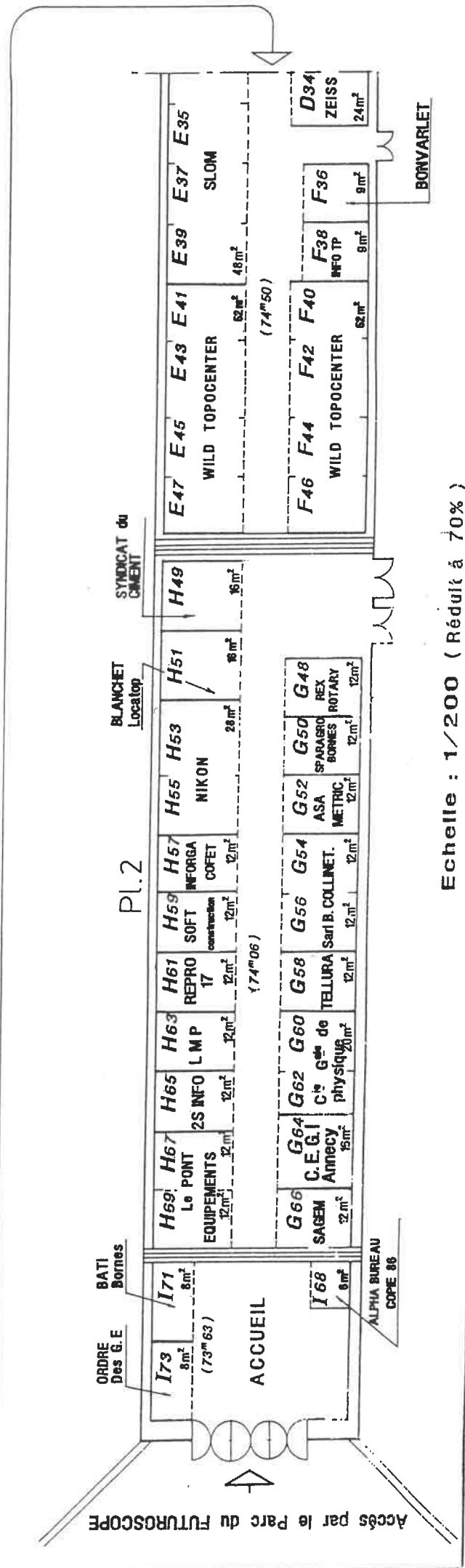
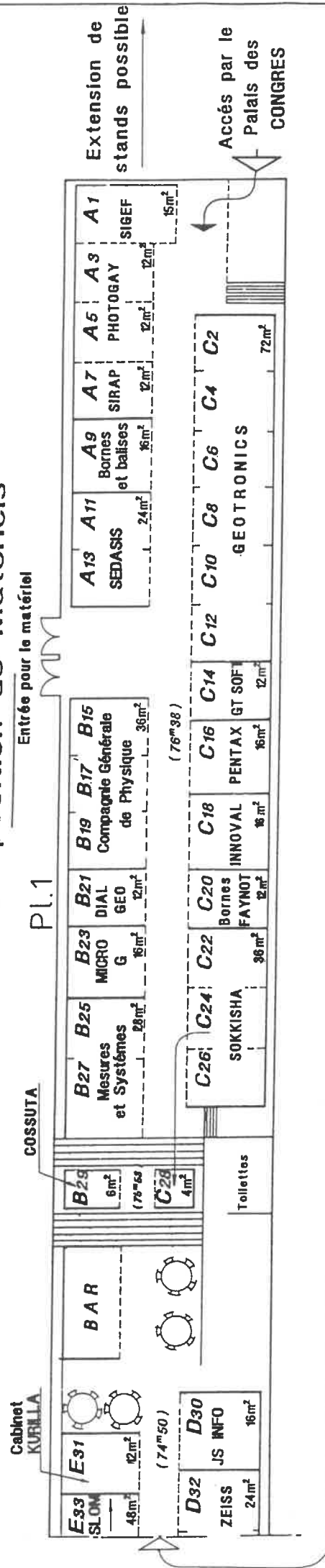
LISTE EXPOSANTS

AEROTOPO	MS 2 I MATRA
A.F.T	NIKON FRANCE SA
ASA METRIC	PENTAX
BLANCHET - LOCATOP	SAGEM
BORNES ET BALISES	SCHEU
CARL ZEISS	SERCEL
DIAL INFORMATIQUE	SETAM INFORMATIQUE
EQUIPEMENTS SCIENTIFIQUES	SIGEF
ESIC	SINTEGRA
EURECARD	SIRAP
GEOMESURE	SYNDICAT DES CIMENTS
GEOTOP	ET CHAUX
GEOTRONICS	SLOM ESSLOR
GIMEOR	SO CO PE MIN
INNOVAL	SOFT CONSTRUCT. S.A
JS INFO	SOKKISHA FRANCE SA
L.M.P. LE MATERIEL DE PRECISION	STAR INFORMATIC FRANCE
LE PONT EQUIPEMENT (STE)	TOPCOLOR
MESURES ET SYSTEMES SA	TOPO CENTER
MICROS G. DIFFUSION	WILD + LEITZ FRANCE

L'AFT remercie tous les exposants qui ont accepté de participer au 2^e CITOP.

PREMIERE EXPOSITION FRANÇAISE
de matériels et d'informatique appliqués
à la Topographie

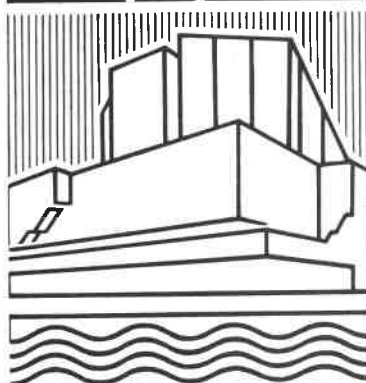
- Halle d'Exposition de Matériels -



Echelle : 1/200 (Rédult à 70%)



FEDERATION
INTERNATIONALE
DES GEOMETRES



XIX ème CONGRES

10 AU 19 JUIN, 1990

HELSINKI, FINLANDE

Le Pays du Soleil de Minuit!

Neuf Commissions Techniques
Les Expositions Commerciales et
des Associations Nationales
Excursions et Visites Techniques
Excursions et Voyages Avant et Après Congrès
Tours et Excursions
Programme Social

BIENVENUE EN FINLANDE – la fraîche alternative!

Pour information supplémentaire,
Veuillez contacter:

FIG 1990

Congress Management Systems
P.O.BOX 151
SF-00141 HELSINKI
tel. +358 - 0 - 175 355
fax. +358 - 0 - 170 122

Sciences géographiques, connaissance du monde et conception de l'Univers dans l'Antiquité

par Raymond d'HOLLANDER, ingénieur général géographe

2. SCIENCES GEOGRAPHIQUES DURANT LA PERIODE GRECQUE

CHAPITRE 2.

LA PREMIERE GEOGRAPHIE DES GRECS ECOLES GRECQUES DES 6^E ET 5^E SIECLES AVANT J.C.

INTRODUCTION

Vers 1600 avant J.C. les **Achéens**, venus du Nord, envahissent le Péloponnèse et créent autour des palais de leurs rois : à Mycènes, à Tirynthe, à Pylos une civilisation brillante, dont l'apogée se situe vers 1200 avant J.C., lors de la guerre de Troie. On lui donne en général le nom de civilisation Mycénienne, parce que c'est à Mycènes, dont le roi était Agamemnon, que les fouilles de l'Allemand Schliemann (1822-1890) ont révélé les vestiges les mieux conservés, en particulier les tombes d'Agamemnon et de Clytemnestre (voir fig. 2.1). Les Achéens s'imposent dans certaines îles de la Mer Egée, dont la Crète et ils établissent des relations commerciales avec Rhodes, Chypre, l'Asie Mineure, la Phénicie. Cette civilisation reçoit plusieurs assauts des envahisseurs Doriens, que les découvertes archéologiques récentes permettent de distinguer :



Fig. 2.1 Mycènes. Entrée de la tombe d'Agamemnon

❑ à la fin du 13^e siècle avant J.C. une première invasion ravage le Péloponnèse et incite les Achéens à renforcer leurs fortifications, notamment à Mycènes, Tirynthe, Pylos et même à Athènes.

❑ vers 1200 avant J.C. la Laconie et la Messénie sont ravagées,

❑ au début du 11^e siècle avant J.C. apparaît un renouveau : tombes individuelles, incinérations, céramiques géométriques.

A peu près simultanément, des populations se regroupent en Asie Mineure, dans des cités ioniennes telles que Milet, Phocée, Lesbos, Chios, Samos, Rhodes qui acquièrent une grande prospérité.

Au début du premier millénaire avant J.C. le bassin méditerranéen est sous l'influence non seulement de la Grèce des deux bords de la Mer Egée : Grèce continentale et Ionie, mais aussi sous celle de l'Etrurie, de l'Egypte, de la Phénicie qui possède de nombreux comptoirs : Gadès (actuellement Cadix), les colonnes d'Hercule (actuellement Gibraltar), ceux d'Afrique du Nord, principalement Carthage, ceux de Sicile occidentale et de Sardaigne.

C'est dans ce cadre que la Grèce va prendre un rôle prédominant en créant les colonies de Gaule méridionale, dont Massalia (Marseille), de Grande Grèce (terme qui désigne l'ensemble de l'Italie du sud et de la Sicile), de Cyrénaïque, d'Asie Mineure. La Grèce débordera du cadre méditerranéen proprement dit avec des colonies ioniennes du Pont Euxin (Mer Noire). Dans toutes ces régions elle fera rayonner sa culture pendant plusieurs siècles.

2.1 La première géographie des Grecs. La navigation des Argonautes, Homère, Hésiode

2.1.1 La navigation des Argonautes (1200 environ avant J.C.)

Le premier fait marquant dans l'histoire géographique des Grecs fut la navigation des «**Argonautes**». Rappelons le fond de la légende. **Jason** partit de Iolkos en Thessalie pour aller s'emparer de la Toison d'Or qui

se trouve au bord du Phase (rivière qui descend du Caucase), en Colchide, à l'extrémité orientale du Pont Euxin. Il amena avec lui 50 guerriers parmi lesquels la tradition cite Hercule et Orphée, le futur chantre de l'expédition. Le vaisseau s'appelant Argo, les membres de l'expédition prirent le nom d'Argonautes. Jason enlève la Toison d'Or et suivi de Médée, la fille du roi, prend le chemin du retour où après maintes péripéties il rejoint Iolkos. On place en général cette aventure vers 1200 avant J.C.. Il est vraisemblable que les Grecs qui avaient établi des comptoirs dans la Méditerranée centrale, éprouvèrent le besoin d'étendre leurs explorations à travers les détroits qui conduisent au Pont Euxin, pour y fonder des colonies ; ayant eu connaissance des gisements aurifères à l'embouchure du Phase, ils y auraient organisé une expédition, idéalisée par la suite par la fiction de la Toison d'Or. Le fond du récit concernant l'aller repose sur des descriptions géographiques précises dans les trois versions différentes de la Navigation des Argonautes, mais pour le retour les versions diffèrent profondément, la réalité fait place à la fiction.

Dans ce qu'on appelle le Peuso-poème orphique, les Argonautes au retour remontent le Phase, contournent l'actuelle Mer d'Azov, empruntent le Borysthème (Dniepr actuel) pour aboutir dans la Mer Hyperboréenne ou Cronienne (mer glacée). Il est fait une allusion très vague à l'île de Iernis, l'Erin des Gaëls, notre Irlande actuelle, figurée à côté du Sud de la Grande Bretagne sur la carte de la fig. 2.2 où Vivien de Saint Martin (Bibl 1) a représenté cette première version de la légende des Argonautes, en y matérialisant aussi les deux autres versions, ainsi que les lieux cités par **Homère** dans l'Odyssée et ceux du poète grec **Hésiode**. Les Argonautes empruntent ensuite le fleuve-océan pour revenir en Méditerranée, contournent la Corse par le nord, entrent en Mer Tyrrhénienne, longent la Sicile, où ils voient les feux de l'Etna, franchissent le gouffre de Charybde, évitent le rocher de Scylla. Pour la plupart des auteurs anciens Charybde et Scylla sont dans le détroit de Messine ; on sait que ces deux toponymes ont donné lieu à la fameuse expression : «tomber de Charybde en Scylla». Après avoir contourné le Péloponnèse, ils rentrent à Iolkos.

Vers 460 avant J.C. le poète grec **Pindare** indique qu'à leur retour de Colchide les Argonautes sont jetés dans «les mers océaniques qui forment la ceinture de la Terre» ; on croyait en effet à cette époque que la Mer Noire était reliée au grand océan circulaire, de sorte que sur la carte de la fig. 2.2, qui représente la Mer Noire selon sa forme actuelle, il faudrait l'ouvrir sur l'Océan circulaire, comme c'est fait d'ailleurs sur la carte de la fig. 2.3 : Homer's World. Les Argonautes traversent la Mer Erythrée, qui à l'époque désignait l'ensemble Mer Rouge - partie occidentale de l'Océan Indien, transportent leur navire Argo à travers les plaines de Libye, jusqu'àubord du lac Triton (à l'ouest de l'actuelle ville de Gabès en Tunisie) : ils traversent les golfes des Syrtes pour rentrer à Iolkos. L'un des descendants des Argonautes sera, d'après la tradition, le fonda-

teur de Cyrène (Cyrénaïque) et il est bon de préciser à ce sujet que cette ode de Pindare a été composée en l'honneur d'**Archésilas**, roi de Cyrène.

Quant à la 3e version, celle d'**Apollonius de Rhodes** (3e siècle avant J.C.) elle fait rentrer les Argonautes par le cours inférieur de l'Ister (Danube), qui dans la conception des anciens présentait une diffluence vers l'Adriatique. Le contournement du Péloponnèse s'effectue par une navigation semblable à celle de la première version.

2.1.2 La géographie d'Homère (9e siècle avant J.C.)

Une longue tradition qui s'est perpétuée chez les Anciens Grecs, leur fait placer **Homère** en tête de leurs géographes. Il est vrai que, dans les deux poèmes homériques l'Iliade et l'Odyssée, la connaissance et la description des lieux jouent un rôle important. On s'interroge sur le lieu de naissance d'Homère : en Egypte, à Smyrne ? Il aurait visité l'Espagne, l'Italie, l'île d'Ithaque, où il aurait pris connaissance de détails sur la vie d'Ulysse ; il serait revenu à Smyrne, où il termina l'Iliade. Il quitta Smyrne, erra dans plusieurs villes d'Asie Mineure en récitant ses vers, s'établit à Chio, où il ouvrit une école et où il composa l'Odyssée ; il y devint aveugle. Il serait mort à l'île de Ios, une des Sporades (actuellement Cyclades) et il aurait été enterré sur le rivage. Tous ces détails proviennent d'une «Vie d'Homère» apocryphe.

Selon certains auteurs il fut contemporain du siège de Troie vers 1250 avant J.C. ; pour d'autres il a vécu vers l'an 1000 avant J.C. ; d'après Larcher Homère serait né en 884 avant J.C.. On convient généralement de situer la vie d'Homère au 9e siècle avant J.C.

Certains auteurs modernes, ayant constaté une disparité dans les diverses parties dont se compose l'Iliade et l'Odyssée, les considèrent comme une suite d'ouvrages de différents auteurs. On a aussi mis en doute la trame historique sur laquelle repose l'épopée homérique, qui dans ce cas n'aurait été que le fruit de l'imagination d'un ou de plusieurs poètes Grecs. Mais les fouilles de Schliemann, déjà citées, à Troie d'une part, à Mycènes d'autre part, les fouilles de l'Ecole Allemande à Tirynthe prouvent la réalité de la civilisation Mycénienne et de la guerre de Troie, décrites dans les poèmes homériques.

L'Iliade

On considère l'Iliade comme une «vulgate», texte répandu en Grèce à l'époque où il fut apporté d'Asie Mineure, comme l'attestent les citations qu'ont fait de l'Iliade les écrivains Grecs des 5e et 6e siècles avant J.C.. De très bonne heure on y introduisit des variations en ce qui concerne le nombre de vers, mais ceux qui ont étudié en détail ces variantes reconnaissent entre elles une grande fixité du texte.

L'Iliade est consacré à la préparation de la guerre

Fig. 2.2 Les Argonautes. Homère. Hésiode

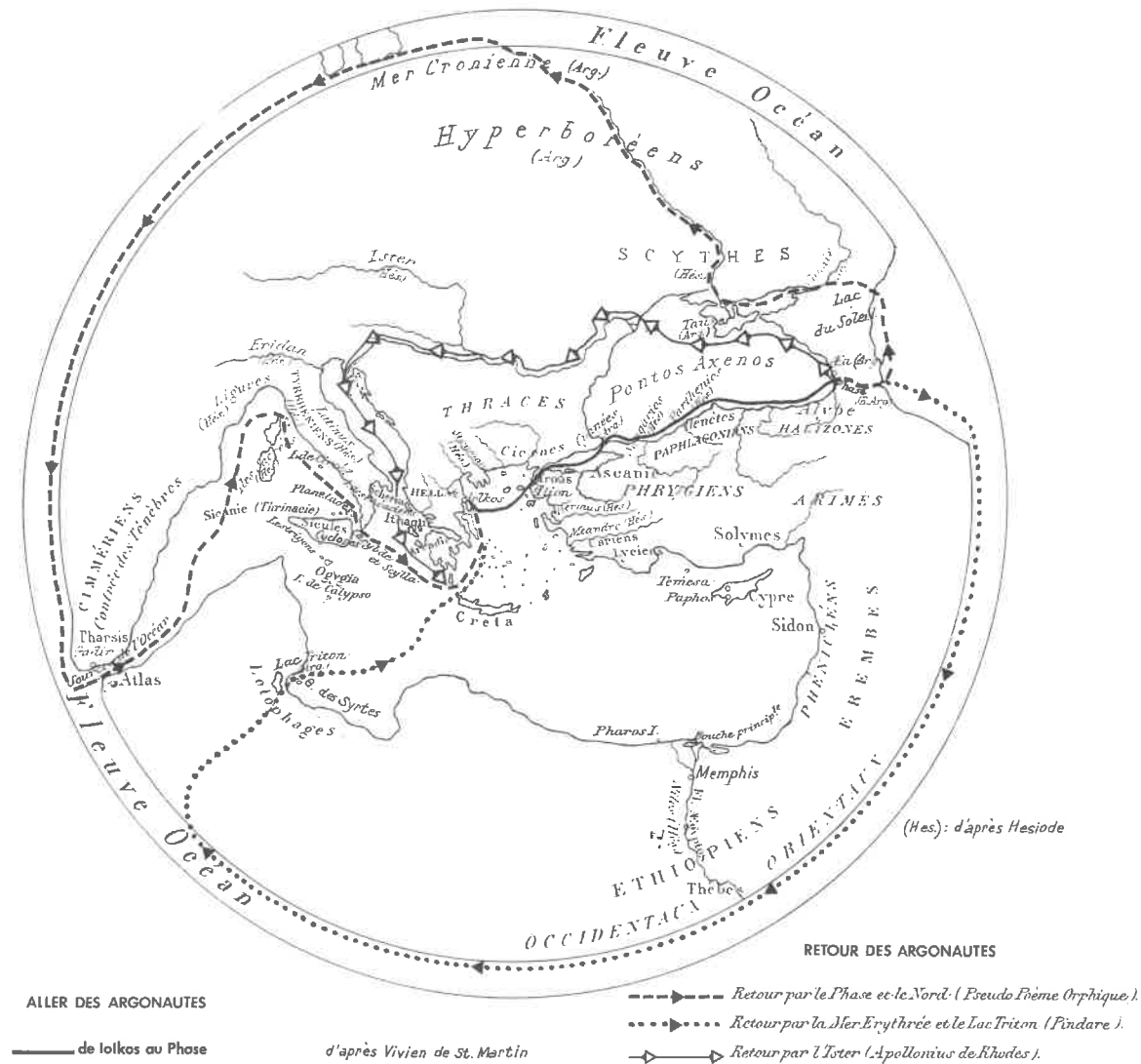


Fig. 2.3 Homer's World.

de Troie et aux diverses péripéties du Siègle de Troie, qui se termine par la mort d'**Hector**, tué par **Achille**.

Selon Vivien de St Martin (Bibl 1) «la géographie positive d'Homère appartient à l'Iliade, car ce poème contient des notions géographiques directes et précises, qui résultent du poète lui-même».

Pour Homère le monde est un disque enveloppé d'un fleuve-océan circulaire, concept qui franchira les siècles et subsistera au moyen-âge (voir fig. 2.3). Au milieu de ce disque : la Mer Egée, centre de la géographie de l'Iliade ; à droite l'Ionie et la Troade (royaume de Troie, dont le roi est **Priam**), à gauche le Peloponnèse et la Crète. Le fleuve-océan alimente la Méditerranée, mais aussi le Pont Euxin, comme nous l'avons déjà vu plus haut, les fleuves comme le Nil (non encore désigné sous ce nom par Homère).

Au nord «l'œcumène»(1) est limité par la Mer Cronienne, au sud de laquelle vivent les «Hyperboriens». Au sud l'œcumène se limite à Thèbes selon Vivien de St Martin ; selon la carte Homer's World (fig. 2.3) l'œcumène se prolonge au sud de Thèbes par la «région of the day» et le pays des Pygmées, non cités par Vivien de St Martin.

Pour Homère l'œcumène s'étend de la côte où le Soleil se couche (ouest), qui borde la contrée des Ténèbres et le pays des Cimmériens, à la côte où le Soleil se lève (est).

Au deuxième livre de l'Iliade on trouve le catalogue des vaisseaux appareillés pour la guerre de Troie ; Homère y énumère 28 petits royaumes de la Thessalie au Péloponnèse. L'Hellas ou la contrée des Hellènes n'est qu'un petit royaume de Thessalie où règne Pelée, père d'Achille. Ce n'est que plus tard que l'appellation d'Hellènes se généralisera à l'ensemble du peuple grec. Lorsqu'Homère veut désigner l'ensemble des Grecs réunis devant les murs de Troie, il utilise les noms d'Argéens (royaume d'Argos), de Danaïens (de Danaüs, fondateur d'Argos), d'Achéens.

L'énumération de l'armée grecque est l'occasion pour Homère de donner des renseignements géographiques, des tableaux de populations, des détails sur leurs mœurs.

Près du littoral N.O. de la Mer Egée, Homère cite l'Olympe, au nord duquel se trouvait la Pierie, dernier territoire qui, bien qu'appartenant à la Thrace, ait fourni des soldats à l'expédition de Troie. D'autres peuples de Thrace : les Pioniens et les Cicones (voir carte 2.2) servaient sous les ordres de Priam, roi de Troie. Au nord de la Thrace deux peuples sont mentionnés par Homère sous le nom d'Hippomol-

gues et d'Albiens, qu'**Hésiode** réunira sous le nom de Scythes (voir carte 2.2). Sur le littoral septentrional de la Mer Egée Homère cite le mont Athos et l'île de Lemnos.

L'Odyssée

On sait que l'**Odyssée** relate essentiellement les aventures d'**Ulysse**, depuis la fin du siège de Troie jusqu'au moment où il revient dans son royaume d'Ithaque, où l'attend sa fidèle épouse **Pénélope**. A l'opposé de l'Iliade, l'Odyssée, sans être totalement dépourvue de «géographie positive», comme dans la description de l'île d'Ithaque, «appartient surtout à la géographie légendaire» (Vivien de St Martin Bibl 1).

Dans l'**Odyssée** il est fait aussi état du retour de Troie de **Ménélas**, qui en 5 jours navigue de la Crète vers l'Egypte, dont Homère a une vue très sommaire. Il sait qu'elle est arrosée par un grand fleuve «l'Aegyptos» qui n'a d'autre nom que le pays lui-même (voir carte 2.2) ; à une journée de navigation en avant de ce fleuve il y a une île appelée Pharos (le futur Phare d'Alexandrie) ; au 13e siècle avant J.C. le Nil dessinait un golfe profond et l'île de Pharos devait se trouver à une journée de navigation de l'embouchure orientale, qui était la principale du Nil. Homère prête à Ménélas les paroles ci-après (Bibl 1) «j'ai erré sur les rivages de l'île de Cypré (Chypre), de la Phénicie et de l'Egypte, je suis allé jusque chez les Ethiopiens, les Sidoniens et les Erembes» (voir carte 2.2). Ailleurs les Ethiopiens sont cités comme étant « les plus reculés des hommes».

Homère donne des détails sur la côte d'Asie Mineure depuis la Troade jusqu'à la Lycie (voir Lyciens sur la carte 2.2). Il cite les montagnes ardentes des Arimes, où l'on peut reconnaître l'actuelle chaîne du Taurus. Dans l'intérieur de l'Asie Mineure habitent les Phrygiens. Sur la côte nord de l'Asie Mineure ou côte sud du Pont Euxin, il nomme deux peuples : les Paphlagoniens (région des Henètes) et les Halizones du pays d'Alybe, «où naît l'argent» (Bibl 1).

Au livre V **Ulysse** entre en scène. Il est dans l'île d'Ogygie, demeure de la nymphe Calypso dont il réussit à ne se libérer qu'au bout de sept ans. Après une terrible tempête il est jeté sur une plage de l'île de Scheria, ou île des Phéaciens. Là il rencontre Nausicaa la fille du roi et lui raconte ses aventures chez les Lotophages (pays des fruits délicieux), sa rencontre avec les Cyclopes (géants à un seul oeil frontal), avec les Lestrygons anthropophages, son séjour chez la magicienne Circé qui change beaucoup de ses compagnons en pourceaux ; il fait un séjour aux Enfers, puis il aborde au pays des Cimmériens, à l'île d'Eole, il entre dans la Mer des Syrènes, passe Charybde et Scylla, atteint l'île de Trinacie (l'île aux trois pointes) où Ulysse et ses compagnons attirent la colère des dieux en massacrant les troupeaux d'Hélios. C'est de là qu'il rejoint l'île d'Ogygie, puis celle de Scheria, où commence le récit fait à Nausicaa.

(1) On désigne par «œcumène» la partie du monde habitée connue des Grecs.

Avec l'aide de la «Paulys Realencyclopädie der Klassischen Altertumswissenschaft» (Bibl 2), où il y a un long article consacré à l'Odyssée, essayons d'identifier les lieux où se passe l'action du récit.

Pour l'île d'Ogygie sont données 15 localisations émanant de divers auteurs antiques ou modernes, qui sont cités, mais dont nous ferons grâce de l'énumération au lecteur :

entre la Grèce et Cythère - deux îles du littoral crétois - îles dans la Mer Egée - dans la Mer du Nord - sur la côte italienne - sur la Mer des Arvernes - face au cap Laknion (capo Colonna) au sud de Crotone - une localisation de Plin - Malte - l'île de Gomera dans les Canaries - près de Madère - l'île Pérégil en face de Gibraltar - les rochers mêmes de Gibraltar - dans les environs de Ténérife.

Pour l'île des Phéaciens ou île de Scheria il y avait une quasi-unanimité dans l'antiquité pour Corfou ou Kerkira, ressemblant à Scheria. Les recherches récentes confirment en général cette hypothèse, mais certains auteurs divergent et citent : la Crète, Rhodes, l'île d'Ischia près de Naples, Kélibia au S.E. de Carthage, Gadès, la côte andalouse et à l'ouest de Gibraltar : Garacchio au pied du pic de Ténérife.

Pour le pays des Lotophages la même encyclopédie énumère 9 localisations : île de Djerba, côte nord africaine entre les deux Syrtes (version de la carte 2.2 de Vivien de St Martin), près de la petite Syrte, près de la grande Syrte, au Cap Bon, en Sicile, en Libye, sur la côte marocaine, en Arabie du sud.

Pour l'île des Cyclopes sont cités des lieux en Sicile, en Mer Egée, à Malte, l'île de Nisida (l'île aux chèvres), près du littoral de Pozzuoli aux environs de Naples, un lieu en Libye, un près de Carthage, un autre à Tunis même, enfin un près du cap Gardafoui.

Le pays des Lestrygons (ou Lestrigons) est en général situé en Sicile, le lieu de séjour de Circé au Cap Circé, à mi-distance environ entre Rome et Naples. L'île d'Eole est localisée soit dans l'île de Stromboli, soit dans l'île Egade à l'ouest de la Sicile.

L'île des Sirènes est située soit dans les environs de Sorrente, soit à Naples, soit en Sicile au pied de l'Etna (localisation donnée par Eratosthène), dans la baie de Tanger, près des îles Canaries et plus particulièrement à Gomera.

Si la plupart des auteurs anciens situent Charybde et Scylla dans le détroit de Messine, des études toponymiques permettraient de les situer ailleurs ; d'après la table de Peutinger un rocher du Pont Euxin porte le nom de Scylla ; il y aurait un Charybde entre Apamée et Antioche dans l'angle nord-est de la Méditerranée, un autre près de Ceuta. On a pensé aussi à Gibraltar, à la pointe N.O. de Ténérife et même aux îles Scilly (Iles Sorlingues) en face du Cap Land's End qui termine le Plateau de Cornouailles.

L'île d'Hélios est d'après l'Illiade proche de la Trinacie (ou Trinacria), l'île aux trois pointes, que l'on considère généralement comme étant la Sicile, mais certains auteurs l'ont identifiée avec le Péloponnèse, qui a aussi trois pointes. On a proposé aussi l'île de Lampéduse au sud de Malte etc...

Le caractère mythique de l'Odyssée est indubitable ; on admettait dans l'Antiquité qu'Homère avait volontairement mêlé réalité et fiction. La réalité se trouve dans la description des paysages, dans le réalisme avec lequel sont dépeints les dangers de la navigation ; le mythe réside dans le caractère fabuleux des personnages que rencontre Ulysse : nymphes, sirènes, cyclopes, etc...

On remarquera que la quasi totalité des lieux cités par Homère dans l'Odyssée sont des îles. En raison de la difficulté de les localiser en longitude, par suite des dangers de leur abordage ou de leur situation très éloignée, on a attribué aux îles, aussi bien dans l'Antiquité qu'au Moyen Age un caractère mythique ou imaginaire.

Ce fut le cas dans l'antiquité pour l'île de Thulé, limite septentrionale de l'oecumène, pour l'île de Panchaia, face à la côte d'Arabie, aux confins sud-est de l'oecumène ; au Moyen Age ce seront les îles sacrées de l'océan occidental, îles imaginaires parcourues par Saint Brendan et ses moines, les «îles enchantées» de Melville, etc...

Les sciences géographiques chez Homère

Outre les descriptions des lieux, on trouve dans l'épopée homérique des observations météorologiques concernant les températures, la formation des nuages, le régime des vents, les conditions de précipitations, les effets de la fonte des neiges sur le débit des rivières, les orages.

On y trouve aussi des renseignements d'ordre scientifique, dont certains intéressent les sciences géographiques. On y prend connaissance des unités de longueur des Grecs de cette époque :

- la coudée (pygon)
- la brassée (orgyia)
- le peuthron (ou plethron) égal à 100 pieds

les grandes distances sont évaluées en fonction du temps parcouru : l'unité est la distance parcourue en un jour.

On relève que les anciens Grecs délimitaient géométriquement leurs propriétés ; c'est ainsi qu'Homère écrit dans l'Illiade : «Pour des bornes, deux hommes, mesures en main se querellent dans une terre à délimiter et sur un étroit espace se disputent pour établir l'égalité des lots» (Bibl 3).

Homère a aussi observé le ciel. Il cite les Pleïades, le «Bouvier lent à se coucher» l'ourse ou le chariot, les Hyades, le chien d'Orion, Hesperos

l'étoile du soir et l'étoile du matin. Les Grecs devront attendre Pythagore pour savoir que ces deux étoiles ne constituent qu'un seul astre : la planète Vénus. Homère évoque aussi l'étoile d'Automne, qui semble être Sirius.

2.1.3 Hésiode

La géographie d'Homère sera complétée par **Hésiode**, poète grec du milieu du 8^e siècle avant J.C. . Né à Ascrea en Béotie, Hésiode vécut la vie rude des paysans béotiens. Son œuvre principale fut la «**Théogonie**», où les notions de géographie générale ne diffèrent pas essentiellement de celle d'Homère, mais on trouve dans l'œuvre d'Hésiode des toponymes et surtout des hydronymes nouveaux par rapport à ceux d'Homère. On dénombre 25 noms de fleuves ou rivières dont la moitié appartient à l'angle N.O. de l'Asie Mineure. Parmi les hydronymes, citons : le Nil, l'Ister, le Strymon, l'Eridan, qui correspond vraisemblablement à Rhodanus (Rhône), plutôt qu'au Pô, selon la carte 2.2 de Vivien de St Martin (Bibl 1).

On trouve aussi mention des «îles sacrées» situées en Mer Tyrrhénienne et qui correspondent peut-être à la Corse et à la Sardaigne. Hésiode connaissait aussi les Ligures, peuple vivant entre la Tyrrhénie et les Pyrénées. Les principales appellations introduites par Hésiode sont indiquées par l'abréviation (Hes) sur la carte 2.2 de Vivien de St Martin.

2.2 «L'Ecole Ionienne»

L'Ionie, en Asie Mineure, avec sa capitale intellectuelle Milet, va être à partir du 6^e siècle le foyer d'une civilisation brillante. On parle souvent à ce sujet «d'Ecole Ionienne», mais faisons remarquer qu'ici le mot «Ecole» désigne seulement une certaine convergence de vues en ce qui concerne les problèmes philosophiques et scientifiques, résultant de l'influence qu'ont eu les premiers philosophes ioniens sur leurs successeurs ; il n'y eut en fait de rapports de maître à disciples comme dans les autres écoles grecques. «L'Ecole Ionienne» se développa essentiellement durant le 6^e siècle avant J.C.. Ce siècle qui vit la fin de la colonisation grecque fut fondamental pour l'histoire de l'humanité ; outre celui des philosophes ioniens, le 6^e siècle fut aussi le siècle de **Bouddha**, de **Confucius** et de **Lao-Tsé** (ou Laozi), le père du taoïsme.

2.2.1 Thalès de Milet (625 - 547)

Le premier philosophe ionien fut **Thalès de Milet**, qui introduisit en Grèce la géométrie abstraite et qui fut en outre astronome et physicien.

En tant qu'astronome **Thalès** est surtout célèbre par la prédiction d'une éclipse de Soleil qui mit fin à la guerre entre les Médes et les Lydiens, totalement effrayés par le phénomène. Voici ce que dit **Hérodote** à ce sujet : «Il arriva que le jour se changea soudainement en nuit, changement que Thalès, le

Milézien, avait annoncé aux peuples d'Ionie, en assignant pour limite à sa prédiction l'année dans laquelle ce changement eut lieu en effet».

On voit par là que Thalès n'avait annoncé ni le mois, ni le jour de l'éclipse, ni l'endroit d'où elle serait visible. **Paul Tannery** (Bibl 9) indique la date du 30 septembre 610 avant J.C. pour cette éclipse et suppose que Thalès aurait utilisé le «saros babylonien» de 223 lunaisons (18 ans 10 jours 8 heures) pour cette prédiction. Mais plus récemment **Hind** a pu reconstituer la date de l'éclipse : 28 mai 585 avant J.C. et son calcul a montré que la «ligne de totalité» passait bien à l'endroit où aurait eu lieu la bataille. Quant à la période dite du «saros babylonien», elle a été rapportée par **Suidas**, lexicographe grec du 10^e siècle de notre ère ; or Suidas n'était pas du tout astronome et ses travaux de compilation sont souvent sujets à caution. D'après **Neugebauer** (Bibl 14) l'astronome anglais **Edmond Halley**, suivant probablement Suidas, a attribué ce cycle à tort aux Babyloniens. L'utilisation d'un soi-disant Saros par Thalès n'est que pure légende.

Considérons une position déterminée du Soleil S, de la Lune L par rapport à un noeud de son orbite (fig 2.4). Au bout de 223 lunaisons le triangle NLS reprend la même grandeur et l'écart de la Lune par rapport à son mouvement moyen reprend la même valeur.

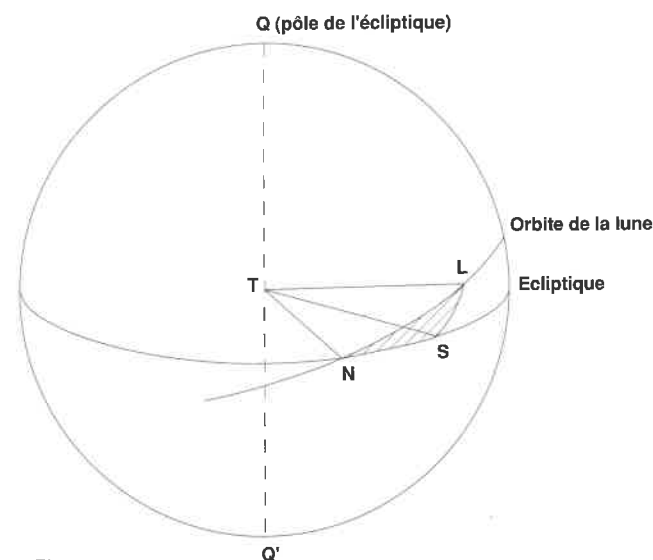


Fig. 2.4

Grâce à cette quadruple concordance le cycle de 223 lunaisons assure la prédiction des éclipses avec une remarquable régularité. Mais ni Thalès, ni les astronomes babyloniens ne connaissaient ce cycle et nous avons vu en 1.2 que ces derniers n'avaient pas obtenu de résultats valables dans la prédiction des éclipses de Soleil à longue échéance.

Le schéma de la fig 2.5 rappelle à gauche le principe d'une éclipse de Soleil ; celle-ci implique que la Lune soit à la fois en position de nouvelle Lune et sur l'alignement Terre-Soleil ou très près de cet ali-

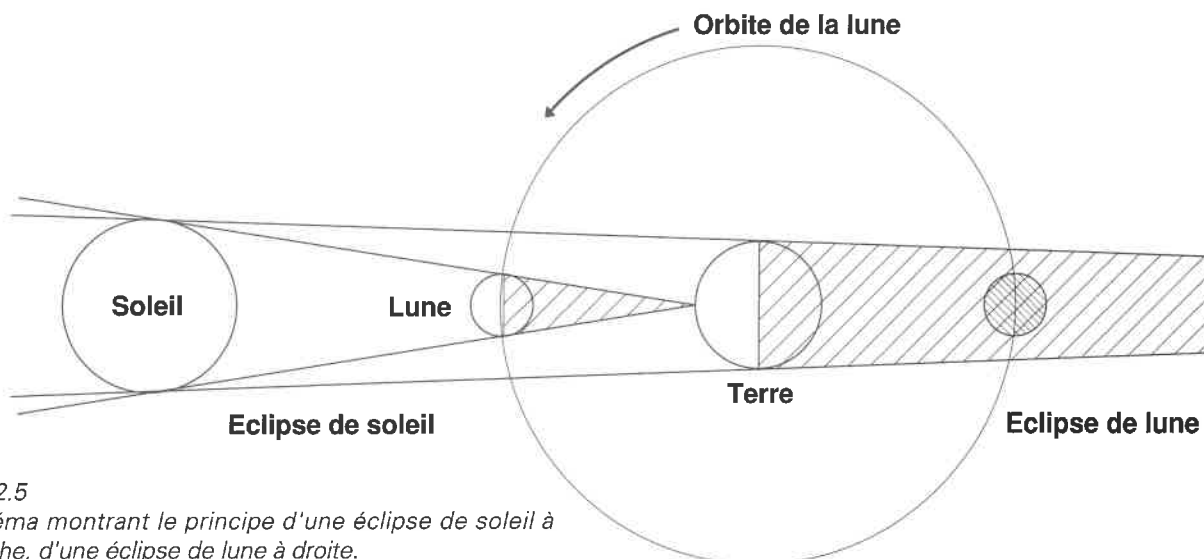


Fig. 2.5
Schéma montrant le principe d'une éclipse de soleil à gauche, d'une éclipse de lune à droite.

gnement, donc près de l'écliptique et près d'un noeud de l'orbite. On montre qu'il y a sûrement éclipse de Soleil lorsque la latitude écliptique de la Lune, en position de nouvelle Lune, est inférieure à $1^{\circ}24'$. D'après **Neugebauer** (Bibl. 14) les Babyloniens arrivaient à prévoir quelque temps à l'avance la possibilité d'une éclipse de Soleil en observant la latitude écliptique de la Lune peu avant la nouvelle Lune. On peut penser que Thalès a opéré de même pour prédire son éclipse de 585 avant J.C. ; il n'avait pas du tout les moyens de déterminer le jour et le lieu où une éclipse pouvait avoir lieu et il a dû probablement indiquer qu'une éclipse était possible quelque part à un certain moment avant la fin de l'année 585 ; c'est bien ce que dit Hérodote.

Toutefois on peut déduire de cette prédiction que Thalès avait vraisemblablement compris la cause des éclipses de Soleil, mais il n'y a aucun écrit à ce sujet et on considère généralement **Anaxagore** (voir n° 2.5.2) comme ayant le premier expliqué les phénomènes des éclipses de Lune et de Soleil. Thalès aurait déterminé le diamètre apparent du Soleil en utilisant une clepsydre, avec laquelle il mesura le temps que met le Soleil à se lever ou à se coucher. Il aurait attribué à ce diamètre apparent la valeur de $1/720$ de circonférence, soit $1/2$ degré (valeur moderne moyenne $32'$ environ). Alliant ses qualités de géomètre et d'astronome Thalès avait défini sur la sphère céleste : l'équateur, les tropiques, les cercles polaires, le méridien et l'écliptique, mais il faudra attendre **Cenopidès** (voir n° 2.3.2.2) pour avoir une valeur correcte de l'obliquité de l'écliptique. La considération de ces cercles astronomiques sur une sphère céleste aurait du impliquer en toute logique une Terre sphérique, concept qui est pourtant resté étranger à toute l'Ecole Ionienne. On retrouve une contradiction analogue durant le Moyen Age où l'on s'accommode fort bien de la coexistence d'un ciel sphérique, d'orbites planétaires circulaires et d'une Terre plate.

Thalès admettait deux Hyades alors qu'après lui on en dénombrera 7, dessinant un V au voisinage

d'Aldébaran. Il aurait déterminé par rapport au pôle la position des étoiles de la petite ourse, que les Phéniciens utilisaient en mer pour s'orienter.

Par suite de la précession des équinoxes le pôle céleste se déplace parmi les constellations. A l'époque de Thalès ce n'était pas l'actuelle étoile polaire : α Ursae Minoris qui était la plus proche du pôle, mais β Ursae Minoris et encore cette étoile était-elle éloignée du pôle de plus de 8° . En 370 après J.C. α et β Ursae Minoris furent à la même distance du pôle et depuis cette date α Ursae Minoris devint l'étoile polaire.

Thalès aurait été l'auteur d'une «anthologie nautique», que d'autres historiens attribuent à **Phocus de Samos**, et d'un ouvrage «sur le solstice et l'équinoxe», où il aurait mis en évidence l'anomalie du Soleil en longitude et l'inégalité des saisons, mais cela paraît assez improbable ; aucun des deux écrits n'est parvenu jusqu'à nous.

En ce qui concerne la constitution de l'Univers, Thalès croit que le matériau de base est l'eau, puisque toutes les choses naissent de l'humide, l'air étant de l'eau évaporée. L'humidité est source de vie puisqu'elle est nécessaire à la germination des plantes. Aussi l'Univers est-il une gigantesque masse liquide qui renferme une grosse bulle d'air hémisphérique. La surface concave de cette bulle est le ciel. Les astres flottent sur les eaux supérieures, leurs mouvements obéissant à des lois mystérieuses. Quant à la Terre, elle a la forme d'un cylindre et elle flotte sur les eaux inférieures comme un bouchon de liège, ce qui explique toutes les perturbations du sol : tremblements de terre, éruptions volcaniques et les perturbations de l'atmosphère : vents.

Lors d'un séjour en Egypte les prêtres demandèrent à Thalès de mesurer la hauteur d'une pyramide. Voici comment il procéda (fig 2.6). Lors de la culmination du Soleil en période d'hiver, l'ombre de la pyramide se projette en E sur le sol. La pyramide étant orientée nord-sud, la longueur de l'ombre est :

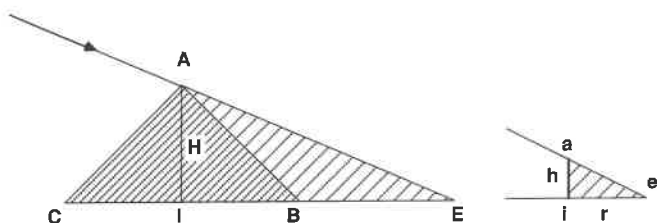


Fig. 2.6

$IE = IB + BE$, où IB est la moitié de la base de la pyramide, BE la portion d'ombre extérieure à la pyramide.

Par ailleurs Thalès disposa une tige verticale ia de hauteur h connue, dont il mesura au même instant la longueur de l'ombre ou «retrait» : $r = ie$

La similitude des deux triangles rectangles AIE et aie permet d'écrire la relation :

$$\frac{H}{IE} = \frac{h}{ie}$$

De cette relation Thalès déduisit la hauteur H cherchée.

2.2.2 Anaximandre (610 - 547)

Le second philosophe ionien fut **Anaximandre** ; des textes antiques lui attribuent la construction du premier cadran solaire en Grèce, à Lacédémone (Sparte). S'agit-il d'un cadran plan ou d'un cadran sphérique, réplique du «polos» babylonien et appelé aussi «scaphé» en Grèce ? **P. Tannery** (Bibl 9) admet la deuxième solution et il imagine même que la demi-sphère du scaphé comprenait une sphère toute entière, concentrique au scaphé, formée d'une armature métallique rigide, à travers laquelle on pouvait examiner le réseau des courbes tracées sur le scaphé (se reporter au 1er article 1.2.1.2). Sur cette sphère étaient reportés l'écliptique et un certain nombre d'étoiles. On calait la sphère intérieure par rapport au scaphé en observant l'instant précis où une étoile se levait à l'horizon : à cet instant on tournait la sphère intérieure mobile autour de l'axe du monde du scaphé jusqu'à ce que l'étoile homologue de l'étoile observée soit elle-même à l'horizon du scaphé et on imprimait à la sphère mobile un mouvement de rotation uniforme pour qu'elle effectue un tour complet en 24h. L'écliptique de la sphère mobile était divisé en signes et fractions de signe du zodiaque, de sorte qu'on pouvait y situer le Soleil d'après le jour de l'année. Le degré où se trouvait le Soleil jouait durant la nuit le même rôle que l'ombre de l'extrémité du style pendant le jour et l'on pouvait ainsi grâce au scaphé, non seulement déterminer les heures de jour, mais encore les heures de nuit.

On attribue aussi à Anaximandre l'invention de la «sphère armillaire» et du «globe céleste» sur lequel

étaient reportées toutes les constellations. Nous y reviendrons à propos de **Ptolémée**.

Le Système d'Anaximandre.

Pour Anaximandre l'Univers est infini ; son matériau n'est aucune des formes connues de la matière, mais il est d'une substance sans propriétés définies et indestructibles : «l'**apeiron**», ce qui signifie infini en grec. «L'**apeiron**» contient en lui-même les contraires (tels que le chaud et le froid, le sec et l'humide). Le mouvement le plus saillant de l'univers est le mouvement de révolution diurne ; dans celui-ci les corps les plus denses se portent au centre, les plus légers à la périphérie : la Terre et l'eau qui l'entoure nous apparaissent au centre, tandis que les astres brillent au delà de l'air que nous respirons. La chaleur est liée au mouvement et le froid à l'immobilité. Notre Terre, avec l'atmosphère qui l'enveloppe était à l'origine une sphère creuse, qui s'était enflammée et qui s'était formée comme l'écorce autour d'un arbre, mais la force centrifuge l'a brisée en couches successives et celles-ci, enveloppées par l'air entraîné dans l'explosion, se sont réduites à des anneaux concentriques. A l'intérieur de chaque anneau sont les parties de l'air les plus dilatées et les plus ténues, mais les parties les moins mobiles s'en sont séparées et se sont réunies en masse pour former une couche épaisse matérialisant une forme de fourreau enroulé en cerceau. A l'intérieur de chaque anneau circulent des vents qui engendrent ceux de notre atmosphère. S'il y a une ouverture dans l'anneau, le vent si précipite violemment et jaillit hors de l'anneau sous forme de flammes, qui nous apparaissent comme un astre.

Lorsque l'air enfermé dans un nuage parvient à le déchirer brusquement nous voyons un éclair ; un astre n'est en somme qu'un éclair qui durerait toujours.

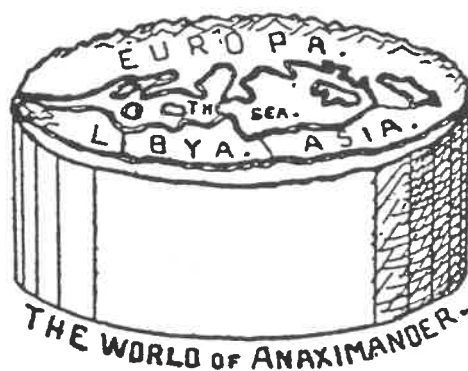


Fig. 2.7

La Terre est une colonne cylindrique (fig. 2.7) dont le diamètre est le triple de la hauteur ; elle est environnée d'air et se maintient au centre de l'univers par l'égale attraction de tous les éléments qui l'entourent. La base supérieure du cylindre est la Terre habitée. Le cylindre terrestre ϕ , presque un

91

tution de la carte d'Hécatée d'après divers auteurs modernes. L'Asie et la Libye (Afrique) ne forment qu'un seul continent bordé par le fleuve-océan, qui relie la Mer Rouge, le Golfe Persique et la Mer Caspienne, qui apparaît sous forme d'un golfe. Une seule chaîne de montagne assez courte confond Pyrénées, Massif Central et Alpes. Très curieusement l'Ister (le Danube) présente une difffluence vers l'Adriatique. Plus d'un siècle plus tard **Hérodote** et **Aristote** feront sortir l'Ister des «Monts Pyréne».

D'après les témoignages d'Hérodote et d'**Aristote**, des cartes ioniennes, analogues à celle d'Hécatée, et ayant dû subir ce qu'on appelle aujourd'hui des mises à jour, circulaient de leur temps. **Alexandre le Grand** lui-même s'y référait lorsqu'il imaginait que l'Indus pouvait constituer le cours supérieur du Nil. On sait aussi que vers 500 avant J.C. le Milésien **Aristagoras** emporta avec lui à Lacédémone (Sparte) une carte gravée sur cuivre, sur laquelle figuraient les contours de la Terre, de la mer et des fleuves.

Pour dresser leurs cartes, Hécatée et ses successeurs disposaient essentiellement de renseignements issus d'explorations maritimes, qui obéissaient, soit à des impératifs politiques et économiques, soit seulement au besoin de découvertes qu'ont toujours manifesté les Grecs. Les marins ne faisaient guère que longer les côtes en prenant des renseignements sur celles-ci, leurs ports, les distances en journées de navigation entre les points principaux. Ces renseignements étaient rassemblés en des sortes de guides, désignés sous le nom de «**périple**», mais on a pris l'habitude d'utiliser le même vocable pour le circuit de navigation lui-même. Voici les plus importants de ces «périples» au 6e et 5e siècles avant J.C.

□ Vers 630 avant J.C. des Grecs de Crète et de Théra fondèrent Cyrène, sur le littoral de Libye. A Cyrène aboutissaient les voies caravanières de l'Égypte par l'oasis de Siwah, du Soudan et de Carthage.

□ Vers 600 avant J.C. on cite le «**périple de Necho II**», roi d'Égypte, battu en 605 par **Nabuchodonosor**, et qui organisa un circuit partant du golfe arabique (Mer Rouge), longea les côtes d'Afrique orientale, contourna le cap et rentra en Méditerranée par les colonnes d'Hercule (détroit de Gibraltar). Les navigateurs, qui étaient Phéniciens, relâchaient sur les côtes africaines pour semer et moissonner de sorte que le périple dura trois ans. Du Sénégal à Gibraltar la navigation à voile est quasi-impossible, à cause des alizés du nord-est soufflant parallèlement à la côte sans interruption, de sorte qu'on a émis l'hypothèse que les navigateurs seraient revenus par voie de terre en empruntant la «route des chars» du Sénégal au sud oranais.

□ Vers 530 avant J.C. eut lieu le «**périple d'Euthymène**». Ce Massaliote (donc originaire de Mas-

salia, colonie phocéenne, actuellement Marseille) pénétra dans l'Atlantique et longea la côte africaine. On sait seulement qu'il alla jusqu'à un fleuve peuplé de crocodiles et d'hippopotames, sans doute le Draa. Cette découverte donna naissance à une théorie, selon laquelle ce fleuve était relié au Nil, qui comprenait la même faune, et à l'explication de la crue du Nil par l'invasion de l'océan dans le lit du fleuve.

□ Vers 510 avant J.C. aurait eu lieu le «**périple de Scylax**» ou de la «Mer Erythrée», ordonné par Darius pour établir une liaison Inde Méditerranée. Scylax, après une navigation dans l'Océan Indien et la Mer Rouge, utilisa le canal des Pharaons, qui reliait la Mer Rouge et la Méditerranée par l'Égypte.

Il y eut au 4e siècle avant J.C. un autre périple qui porte le nom de Scylax et qui amena ce navigateur à sortir de la Méditerranée pour atteindre comme **Hannon** (voir ci-après) l'île de Cerné. Certains détails corroborant ceux du périple d'Hannon, l'existence de ce périple a été contesté et on le désigne souvent sous le nom de «**Pseudo-Scylax**».

□ Entre 500 et 450 avant J.C. se serait situé le «**périple d'Hannon**», amiral carthaginois. Celui-ci explora les côtes ouest africaines avec pour mission d'y créer des colonies, mais le chiffre de 30 000 colons qui seraient partis avec Hannon paraît aux yeux de certains historiens peu vraisemblable. Après avoir franchi les colonnes d'Hercule, il aurait longé la côte de Méliata, franchi le cap Bojador et serait parvenu jusqu'à l'île de Cerné (actuellement île Hierné au large du Sahara occidental). Hannon continua son voyage jusqu'à un lac, puis à un grand fleuve rempli de crocodiles et peuplé d'hippopotames, il s'agit vraisemblablement de l'oued Draa (voir ci-dessus le périple d'Euthymène), mais des commentateurs modernes l'ont considéré comme un fleuve équatorial.

Avant de retourner à Carthage, Hannon décida de procéder à une exploration plus complète et il parvint à «un grand golfe que les interprètes nous disent s'appeler la Corne de l'occident. Dans ce golfe se trouvait une grande île et dans l'île une lagune qui renfermait une autre île».

Des auteurs modernes ont supposé que le grand golfe était celui de Guinée et la grande île celle de Fernando Poo à l'ouest de Douala (Cameroun). Devant une telle interprétation d'autres auteurs ont été amenés à nier l'existence du périple d'Hannon.

Il semble plutôt que le golfe en question soit le golfe hespérien et que la grande île soit celle de Fuerteventura, l'une des Canaries, car il existait selon M. Schmitt une lagune comprise entre les deux flèches littorales du tombolo, reliant l'île de Jandia à l'extrémité méridionale de Fuerteventura.

Après avoir débarqué sur cette île, les navigateurs appareillèrent en hâte, effrayés par des feux et

des bruits ; ils longèrent une contrée où «de très grands ruisseaux ardents sortaient et se jetaient dans la mer. La Terre était incandescente du fait de la chaleur». Il s'agirait de l'île volcanique de Lanzarote située au nord-est de Fuerteventura. Pour s'écarter des éruptions de Lanzarote la flotte aurait fait cap vers le sud en laissant Ténérife à sa droite et en cotoyant à gauche l'île de Gran Canaria. Les équipages mirent pied à terre dans l'île des Gorilles, où d'après Pline les corps des femmes sont velus. Là Hannon mis un point final à son voyage par manque de vivres.

2.2.4 Autres philosophes ioniens.

2.2.4.1 Anaximène (fl vers 545 avant J.C.)

Après **Anaximandre** nous trouvons **Anaximène**, qui reconnaît l'air comme principe universel : il lui conserve l'épithète «d'apeiron», qu'avait utilisé Anaximandre.

Quand l'air se dilate suffisamment il produit le feu, quand il se condense se forme l'eau ; à un degré de plus on aboutit à la terre et finalement aux pierres. L'air est «apeiron» en tant qu'il remplit l'espace continu, sans limitation intérieure, mais il ne s'ensuit pas que l'air soit illimité.

Anaximène considère le firmament comme une voûte solide en une sorte de cristal, sur laquelle les étoiles sont fixées comme des clous, conception qui subsistera dans la cosmologie du Moyen Âge. A l'intérieur, flottant au milieu de l'air et emportés par un tourbillon général, on trouve par ordre d'éloignement de la Terre : la Lune, le Soleil, les cinq planètes qu'Anaximène est le premier grec à reconnaître comme mobiles parmi les étoiles, enfin la sphère des fixes : celle des étoiles. Le progrès scientifique est certain car les étoiles fixes, que **Thalès** devait placer à la même distance de la Terre que les autres astres et qu'Anaximandre plaçait entre la Terre et la Lune, sont rejetées aux confins de l'Univers. Il suppose que le Soleil et la Lune ont :

- la forme d'un disque très plat,
- une face lumineuse et une face obscure.

Comme chez Anaximandre il y a un échange continu de matière : du ciel à la Terre : pluie, grêle, neige et de la Terre au ciel : vapeurs aériformes et humides susceptibles en s'élevant d'arriver à l'incandescence et de former le Soleil, la Lune et les planètes. Une partie des vapeurs se solidifie dans la voûte du firmament, mais tout l'air n'y reste pas emprisonné : une partie se dégage en se dilatant et c'est ainsi que s'alimentent les feux des étoiles. Dans l'espace céleste circulent en outre des corps invisibles, de nature terrestre.

Comme le Soleil et la Lune, les planètes ont la forme de disques plats. Les orbites des astres sont circulaires parce que la résistance de l'air courbe leurs orbites.

La Terre est un disque plat incliné vers le nord,

ce qui expliquerait la disparition des étoiles non circumpolaires pendant une partie du mouvement diurne.

On croyait au 6^e siècle que c'étaient les étoiles qui par leurs influences déterminaient à la fois les changements de saison et les variations météorologiques. Anaximène combattit la première erreur, mais non la seconde. D'autre part en l'absence d'un calendrier solaire à jours fixes, qui ne sera adopté que sous **Jules César**, la vie agricole était réglée d'après les levers et les couchers héliaques des étoiles (voir au n° 1.2 la définition du mot héliaque); c'est ainsi qu'on commençait les vendanges lors du lever héliaque d'Arcturus ; d'où la nécessité d'avoir des almanachs permettant de connaître, par rapport aux phases de la Lune, le jour où se produira tel lever ou coucher héliaque d'étoile. Ces almanachs furent appelés «**parapegmes**» par les Grecs. Le premier de ceux-ci fut dressé par Anaximène. Il sera suivi dans ce domaine par **Démocrite**, **Méton**, **Eucélémon**, **Eudoxe**, dont nous étudierons le parapegme au n° 4.2, par **Callippe** et par **Autolycus**.

Selon Pline Anaximène aurait enseigné la gnomonique en Grèce et placé à Lacédémone (Sparte) le premier cadran solaire ; on ignore s'il était plan ou sphérique. Selon d'autres auteurs ce serait Anaximandre qui aurait introduit en Grèce le premier cadran solaire.

On pense qu'Anaximène aurait introduit le gnomon en Grèce.

2.4.2.2 Xénophane (575 - 478)

Xénophane est aussi un philosophe ionien, mais, comme **Pythagore** plus tard, il dut quitter sa patrie envahie par les Perses pour se réfugier à Elée en grande Grèce. Il rejette le polythéisme et conçoit «l'un» absolu, substance primordiale remplissant l'Univers et se confondant avec dieu, ouvrant ainsi la voie aux pythagoriciens. Il se distingue des premiers philosophes de Milet par la négation de tout «apeiron», de tout infini ambiant où s'alimenterait le cosmos. Tout en affirmant l'univers conscient, voyant et entendant, **Xénophane** affirme que «l'Univers ne respire pas», formule qui donnera lieu à de nombreuses controverses.

Pour Xénophane la Terre plate n'a point de limite, ni de côté, ni en dessous ; ses racines s'étendent à l'infini ; au dessus l'air est également infini. Comme chez Anaximène les exhalaisons humides, qui s'élèvent de la Terre, arrivent à s'enflammer par suite du rapprochement qui s'opère entre les particules qu'elles renferment ; les astres depuis le Soleil jusqu'aux comètes et météores ne sont que des nuées incandescentes.

Le mouvement des astres est rectiligne et a lieu suivant une droite indéfinie : l'apparente circularité de leur orbite n'est qu'une illusion due à la distance ; comme le fait remarquer **Paul Tannery** (Bibl 9), il y a là un paradoxe insoutenable.

Les astres que nous voyons ne sont jamais les mêmes ; chaque jour de nouveaux se succèdent ; en poursuivant leur route les astres arrivent au dessus d'espaces inhabités (mers, déserts), où ils s'éteignent. D'autres peuvent se rallumer et éclairer les habitants d'autres parties de la Terre. Il y a aussi une infinité de soleils différents, éclairant une infinité de terres habitées, de mondes compris dans le même univers.

L'eau et la terre, qui forment les contrées que nous habitons, ont dû être mélangées autrefois, puis séparées par l'action de l'air et du feu solaire. Mais la mer qui ronge peu à peu la terre finira par triompher et le mélange primitif se reformera à la suite d'une extinction prolongée de notre Soleil.

Dans la partie de l'univers que nous habitons l'humanité qui y est née est condamnée à disparaître ; des cycles semblables la feront revivre par la suite.

2.2.4.3 Héraclite d'Ephèse (550 - 480)

A «l'Ecole Ionienne» on rattache généralement **Héraclite**, qui conçoit l'essence des choses dans des changements incessants ; rien ne dure, «tout coule». «L'être» est essentiellement fait de mobilité ; toutefois il n'y a pas de transformation de la réalité en une autre, car à chaque changement correspond un changement contraire qui le neutralise.

Il croit comme Anaximandre et Anaximène à l'unité de la substance sous la variété des apparences ; comme eux il croit que le monde est né et qu'il périra pour renaître ; il fixe même la durée de la période de cette évolution : 10 800 ans, produit de 30 par 360, car trente ans correspondent à la durée normale de la reproduction de l'homme. Ainsi dans la grande année de la durée de la vie chaque jour représente une génération humaine. Il reprend la loi qui préside à l'échange continu de matière entre la Terre et le ciel.

De la Terre s'élèvent des exhalations sèches, d'autres humides. Les premières servent à entretenir les feux célestes, les secondes mélangées avec les sèches forment notre air atmosphérique, qui s'étend jusqu'aux environs de la Lune et d'où l'eau retombe.

Pour la voie descendante la première transformation du feu, le plus mobile des corps est non pas l'air, mais l'eau. Le résultat de l'embrasement général lui paraît donc comme une masse aqueuse, probablement due à une condensation de vapeurs ; il se rapproche par là de **Thalès**.

Pour **Héraclite** les astres sont des bassins creux, dont la concavité, tournée vers la Terre, rassemble les exhalaisons sèches qui y brûlent, s'allumant au levant, s'éteignant au couchant ; ces bassins circulent dans l'hémisphère supérieur et leurs retournements produisent les éclipses ainsi que les phases de la Lune.

Héraclite range les astres à partir de la Terre dans le même ordre que les Chaldéens : Lune, Soleil, planètes, étoiles fixes. Le Soleil et la Lune sont petits : «le Soleil a la largeur d'un pied d'homme».

En conclusion cette cosmogénie ionienne reste dans l'ensemble bien primitive et bien naïve, comparée à celle du sud de l'Italie et plus précisément à celle de l'Ecole pythagoricienne que nous allons étudier dans le chapitre suivant. Seul le système d'Anaximandre mérite quelque considération comme étant la première explication des mécanismes de l'univers. Anaximène introduit quelques progrès en ce qui concerne l'ordre d'éloignement des corps célestes et en reconnaissant la mobilité des planètes par rapport aux étoiles ; mais après lui on assiste à une régression dans les conceptions cosmogéniques de «l'Ecole Ionienne».

2.3 L'Ecole Pythagoricienne

2.3.1 Pythagore (570 - 480)

Pythagore naquit en 570 avant J.C. à Samos, île de la Mer Egée, proche de la côte d'Asie Mineure, donc en Ionie ; il mourut en 480 avant J.C.. Comme **Xénophane** il dut quitter sa patrie ionienne, menacée par les Perses et il se réfugia en Italie du sud à Crotone, pour s'établir ensuite à Métaponte (près de Tarente). Il voyagea en Asie Mineure, en Egypte ; d'après **Delambre** (Bibl 5) il aurait étudié chez les mages de Perse, chez les Chaldéens et les Brahmanes. Il fut le fondateur de l'Ecole pythagoricienne, dont l'influence fut considérable en Italie du sud, en Grèce proprement dite et en Asie Mineure.

Les **Pythagoriciens** forment une association à la fois scientifique, philosophique, politique et religieuse ; au point de vue scientifique ils étudient les mathématiques (surtout l'arithmétique), l'astronomie, la musique, la médecine. Ils accordent une grande importance aux oppositions : limite-illimité ; pair-impair ; un-multiple ; droit-courbe ; carré-hétéromèque. Ils admettent l'existence du vide, celui-ci n'étant pas toutefois le vide absolu de **Démocrite**.

D'après Pythagore les nombres s'ordonnent en ensembles équilibrés, comme les intervalles consonnants de la gamme, selon les lois de l'harmonie, qui prolongée dans le cosmos devient «l'harmonie des sphères». **Aristote** dira plus tard que pour les Pythagoriciens les nombres sont les éléments constitutifs de la matière.

Pythagore bouleverse les conceptions antérieures du monde en donnant à la Terre une forme sphérique. Il est le premier à découvrir que «l'étoile du soir» est la même que celle du matin et qu'en fait il s'agit de la planète Vénus. D'après **Censorinus**, auteur du 3^e siècle après J.C., il place la Terre au centre du monde, puis l'eau, l'air, le feu, la Lune, Mercure, Vénus, le Soleil, Mars, Jupiter, Saturne et

enfin la sphère des fixes supportant les étoiles (voir fig. 2.9). L'ordre ci-dessus sera ensuite modifiée à tort, pour placer Mercure et Vénus après le Soleil, alors que ce sont des planètes inférieures. Les rayons des sphères sont donnés par les intervalles en tons et demi-tons de la gamme, le ton correspondant à la distance Terre-Lune soit 126 000 stades. Si nous supposons qu'il s'agit de stades attiques de 0,185185 km, cela représente 680 400 km, au lieu de 380 000 km valeur moyenne moderne.

Terre-Lune : 1 ton
 Lune-Mercure : 1/2 ton
 Mercure-Vénus : 1/2 ton
 Vénus-Soleil : 1 ton 1/2
 Soleil-Mars : 1 ton
 Mars-Jupiter : 1/2 ton
 Jupiter-Saturne : 1/2 ton
 Saturne-Sphère des fixes : 1/2 ton

Chaque astre est fixé à une sphère solide et transparente produisant une «musique des sphères».

□ d'avoir été le premier à affecter aux planètes des distances à partir de la Terre et d'avoir donné le premier l'ordre correct des corps célestes,

□ d'avoir conçu un système faisant intervenir des relations mathématiques, lesquelles seront peu à peu affinées et permettront à Képler de percer le secret de l'Univers,

□ d'avoir affirmé le premier la forme sphérique de la Terre.

Pythagore peut être considéré aussi comme l'initiateur de la Science expérimentale, notamment en acoustique, où il formule expérimentalement les relations existant entre la longueur d'une corde vibrante et le son qu'elle émet.

Les concepts astronomiques de Pythagore vont être affinés par ses disciples, auxquels nous consacrons le paragraphe suivant.

2.3.2 Les disciples de Pythagore

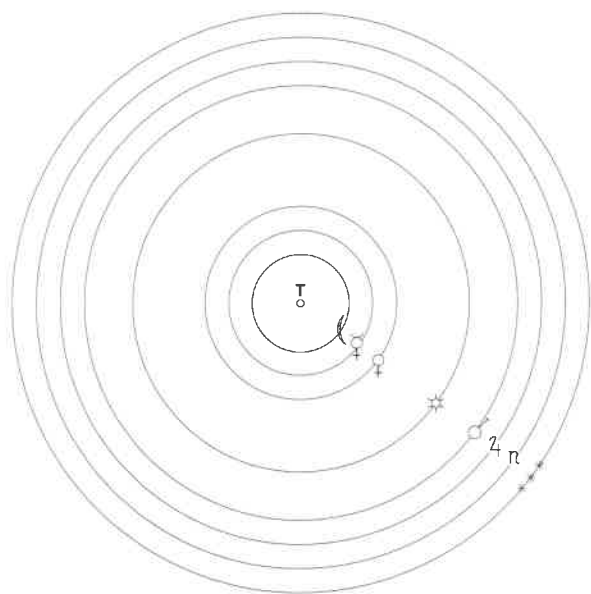


Fig. 2.9 Système géométrique de Pythagore

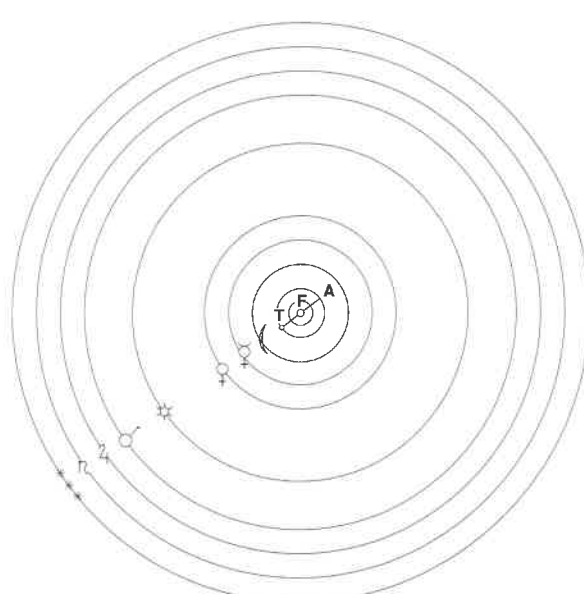


Fig. 2.10 Système de Philolaos

Légende : T Terre; (L Lune; ♀ Mercure; ♀ Vénus; ☆ Soleil; ♂ Mars; ♃ Jupiter
 ♄ Saturne; *** Sphère des fixes (étoiles); F feu central; A Antichthon

res», sorte de concert céleste que Pythagore entend avec quelques disciples.

Delambre (Bibl 5) écrit à propos de ce système: «**Pythagore** applique aux planètes ses recherches sur les tons musicaux et débite des rêves, qui depuis ont été énumérées par **Képler**».

Quoiqu'il en soit Pythagore a eu le mérite :

2.3.2.1 Philolaos (fl. vers la deuxième moitié du 5e siècle avant J.C.)

Philolaos, disciple de Pythagore, fut le premier à reconnaître les mouvements de la Terre : d'abord la rotation de celle-ci, ce qui lui semblait plus simple que de faire tourner le ciel et l'ensemble des corps célestes autour de la Terre, puis le déplacement de celle-ci dans l'Univers.

Curieusement **Philolaos** n'eut pas l'idée de faire tourner la Terre autour de son axe ; il la fit évoluer en vingt quatre heures autour d'un «**feu central**», en lui présentant toujours la même face, de la manière dont s'accomplit - comme nous le savons maintenant - la révolution de la Lune autour de la Terre. Lorsque la Terre décrit sa révolution complète journalière, un observateur placé à sa surface à l'illusion que l'Univers tout entier tourne lui-même dans la direction opposée. L'oecumène était situé sur la Terre dans la direction opposée au «**feu central**», de sorte qu'on ne voyait jamais celui-ci.

Le «**feu central**» appelé aussi «**garde de Zeus**» était le centre de l'Univers. Autour de lui tournaient les sphères dans l'ordre suivant, de l'extérieur vers l'intérieur (voir fig. 2.10) : les fixes, Saturne, Jupiter, Mars, le Soleil, Vénus, Mercure, la Lune, la Terre et enfin «**l'Antichton**» ou anti-Terre, en opposition avec la Terre, de sorte que ce nouveau corps céleste était invisible même des Antipodes.

Une variante du système de Philolaos consiste, selon certains auteurs, à placer l'Antichton entre la Terre et le feu central, ce qui avait l'avantage d'empêcher les Antipodes d'être brûlées par le feu central. D'autre part dans cette position l'Antichton projetait une ombre sur la Terre, ce qui permettait d'étayer l'antique croyance selon laquelle les régions situées au delà des Colonnes d'Hercule (Déroit de Gibraltar) étaient plongées dans l'obscurité. Enfin l'antichton portait le nombre des corps célestes de 9 à 10, nombre sacré des pythagoriciens.

Dans le système de Philolaos le Soleil ne possédait pas de lumière propre : il ne faisait que réfléchir celle du feu central.

Ce système n'est donc ni héliocentrique, ni géométrique, mais en déplaçant la Terre du centre du monde et en la faisant se mouvoir dans l'univers, Philolaos ouvrit la voie aux systèmes héliocentriques : le système héliocentrique partiel d'**Héraclide du Pont** et le système héliocentrique total d'**Aristarque de Samos** que nous étudierons au chapitre 7, au n° 7.1 et 7.2.

2.3.2.2 Cœnopidès de Chios (fl 5e siècle avant J.C.)

Cœnopidès de Chios aurait été renseigné par les astronomes égyptiens sur l'obliquité de l'écliptique et sur les mouvements propres des planètes dans la zone zodiacale. Il est à peu près sûrement le premier des Grecs à avoir donné une valeur relativement correcte de l'obliquité de l'écliptique : 22° (1) et à avoir introduit en Grèce la division du zodiaque en signes.

Cœnopidès a imaginé aussi un cycle de 21.557 jours, correspondant à un nombre entier des révolutions des «sept planètes» en 59 ou 731 lunaisons. Selon **Censorinus**, déjà cité, ce cycle aurait été adopté par Philolaos, qui fixait la durée de chaque lu-

naison à : $\frac{21.557}{731} = 29,4897$ jours, alors que la

durée moyenne moderne est de 29,5306 jours. Ce cycle a été appelé aussi «la grande année».

D'après ce cycle la durée de l'année solaire était donc de : $\frac{21557}{59} = 365,372$ jours au lieu de

365,2422 jours, valeur moderne. Cœnopidès avait fait placer à Olympie, où se célébraient les jeux olympiques une table de bronze indiquant que son cycle ramenait la coïncidence de l'année solaire et de l'année lunaire, mais il ne semble pas que la réforme résultant de l'adoption de ce cycle ait été adoptée.

2.4 L'Ecole d'Elée

La ville d'Elée était en Italie méridionale sur la Mer Tyrrhénienne.

On attribue parfois à **Xénophane** la création de «l'Ecole d'Elée», troisième école grecque après «l'Ecole Ionienne» et «l'Ecole Pythagoricienne». Mais ce sont deux hommes illustres qui feront la renommée de cette école : **Parménide** et **Zénon**.

2.4.1 Parménide (515 - 445)

Pour **Parménide** on ne trouve plus à la source un élément considéré comme primordial et capable d'engendrer les autres par transmutation, mais il existe derrière les apparences une seule réalité «**l'être**», opposé au «**non-être**». Pour les pythagoriciens la multiplicité existe, le nombre **un** étant le modèle des choses ; pour Parménide «**l'être**» se confond avec «**l'un**» et le problème de la science consiste à découvrir le véritable monde de «**l'être**», une réalité constante derrière des apparences trompeuses. Ce ne sont plus le feu, l'air, l'eau, la terre qui se transforment les uns dans les autres, car ces phénomènes ne constituent que des «apparences». Cette conception qui se généralisera par la suite porta un grand coup à la théorie ionienne des échanges (voir n° 2.2.4.1 Anaximène).

La cosmologie de Parménide s'apparente sur certains points aux conceptions d'**Anaximandre**, dont il reprend l'hypothèse des anneaux sous une forme un peu différente.

S'il ne fut pas un adepte de l'Ecole pythagoricienne, Parménide en subit l'influence et lorsqu'il se propose de décrire le monde du «**non-être**», il le fait en s'inspirant de la physique pythagoricienne.

Comme les Pythagoriciens il admet que la Terre sphérique est située au centre du monde. Elle se soutient dans l'espace parce qu'il n'y a pas de raison qu'elle se meuve d'un côté plutôt que de l'autre, explication basée sur le principe de la raison suffisante et qui sera reprise plus tard.

Posidonius (133 - 49) attribue à Parménide l'idée première de partager - comme Thalès l'avait fait

(1) au lieu d'un peu moins de 24° à cette époque.

pour la voûte céleste - la surface de la Terre en cinq zones, d'après leur température ; toutefois cette division n'a pas eu le caractère astronomique qu'elle acquies par la suite. Pour Parménide les zones tempérées sont les seules habitées et habitables ; le concept subsistera très longtemps et on ira même plus loin en estimant que la zone torride est infranchissable et que la zone tempérée australe n'est pas habitée.

2.4.2 Zénon d'Elée (490 - 425)

Zénon est célèbre par ses paradoxes qu'on appelle des « apories » (impasses).

Les Pythagoriciens qui pensaient que tout était réglé par les nombres, croyaient que la longueur d'un segment pouvait être représenté par le nombre de points qui y étaient contenus. Un jour l'un d'eux démontra qu'il y a des segments, tels la diagonale du carré, dont la longueur ne peut être exprimé ni par un nombre entier, ni par un nombre fractionnaire. Cette découverte fut longtemps tenue secrète.

Zénon eut le mérite de montrer qu'on ne pouvait concevoir ni des lignes composées de points, ni des temps composés d'instant. Voici « l'argument d'Achille » : Si le temps et le lieu sont divisibles à l'infini, jamais un mobile n'atteindra le terme de sa course, puisque pour y parvenir il lui faut parcourir d'abord la moitié du chemin, puis la moitié du reste et ainsi de suite jusqu'à l'infini.

Un autre argument célèbre de Zénon est celui du « stade ».

Les Eléates s'intéressèrent peu à la description des phénomènes, qui pour eux ne relèvent que de l'illusion ; au point de vue cosmogénique ils subirent l'influence des Pythagoriciens : la Terre sphérique se maintient en équilibre au centre du monde, pour la raison déjà invoquée : « il n'y a pas de raison qu'elle aille d'un côté plutôt que d'un autre ». Autour de la Terre s'enroulent des couronnes mêlées d'obscurité et de lumière, « le Soleil et la Lune se sont détachés du cercle de la voie lactée », l'un du mélange le plus subtil qui est le chaud, l'autre du mélange le plus dense qui est le froid ».

Si les hypothèses cosmogéniques des Eléates prêtent à sourire, leur influence sur l'évolution de la pensée scientifique a été importante à la fois en mathématique et en physique. On ne pourra plus éluder la confrontation de l'expérience et de la raison ; il ne suffit pas de décrire les faits qu'on observe, mais il faut découvrir derrière les « apparences » les lois qui les régissent. Les savants Grecs qui suivront devront tenir compte de l'enseignement de l'Ecole Eléate et élaborer leurs systèmes avec plus de rigueur.

2.5 Empédocle, Anaxagore, les Atomistes

2.5.1 Empédocle (492 - 432)

Empédocle d'Agrigente, en Sicile, médecin, fut aussi un penseur de grande fécondité. Il connaissait bien les principaux acquis de l'école pythagoricienne et de l'Ecole Eléate. Il admet que les substances primordiales sont au nombre de quatre : eau, air, feu, terre, les quatre « racines » des choses. Les combinaisons et les séparations de ces racines se font sous l'action de deux forces opposées : « l'amour » et « la haine ».

- La haine implique la séparation.
- Le passage de la haine à l'amour implique le rapprochement et la combinaison.
- L'amour implique la combinaison harmonieuse et la perfection du monde.
- Le retour à la haine implique la répulsion et la décomposition.

Les quatre racines sont irréductibles, ce qui laisse pressentir l'atomisme.

Selon certains auteurs, le cosmos d'**Empédocle** aurait la forme d'un oeuf ; les régimes alternés de l'amour et de la haine en déterminant les lois. C'est la vitesse toujours croissante du mouvement céleste qui fixe la Terre au centre du monde et l'y maintient immobile. Il reprend l'idée d'**Héraclite** du flux continu et du retour éternel.

Les étoiles, feux isolés, sont attachés à la voûte de cristal du firmament ; les planètes flottent au dessous, selon la conception d'Anaximène. Empédocle adopte pour la Lune la même doctrine qu'**Anaxagore** (voir ci-après) ; la Lune est un corps obscur par lui-même recevant sa lumière du Soleil ; toutefois la Lune n'est pas de nature terrestre ; c'est une concrétion formée par de l'air nuageux.

La partie lumineuse de l'atmosphère s'étend jusqu'à la voûte du ciel ; la véritable source de lumière est cette moitié ignée de l'atmosphère ; ce qui nous apparaît comme Soleil n'est qu'un reflet, image lumineuse de la Terre réfléchiée par la voûte céleste.

2.5.2 Anaxagore (500 - 428)

Anaxagore reprend sous une autre forme l'idée de « l'apeiron », substance du chaos primitif qui ne peut pas se transformer. Les innombrables substances qui composent l'univers existent à l'origine dans « l'apeiron ». Il y a indivisibilité à l'infini de la matière, ce qui est incompatible avec toute physique de type atomiste ; il y a aussi indestructibilité de la matière, de sorte qu'il ne peut y avoir de naissance absolue, les substances des corps existant de toute éternité.

En matière de cosmogénie les doctrines d'Anaxagore s'apparentent aux conceptions ioniennes. La Terre en forme de disque est soutenue par l'air. Le cosmos a été engendré à partir d'un magma primitif et d'une impulsion initiale donnant naissance à un mouvement tourbillonnaire continu, localisé au

centre de la Terre, les astres étant projetés plus ou moins loin d'elle par la force centrifuge.

Un tourbillon peut naître en tout point de l'univers, d'où la pluralité de celui-ci. Un monde peut se désagréger et retourner au chaos, un autre peut surgir pour le remplacer.

C'est Anaxagore qui le premier ne verra dans la Lune qu'un corps obscur par lui-même reflétant la lumière du Soleil ; il est le premier aussi à avoir expliqué les phases et éclipses de Lune et les éclipses de Soleil. Pour expliquer que les éclipses de Soleil sont en un même lieu plus rares que celles de la Lune, Anaxagore admettait que ces dernières pouvaient être produites par l'interpolation entre le Soleil et la Lune d'autres astres obscurs, hypothèse à rapprocher de celle de l'Antichton de **Philolaos**.

Toutefois l'explication incomplète des éclipses et phases de la Lune fut une hypothèse de physicien et non le résultat des observations d'un astronome.

Enfin il émit l'hypothèse que la Lune a une grandeur comparable à celle du Peloponnèse et qu'elle est habitable. Quant à la dimension du Soleil elle est bien supérieure à celle de la Lune.

2.5.3 Les Atomistes (Leucippe, Démocrite, fl. 5e siècle et fin du 5e siècle avant J.C.)

Pour les atomistes toutes les substances sont formées de particules extrêmement petites et indivisibles : les atomes. Contemporain d'**Empédocle** et d'**Anaxagore**, **Leucippe** fut le premier à développer cette doctrine ; **Démocrite d'Abdère** apparut un peu plus tard et il est presque un contemporain de Platon. Selon les atomistes les atomes sont séparés entre eux par du vide ; leur forme peut être variée, les substances étant différenciées par cette variété. Selon l'expression d'**Aristote** il n'existe pour les atomistes qu'une seule matière primordiale, soumise à trois accidents : la forme, l'ordre et la position. C'est ainsi que :

- A et B diffère par la forme,
- AB et BA par l'ordre,
- A et B par la position.

Enfin les atomes sont en mouvement dans un vide infini ; c'est de ce mouvement et de rencontres d'atomes que résultent des combinaisons nouvelles et que naissent les corps qui composent l'univers. Ce système est plus cohérent que les grands systèmes antérieurs.

Au point de vue cosmogénique le chaos primitif est formé d'atomes et de vide séparés en deux régions distinctes pour **Leucippe**, dispersés sans ordre dans le vide infini pour **Démocrite**. Mais dans les deux cas des mondes peuvent naître de l'organisation des atomes, soumise au hasard ; leurs mouvements les entraînant dans toutes les directions possibles en des **tourbillons**, dans lesquels les éléments semblables arrivent à s'agréger, après de

multiples chocs. Le retour au chaos résulte au contraire de désagréations soumises aussi au hasard. Cette théorie qui reprend en partie et complète celle d'**Anaxagore** a peut-être été l'inspiratrice de **Descartes** dans son «système des tourbillons».

Pour **Leucippe** le cercle de la Lune est le plus proche de nous, celui du Soleil le plus lointain, les autres corps célestes, étoiles et planètes occupant des positions intermédiaires.

Démocrite a écrit plusieurs ouvrages d'astronomie, dont il nous reste des fragments.

Les mondes en nombre infini sont entourés d'une atmosphère ou d'une enveloppe particulière. Les uns comme le nôtre ont un Soleil, d'autres en sont privés. La Lune est une masse solide avec plaines et montagnes ; les comètes résultent de chocs entre planètes. Selon **Sénèque**, **Démocrite** ne connaissait pas le nombre de celles-ci ; c'est évidemment une mauvaise interprétation des écrits de celui-ci ; il connaissait bien les cinq planètes, mais comme Anaxagore il avait l'intuition qu'il pouvait y en avoir d'autres inconnues, parce qu'ayant échappé aux observations. Démocrite suivit l'exemple d'Anaximène et établit son propre «parapegme» ; il émit aussi l'hypothèse que la galaxie était un amas d'étoiles tellement rapprochées qu'on ne peut les distinguer. Il fut le premier à avoir cette intuition, qui sera confirmée par **Galilée** dix neuf siècles plus tard.

Démocrite est aussi l'auteur d'un cycle luni-solaire, qui selon **Censorinus** était de 82 ans avec 28 mois intercalaires, ce qui pose problème. **P. Tannery** (Bibl 5) propose 77 au lieu de 82, soit $77 \times 12 \times 28 = 952$ mois ; mais si cycle aboutit à un mois lunaire très correct de 29,53046 jours (1), l'année par contre est de : $365 \frac{8}{77} = 365,1039$ jours, valeur bien faible ; la valeur exacte est de 365,2422 jours.

2.6 Astronomes Grecs du 5e siècle avant J.C.

2.6.1 Cléostrat de Ténédos (fl. au 5e siècle avant J.C.)

Afin de combler un retard de 11 jours de l'année lunaire, composée de 12 lunaisons, sur l'année solaire, les Grecs avaient primitivement adopté une période de 25 mois lunaires (12 + 13 lunaisons) dite «diétéride». La discordance avec l'année solaire étant encore très élevée, on substitue à la diétéride une période de quatre ans : «la tétraétéride». Cléostrat de Ténédos, ayant constaté le défaut de ce cycle, le remplaça par «l'octaétéride», cycle de 8 ans avec 99 lunaisons et 2922 jours, ce qui donnait une durée de lunaison de : $2922 : 99 = 29,5151$ jours. Or la durée correcte est de 29,5306 jours. La lunaison de **Cléostrat** était donc encore trop courte

(1) la période exacte de la lunaison ou de la révolution synodique de la Lune est de 29,5306 jours. (voir n° 2.3.2.2)

de : $29,5306 - 29,5151 = 0,0155$ jour, ce qui donnait au bout de 10 octaétérides (80 ans) ou 990 lunaisons un retard de plus de 15 jours, de sorte que la Lune se trouvait pleine quand le calendrier l'indiquait nouvelle. Toutefois l'octaétéride donnait une bonne valeur de l'année puisque : $2922 : 8 = 365,25$ jours. On pense que la connaissance de l'année de 365,25 jours, dite année égyptienne, pourrait remonter en Grèce au 8e siècle et qu'elle aurait pu être transmise aux Grecs par les Égyptiens.

Enfin Cléostratè aurait ajouté aux constellations du zodiaque grec celles du Bélier et du Sagittaire.

2.6.2 Méton et Euctémon (fl au 5e siècle avant J.C.)

D'après **Ptolomée**, **Méton** fit ses observations à Athènes, puis dans les Cyclades, en Thrace, en Macédoine. On cite en particulier l'observation qu'il fit sur le Soleil au solstice d'été de 432 avant J.C., avec un «héliotrope», sorte de cadran solaire. **Méton** et **Euctémon** firent usage de la «sphère armillaire», que nous étudierons à propos d'**Hipparque**, au chapitre 10 aux n° 10.11; son invention est attribuée à **Anaximandre** (voir n° 2.2.2). Mais Méton est surtout célèbre par le cycle qui porte son nom : le «**cycle de Méton**», destiné à remplacer l'octaétéride de Cléostratè, dont nous avons mis en évidence l'inconvénient. Méton montra que 19 années solaires renferment 235 lunaisons et 6940 jours ; il présenta sa réforme dans une assemblée des jeux olympiques. L'enthousiasme fut si grand que l'on ordonna l'inscription sur les monuments publics du numéro d'ordre de chaque année du cycle, en lettre d'or. C'est de là que vient le «**Nombre d'Or**», qui désigne le rang d'une année à l'intérieur du cycle de Méton. Ce nombre est encore utilisé dans le comput ecclésiastique. Jusqu'en 1976 «l'Annuaire du Bureau des Longitudes» donnait chaque année «les éléments du comput», avec en particulier le «Nombre d'Or» de l'année considérée. Les «Ephémérides astronomiques» qui ont relayé depuis 1977 «l'Annuaire du Bureau des Longitudes», n'en font plus mention. Le «Cycle de Méton», désigné aussi sous le nom «d'ennadécaétéride» fut partagée en 19 années lunaires : 12 communes de 12 lunaisons, 7 complètes de 13 lunaisons, qui étaient la 3e, la 6e, la 8e, la 11e, la 14e, la 17e et la 19e du cycle. Cela faisait 235 mois de 30 jours, soit au total 7050 jours.

L'année selon **Méton** et **Euctémon** était de 365 jours 5/19 et la lunaison de 29 jours 25/47. En effet : $365 \text{ j } 5/19 \times 19 = 6940 \text{ j}$ et $29 \text{ j } 25/47 \times 235 = 6940$ jours.

Ces 6940 jours représentaient 110 jours de moins que les 7050 jours (235×30) ci-dessus, d'où la nécessité de retrancher un jour tous les 63 ans, car $6940 / 63 \approx 110$. On avait ainsi 110 «mois caves» de 29 jours. Selon les auteurs ce cycle fut adopté soit en 496, soit en 432 avant J.C..

Nous avons vu que l'année d'**Enopidès** était de 365 jours 22/59, soit 365,3729 jours (voir n° 2.3.2.2) ; l'année de Méton était de 365 jours 5/19, soit 365,2631 jours, toutes deux trop longues par rapport à l'année de 365,25 jours obtenue par **Cléostratè**. En particulier l'année de Méton représentait un excédent de :

$$\frac{5}{19} - \frac{1}{4} = \frac{1}{76} \text{ de jour,}$$

d'où la réforme de **Calippe** que nous étudierons au n° 4.5. Mais la durée de la lunaison de Méton : 29 jours 25/47 soit 29,5319 jours était très proche de la durée correcte: 29,5306 jours.

Euctémon, comme **Démocrite** dressa son parage d'étoiles.

Méton et probablement aussi Euctémon faisaient partir leur division du zodiaque, du point correspondant sur l'écliptique au lever héliaque de Sirius. Ce point marquait la fin du signe du Cancer et le commencement du signe du Lion, qui était leur premier signe du zodiaque.

Enfin on doit aussi à Méton et à Euctémon la découverte de l'anomalie du Soleil en longitude et de l'inégale répartition dans le courant de l'année des solstices et des équinoxes, donc de l'inégalité des saisons.

2.7 Conclusion sur la science grecque des 6e et 5e siècles avant J.C.

Structure de la matière

Le tome I de l'histoire générale des sciences, intitulé : la Science antique et médiévale (Bibl 12), auquel nous nous sommes fréquemment référés pour l'exposé des doctrines des écoles grecques des 6e et 5e siècles avant J.C., donne une bonne synthèse des différentes conceptions élaborées par les philosophes Grecs, en ce qui concerne la structure de la matière :

- 1) multiplicité infinie des substances dès l'origine: **Anaximandre, Anaxagore**,
- 2) pluralité limitée à certaines substances élémentaires, dont les combinaisons engendrent des composés accessibles à nos sens : les quatre racines d'**Empédocle** : terre, eau, air, feu,
- 3) une seule substance primordiale : l'eau ou l'air ou le feu susceptible de se transformer dans toutes les autres : **Thalès, Anaximène, Héraclite**,
- 4) une seule substance, sans qualité, mais divisée en particules distinctes, éléments derniers (atomes), dont l'agencement permet la

formation des différents corps : **Leucippe**, **Démocrite**,

- 5) tout dérive du nombre entier, ce qui implique la discontinuité de la matière et annonce l'atomisme, en outre la formation des différents corps répond à des combinaisons numériques: les **Pythagoriciens**.

Dans toutes ces théories c'est la deuxième, celle d'**Empédocle**, relative aux quatre éléments, qui exercera le plus d'influence sur l'évolution des sciences géographiques avec Aristote, puis avec les auteurs du Moyen Age et cela jusqu'au 16e siècle.

Conceptions cosmogéniques

Les conceptions cosmogéniques d'**Anaximandre** sont très élémentaires ; celles de ses successeurs de l'Ecole Ionienne et de l'Ecole d'Elée sont bien naïves. Le seul système digne d'être retenu est celui de l'Ecole pythagoricienne, qui affirme la sphéricité de la Terre et le mouvement des corps célestes, selon des cercles concentriques à la Terre. Le

modèle de **Philolaos** marque une étape importante en reconnaissant le mouvement de la Terre dans l'espace autour du « feu central ».

Les intuitions de **Démocrite** concernant certains phénomènes célestes sont très pertinentes.

On ne peut qu'admirer le génie spéculatif des philosophes Grecs des 6e et 5e siècles avant J.C. en ce qui concerne la structure de la matière et l'agencement de l'Univers, mais force est de constater que pour leurs théories et leurs systèmes, souvent ingénieux, ils ne disposaient pas de suffisamment de données.

Astronomie

Les astronomes des 6e et 5e siècles avant J.C. s'attachent surtout par leurs observations à résoudre des problèmes de calendrier ; c'est d'ailleurs la finalité qu'assigne **Socrate** à l'Astronomie dans le «Gorgias». Aussi l'acquis astronomique de ces premières écoles grecques est-il relativement modeste, comparé à celui des Babyloniens.

BIBLIOGRAPHIE

1. Histoire de la géographie et Atlas pour l'histoire de la géographie par **Vivien de St Martin**. Paris 1873.

2. Paulys Realencyclopädie der Klassischen Altertumswissenschaft XVII-2. Stuttgart 1937.

3. L'Illiade par **M. Meunier**. Paris 1956.

4. La géographie des Grecs par **P. Pedech**. Paris 1976.

5. Histoire de l'astronomie ancienne par **M. Delambre**. Paris 1817.

6. Pour l'histoire de l'astronomie ancienne de Thalès à Empédocle par **P. Tannery**. Paris 1887.

7. Recherches sur l'histoire de l'astronomie ancienne par **P. Tannery**. Paris 1893.

8. L'astronomie, évolution des idées et des métho-

des par **G. Bigourdan**. Paris 1911.

9. Mémoires scientifiques de **P. Tannery** (J. Heidelberg et H.B. Zeuthen). Paris 1912.

10. Histoire de l'astronomie par **P. Boquet**. Paris 1925.

11. Histoire des sciences par **Pierre Brunet et Aldo Mieli** Paris 1935.

12. La science antique et médiévale. Tome 1 de l'histoire générale des sciences. Paris 1966.

13. Dictionary of scientific bibliography. New York 1970.

14. A history of ancient mathematical astronomy par **O. Neugebauer**. Berlin, Heidelberg, New York 1975

15. The history of cartography vol. 1 par **J.B. Harley** et **David Woodward**. Chicago, Londres 1987.