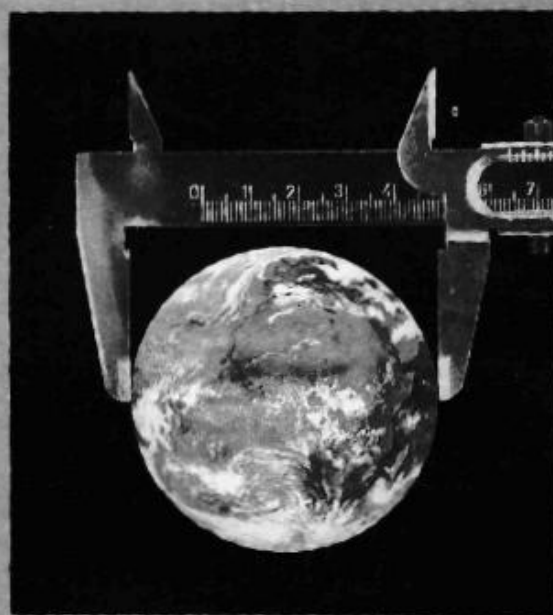


J.J. LEVALLOIS

MESURER LA TERRE

300 ANS
DE GEODESIE FRANÇAISE

De la toise du Châtelet
au satellite



Presses de l'École nationale des
Ponts et chaussées

Association
Française de
Topographie

J.J. LEVALLOIS

MESURER LA TERRE

300 ANS
DE GEODESIE FRANCAISE

De la toise du Châtelet
au satellite

Jean-Jacques LEVALLOIS

Ingénieur Général Géographe
Ancien secrétaire général de l'Association internationale de Géodésie

Avec la collaboration de :

Claude BOUCHER

Ingénieur en chef Géographe
Correspondant du Bureau des Longitudes
Secrétaire Adjoint de l'Association Internationale de Géodésie
Directeur Exécutif du Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale

Jean BOURGOIN

Ingénieur Général de l'Armement (Hydrographe) CR
Membre du Comité Scientifique
de l'Institut Français de Recherche et d'Exploitation de la Mer
Ancien Directeur du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

André COMOLET-TIRMAN

Ingénieur Général de l'Armement (Hydrographe)
Directeur du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine
Membre du Bureau des Longitudes

André ROUBERTOU

Ingénieur Général de l'Armement (Hydrographe) CR
Ancien Directeur Adjoint du Service Hydrographique
et Océanographique de la Marine

Préfacé par

Henri LACOMBE

de l'Académie des Sciences

PREFACE

Voici, contée par un homme de l'art, l'histoire de "Trois cents ans de Géodésie française" : la Géodésie, science de la forme de la Terre - de sa "Figure" comme on disait au XVIII^e siècle - doit une grande part de son développement aux géodésiens français, au point que la geste de l'activité nationale dont traite le livre de l'Ingénieur Général Géographe J.-J. Levallois est, dans une grande mesure, celle de la géodésie mondiale.

On admire, mais on comprend, qu'un homme qui a fait toute sa carrière en géodésie, qui en a étudié et enseigné les développements historiques depuis les débuts, qui a participé à ses progrès récents aux niveaux national et mondial, ait été tenté d'en écrire l'histoire en France : aussi passionné qu'expert, il a voulu faire partager au lecteur de cette histoire la richesse qu'il y a lui-même trouvée en la méditant puis en l'écrivant.

Aux deux tiers du XVII^e siècle, le "bonheur" de la géodésie fut d'abord qu'aux yeux d'un roi éclairé et de son ministre, Colbert, un royaume majeur se devait de disposer de bonnes cartes ; puis que les temps firent alors mûrir des esprits inventifs qui perfectionnèrent les instruments de l'observation astronomique et géodésique, ainsi que les horloges ; enfin que se soient trouvés, à portée de ces inventeurs, des hommes habiles et aventureux, astronomes, géographes, marins, "voyageurs naturalistes", prêts à affronter, pour le progrès des sciences, tous les aléas de campagnes terrestres ou maritimes plus ou moins lointaines. Ajoutez à cela que s'annonçait le Siècle des Lumières, avec toute son attention et son enthousiasme pour la "Philosophie Naturelle", dont les théoriciens, Huygens puis Newton, qui en avaient posé les fondements, allaient inspirer les progrès du siècle suivant. De fait, la question de la Figure de la Terre passionna toute l'intelligentsia européenne du XVIII^e siècle : l'Europe entière se ligua pour la géodésie et participa aux controverses qui soulevèrent les résultats des observations.

Le livre nous fait vivre cette ambiance exaltée.

De fait, cette époque particulièrement faste pour la géodésie française se poursuivit pendant plus d'un siècle et demi : des réseaux géodésiques couvrent des pays de plus en plus vastes, près des rivages des continents et des îles, où les marins et les hydrographes de diverses nations prennent pied, des levés de cartes marines sont faits avec des méthodes adaptées aux conditions maritimes et étudiées chez nous dès le début du XVIII^e siècle.

Mais ensuite, les progrès associés de la géodésie, de la mécanique des solides en rotation et une meilleure compréhension des phénomènes, la reprise, avec des techniques plus perfectionnées de certains réseaux antérieurs, les apports du nivellement puis de la gravimétrie amenè-

rent à des valeurs de plus en plus précises des dimensions et d'autres caractéristiques de l'ellipsoïde de référence, au point que lorsque sonna, près de trois cents ans après Colbert, les débuts de l'ère de la géodésie spatiale, les caractéristiques de l'ellipsoïde ne furent pas bouleversées, ne firent même que des "sauts" très modestes. Le fait majeur qui en surgit est la naissance de la "géodésie globale", c'est-à-dire l'insertion des continents et des îles dans un réseau unique, par les trois coordonnées d'espace de nombreux points de la surface émergée de la Terre. De plus, une surface de référence des niveaux, le géoïde, est désormais accessible sur les océans et sa topographie, par rapport à l'ellipsoïde, ouvre un champ d'investigation très vaste sur les relations entre sa forme, certains traits de fonds océaniques et de la constitution profonde du globe.

L'ouvrage fait le point sur l'aspect scientifique de ces problèmes ; mais il fait état aussi d'applications fécondes des études de géodésie et de géophysique marines et des méthodes nouvelles de navigation.

Pour la présentation de ces divers aspects de la géodésie spatiale, l'auteur a fait appel à ses collègues Ingénieurs Géographes spécialistes et à des Ingénieurs de l'Armement (Hydrographes). M. Levallois les a judicieusement choisis.

Les médias nous font vivre, en direct, l'envol des fusées enlevant en altitude des satellites d'étude de la Terre : cet envol est, à lui seul, une aventure et mérite diffusion. Mais, souvent, selon les téléspectateurs, une part trop sommaire du commentaire est réservée aux objectifs scientifiques de la mission et à la nature des mesures que doivent effectuer les capteurs embarqués. Ce livre peut contribuer à combler cette insuffisance et aider ses lecteurs à mieux évaluer la base scientifique qui sous-tend les efforts spatiaux faits en Europe et ailleurs.

Quoiqu'il en soit, nous avons la chance de vivre une nouvelle époque faste pour la géodésie, celle de la géodésie spatiale, riche de la large palette d'observations qu'elle ouvre pour la géodésie, mais une géodésie de plus en plus inséparable de la géophysique et de l'observation de la Terre ; cette géodésie mérite bien, elle aussi, l'enthousiasme qu'avaient soulevé les opérations du XVIII^e. Ce livre, qui est le bienvenu, y aidera, livre d'histoire des sciences et "point" d'une science dont les développements spectaculaires se déroulent sous nos yeux.

Aussi, à l'âme de ce livre, J.-J. Levallois, géodésien indiscuté, initiateur et rédacteur principal de l'ouvrage, à tous les spécialistes qui y ont apporté leur contribution, sont dus les félicitations et les remerciements des lecteurs.

H. LACOMBE
de l'Académie des Sciences

Sommaire

Introduction	9
La Géodésie	10
I - Les précurseurs - l'œuvre de Picard	13
II - La triangulation des Cassini	21
III - La terre est un sphéroïde aplati	31
IV - La méridienne vérifiée : Théories de Clairaut	49
V - Le système métrique - La méridienne de Delambre et Méchain	61
VI - Les acquisitions théoriques	75
VII - La géodésie au temps du Consulat et de l'Empire	83
VIII - La triangulation des Ingénieurs Géographes	91
IX - Le nivellement	113
X - Vers la nouvelle triangulation	127
XI - De 1860 à 1914, la géodésie s'internationalise - Nouveaux thèmes de recherches	141
XII - Le service géographique de l'Armée - Le service du nivellement général de la France	157
XIII - Entre les deux guerres	181
XIV - De 1940 à l'ère spatiale - Travaux de l'IGN	201
XV - De 1940 à l'ère spatiale (suite) - Coopération internationale	221
Témoins du passé	244
XVI - La géodésie spatiale : les premiers pas	247
XVII - La géodésie spatiale depuis 1971	271
Contribution des hydrographes et marins	287
XVIII - Les débuts de l'hydrographie française	291
XIX - Les temps modernes de 1800 à nos jours	311
XX - La géodésie marine	361
Table des matières	386

Introduction

Après quarante années consacrées à une carrière de géodésien, j'ai vu tomber le couperet de la retraite.

On ne renonce pas facilement à ce qui fut l'activité quotidienne, les souvenirs ne s'estompent pas si vite. Le seul moyen qui me permettait de garder un peu de contact avec la géodésie était de me plonger dans son histoire ; c'est ce que j'ai fait.

J'y ai éprouvé tant de plaisir que j'ai ressenti l'envie de consacrer cet ouvrage aux travaux des géodésiens français.

C'est en effet notre pays qui, au cours des XVII^e, XVIII^e et de la 1^{re} moitié du XIX^e siècle prit l'initiative et assura la mise en œuvre de la plupart des entreprises de grande envergure, et même si depuis le milieu du XIX^e siècle l'intérêt des milieux français pour cette discipline semblait quelque peu émoussé, pour bénéficier d'ailleurs d'un puissant renouveau depuis l'ère des satellites, même si notre position nationale n'autorise plus guère le rôle prépondérant qui fut le nôtre au XVIII^e siècle, on peut considérer que la géodésie française a encore son mot à dire dans le débat international, qu'il est écouté, voire sollicité.

C'est enfin une histoire assez typique de la façon dont progresse une science avec ses théories, ses expériences, ses querelles scientifiques ou personnelles, ses tâtonnements et ses succès. Il n'est pas mauvais que ceux des lecteurs qui ne la connaissent point puissent se faire une idée moins sommaire de l'ingéniosité, du labeur, des concours qu'a exigés la lente élaboration du canevas géodésique de notre pays, qui n'est pas tombé tout créé du ciel, et de la part idées, réalisations due à nos devanciers ou à nos contemporains.

La documentation sur laquelle je m'appuie n'est pas inédite, elle est tirée de livres, classiques ou plus rares, ou de notices éparses dans des revues que chacun pourrait consulter s'il en avait le temps et le désir !

On en trouvera la liste dans la bibliographie, mais n'ayant aucune expérience, ni aucun titre d'historien des sciences, j'aurai peut être parfois laissé passer l'essentiel sans m'en douter, ce dont je sollicite par avance l'indulgence du lecteur.

L'ouvrage se compose d'un certain nombre d'articles, groupés par ordre chronologique. Le texte est émaillé d'un grand nombre de citations originales qui expriment, beaucoup mieux que toute paraphrase, la pensée des créateurs et le fil de leurs recherches. Elles sont bien entendu attribuées, mises entre guillemets, et ne sont tronquées qu'au minimum, sans que le sens soit dénaturé.

En compléments, figurent un certain nombre de pièces dont le but est documentaire, elles apportent soit des compléments scientifiques ou historiques

- soit recréent une atmosphère d'époque
- soit présentent un aspect humoristique.

On me pardonnera je l'espère de les avoir choisies un peu au hasard de mes lectures, parce qu'elles m'ont paru significatives ou amusantes.

J'ai évité le plus possible l'appel aux mathématiques : elles ont leur place dans les traités spécialisés mais pas ici, sauf quelques points très élémentaires et simplifiés, mais je suppose toutefois, connues les définitions élémentaires de cosmographie, astronomie et géographie : mouvement diurne des étoiles, verticale, méridien, latitude, longitude, azimut, coordonnées équatoriales des étoiles etc... quitte à y revenir dans le courant de l'exposé.

Tout le texte n'est pas de ma main. J'ai en effet demandé à M. Jean-Claude Boucher, Ingénieur en Chef géographe, de décrire les travaux de géodésie spatiale effectués en France depuis 1972. Il les connaît parfaitement bien, pour y avoir pris une part scientifique et technique extrêmement active.

J'étais d'autre part désireux de compléter l'ouvrage par l'exposé de l'importante contribution de nos ingénieurs hydrographes à la géodésie française.

M. J. Bourgoin, ingénieur général de l'armement, ancien directeur du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, auquel MM. les ingénieurs généraux A. Comolet-Tirman, actuel directeur du SHOM, A. Roubertou et A. Demerliac ont prêté leur concours, a bien voulu écrire cette histoire où l'on verra l'étroite liaison existant entre géodésie terrestre et géodésie marine et les bénéfices mutuels qui en sont résultés.

Je les remercie de tout cœur d'avoir traité des sujets pour lesquels je n'étais pas compétent.

L'essentiel de ma documentation provient :

- de la bibliothèque de l'Institut du Service des archives de l'Académie des Sciences
- de la bibliothèque de l'Observatoire de Paris
- de la bibliothèque de l'Institut géographique national et des archives de la direction
- de la bibliothèque de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées
- du Service historique de l'Armée et de ma documentation personnelle pour la période 1939-1970.

La revue de l'Association française de topographie, XYZ s'est chargée d'éditer cette plaquette qui reprend la suite des articles qu'elle avait publiés.

Que tous ceux qui m'ont aidé reçoivent ici l'expression de ma reconnaissance, en particulier les conservateurs des bibliothèques ou archives qui m'ont ouvert si aimablement leurs collections, ainsi que l'infatigable Monsieur Bailly, directeur de la publication XYZ.

J.-J. LEVALLOIS

NB. - Les chiffres entre parenthèses renvoient aux bibliographies des chapitres I à XVII.

LA GEODESIE

La géodésie étudie la forme de la terre ; peu connu du grand public, son nom n'évoque point de découvertes sensationnelles, et certains l'ignorent sans s'en porter plus mal.

La terre est une boule ; les irrégularités du relief sont très petites par rapport à une forme plus générale, que les anciens avaient pressentie, et qu'en première approximation ils assimilaient à une sphère.

La première démonstration purement terrestre de cette rotondité fut administrée par les navigateurs et couronnée par le périple de Magellan.

La loi de l'attraction universelle de Newton nous enseigne que, quelle que soit par ailleurs sa forme précise, toutes les masses terrestres s'attirent mutuellement suivant la loi de l'inverse carré de la distance et que la direction locale du fil à plomb est perpendiculaire à la surface des eaux calmes. On appelle surface de niveau la surface qu'épouserait un fluide au repos soumis à l'attraction terrestre : la surface des mers, en l'absence de courants, des marées, de variation de salure en serait une portion et en diffère à vrai dire bien peu.

Les surfaces d'égale pression atmosphérique (atmosphère au repos absolu) seraient des surfaces de niveau et le sont en fait à quelques décimètres près.

La géodésie se propose d'étudier la forme et la structure numérique des surfaces de niveau terrestre dans leur description géométrique d'une part, dans leurs relations avec la pesanteur et sa direction d'autre part. Elle apporte une attention particulière à la surface d'altitude nulle — le géoïde — coïncidant en moyenne avec la surface des mers et coiffée par le relief.

Au cours de son histoire, la géodésie a procédé par approximations successives.

— La première approximation supposait le géoïde sphérique et de l'antiquité au XVII^e siècle, la valeur de son rayon fut l'inconnue principale.

— Puis les progrès de la théorie et l'amélioration des méthodes d'observation révélèrent des discordances systématiques, montrant qu'un ellipsoïde de révolution, dont la forme et les dimensions numériques firent l'objet de longues discussions, conviendrait mieux.

— En troisième approximation on mit en évidence des écarts entre le géoïde et un ellipsoïde de référence convenablement choisi, que plusieurs méthodes permirent d'évaluer (astronomie de position, gravimétrie, observation des satellites).

L'étude du champ spatial resta toute théorique jusqu'au lancement des premiers satellites artificiels.

...

Les mesures essentielles du géodésien sont :

- des mesures angulaires
- des mesures de distances
- des mesures de pesanteur
- des mesures de poursuite des satellites artificiels.

On recherche la précision maximum qu'autorisent les instruments les plus récents, précision qui a évidemment évolué au cours des temps.

En géodésie, l'expérience isolée n'a pas de sens : le géodésien travaille selon des programmes établis à l'échelon national, international voire mondial ; ses résultats se déduisent du traitement de milliers d'observations accumulées, groupées en ensembles ou réseaux.

La triangulation a été pendant trois siècles son outil essentiel. Un réseau de triangulation est, schématiquement, un treillis de mailles triangulaires coiffant tout un territoire. Sur le terrain, les sommets de ces triangles sont des points en intervisibilité où l'on mesure tous les angles avec les autres sommets du treillis. L'échelle du réseau est assurée par la mesure des longueurs d'un certain nombre de côtés, et le réseau, calé en moyenne sur les coordonnées astronomiques d'un certain nombre de ses points est appliqué par le calcul sur la surface de référence.

Ce calcul définit avec beaucoup de précision les relations métriques entre sommets de ce "lattice".

Le réseau de nivellement fournit les altitudes du relief.

Le réseau gravimétrique couvre d'immenses territoires d'un canevas de points où l'on mesure la pesanteur : c'est un élément important pour le prospecteur. C'était d'autre part, avant le lancement des satellites, et le reste encore, un moyen très remarquable de rapporter la forme réelle du géoïde à celle de la surface de référence par comparaison des valeurs observées de la pesanteur à leur valeur théorique sur la référence (3^e approximation).

L'apparition du satellite artificiel a bouleversé l'édifice ancien : le satellite fait en deux heures, ou moins, le tour complet de la terre et gravite dans l'espace qu'il s'agit précisément de définir. On peut mesurer sa position spatiale à partir de diverses stations terrestres entre lesquelles il établit une liaison générale et simultanée par l'intermédiaire du temps atomique TA 1. Les méthodes de la mécanique céleste permettent de calculer son orbite théorique en fonction des paramètres descriptifs du potentiel terrestre, que

l'on identifie ainsi en fonction du temps et de la position spatiale réelle. Une synthèse d'ensemble permet d'en tirer

- la structure numérique des surfaces de niveau*
- la position précise des stations de poursuite, et dans un avenir très proche de constituer des réseaux locaux relativement étendus avec une précision égale ou supérieure à celle des méthodes classiques.*

La géodésie intervient dans tout ce qui touche à la définition précise des positions terrestres : la navigation, marine ou aérienne, y trouve ses aides, balises, réseaux de radiolocalisation, ses repérages côtiers pour les sondages littoraux.

La description géométrique d'un pays est un catalogue qui fournit les coordonnées précises, géographiques ou planes, des points géodésiques du territoire, auxquels les usagers accrochent leurs levés tant pour les lier à l'ensemble que pour limiter la propagation des erreurs.

- La carte de Cassini repose sur une description géométrique publiée en 1783 mais issue d'une triangulation commencée vers 1733 et terminée vers 1750.*

- La carte de l'Etat Major est basée sur le canevas géodésique des Ingénieurs géographes observé de 1820 à 1860.*

- La nouvelle carte de France au 1/25000 (et les cartes dérivées) s'appuie sur la Nouvelle Triangulation, ensemble d'environ 60 000 points géodésiques, dont les coordonnées sont localement cohérentes à mieux que le décimètre.*

La description géométrique a son existence propre, qui tend à devenir indépendante de la cartographie ; les besoins et les exigences des utilisateurs se sont multipliés : on en vient actuellement à concevoir un cadastre, une description urbaine strictement numériques, avec constitution de banques de données, dont la géodésie est la base à l'échelon national.

Le réseau du XXI^e siècle sera peut-être un réseau mondial, cohérent dans toutes ses parties, établi par mesures sur satellites artificiels.

C'est l'abbé Jean Picard (1620-1682), célèbre astronome, membre de l'Académie Royale des Sciences, qui fut l'initiateur de la géodésie en France. Sans en faire le thème essentiel de leurs recherches, de grands noms en ont souligné l'importance et lui ont apporté des contributions décisives.

C'est à retracer son histoire en ce qui concerne la France, qu'est consacré l'ouvrage qui suit.

XVII - La géodésie spatiale en France depuis 1971

par C. BOUCHER, Institut Géographique National

L'essor de la Géodésie Spatiale en France allait désormais se placer dans le cadre du GRGS, du moins dans sa grande majorité.

Pendant cette dernière quinzaine d'années, ses équipes évoluèrent aussi bien par leurs compositions que leurs localisations géographiques. En 1974 notamment, les groupes du CERGA à Grasse (rattaché jusqu'à 1987 à l'Observatoire de Paris) et du Centre Spatial de Toulouse (CST) du CNES se mettaient en place, laissant en région parisienne ceux du BDL, de l'IGN et de l'Observatoire de Paris (OP).

LES TECHNIQUES

Le développement des techniques largement amorcé avant 1971 se continua, voyant certaines disparaître, comme les mesures photographiques, et d'autres arriver (laser Lune ou VLBI).

Poursuite radio-électrique par effet Doppler

La déclassification du système américain de satellites de navigation dit TRANSIT ou NNSS, avait offert à la communauté géodésique mondiale l'occasion d'exploiter un système de géodésie spatiale accessible en permanence de tout point du globe, indépendamment des conditions météorologiques. En dehors du réseau opérationnel de 4 stations, entretenu par l'US Navy pour le calcul des orbites de satellites Transit que ces derniers rediffusaient en temps réel pour les besoins de navigation maritime, les USA avaient déployé pendant les années 60 un réseau mondial d'une quinzaine de stations permanentes (TRANET) qui poursuivaient les satellites Transit, ainsi que d'autres satellites bas ayant un émetteur Doppler à bord (GEOS...).

Ces données allaient notamment permettre à un laboratoire militaire de recherche, le Naval Weapons Laboratory (NWL), d'établir progressivement des modèles de champ de gravité terrestre et des jeux de coordonnées des stations Tranet de grande qualité. Le NWL put ainsi dès 1971 calculer régulièrement des éphémérides de ces satellites à une précision qui allait vite atteindre le niveau métrique, contre décimétrique pour les orbites en temps réel. Il déterminait aussi les coordonnées du pôle et les envoyait au BIH, hébergé par l'Observatoire de Paris (OP).

Au vu de la qualité de ces résultats, qui se comparaient très favorablement aux déterminations du pôle par astrométrie optique (PZT, astrolabes...), l'OP initia une campagne de mesures Doppler (Trapol).

La campagne se déroula en avril et mai 1972, avec les stations de Brest, Brétigny, Caussols et Paris, avec des récepteurs de navigation. L'écart type estimé des coordonnées résultantes était de 3 m.

La disponibilité commerciale de récepteurs Doppler de terrain, ainsi que les premiers résultats de positionnement géodésique obtenus aux USA et au Canada, incitèrent l'IGN à acheter 6 récepteurs en 1974 (type JMR-1), complétés par deux autres acquis l'année suivante par le GRGS.

Des tests furent entrepris par l'IGN, notamment une campagne de comparaison avec 6 points du réseau géodésique dans le Bassin Parisien, en 1975. La comparaison du positionnement Doppler avec les positions géodésiques est résumée par le tableau ci-dessous :

Campagne JMR France
Comparaison Doppler/Réseau terrestre

Station	Résidu Longitude (m)	Résidu Latitude (m)	Résidu Altitude (m)
Paris	- 0.38	- 0.29	0.01
Bourges	0.02	- 0.26	0.18
Perseigne	0.18	0.54	0.12
Clairy-Saulchoy	- 0.41	- 0.37	- 0.25
May-en-Multien	0.59	0.39	- 0.06
Moyenne quadratique	0.37	0.38	0.15

En complément aux méthodes de traitement dynamique ou purement géométrique développées déjà par le CNES et l'IGN respectivement, cette technique fut l'occasion de développer des méthodes nouvelles appropriées, exploitant le fait que les USA fournissaient des orbites de qualité pour les satellites Transit (radiodiffusées en temps réel, ou précises, calculées a posteriori par le NWL).

L'OP développa un logiciel de calcul du point utilisant ces éphémérides, dans le cadre du traitement de Trapol ; il fut repris par le CNES.

L'IGN développa de son côté un logiciel, ou plutôt une génération de logiciels qui, outre l'option précédente, dite "de point isolé", permettait aussi des corrections orbitales, applicables lorsqu'un réseau de récepteurs fonctionnaient simultanément et observaient les mêmes portions d'orbite. Cette méthode, dite "par arcs courts" était applicable pour des distances inter-stations allant de quelques kilomètres à un millier de kilomètres. Elle avait l'avantage de donner de très bons résultats, même avec l'orbite radiodiffusée.

Il était alors possible de se passer des orbites du NWL, dont la distribution était limitée à des travaux scientifiques. L'exploitation commerciale devenait alors possible en toute indépendance. L'IGN pouvait alors exploiter cette technique pour des travaux à l'exportation (Algérie en 1976, Libye en 1977,...).

Parallèlement, le GRGS prenait une part active dans le développement de campagnes à l'échelle européenne, en collaboration étroite avec l'Observatoire Royal de Belgique et l'Institut für Angewandte Geodäsie (IFAG) en RFA.

Une première campagne européenne de 5 stations (EDOC-1) fut organisée en 1975 :

Bruxelles (B)
Barton-Stacey (UK)
Grasse (F)
Wetzell (D)
Uppsala (S)

auxquelles le GRGS ajouta :

Saint-Mandé (F)
Toulouse (F)

Les données étaient recueillies et prétraitées par le GRGS/CNES à Toulouse, puis furent analysées par ce même groupe, ainsi que l'ORB et le GRGS/IGN.

Cette campagne permit d'obtenir des résultats très intéressants et riches en enseignements :

— La grande quantité de données et la diversité des formats de mesure et des supports (ruban perforé,

cassette magnétique, bande magnétique) montrèrent toute l'importance d'une stricte organisation de la collecte des données produites par les stations et de leur prétraitement afin notamment de fournir aux centres d'analyse des données sur support et format normalisés.

— Les comparaisons des traitements mettaient en évidence, à la fois la qualité globale du positionnement par méthode Doppler (quelques mètres) et l'existence de désaccords entre logiciels, attribuables à la modélisation et aux critères d'élimination des mesures fausses. Là aussi, des comparaisons plus fines étaient nécessaires.

— Enfin, la comparaison avec les coordonnées ED 50 montrait des désaccords plus grands, attribuables aussi bien aux distorsions à grande échelle du réseau européen, tel que l'AMS l'avait déterminé, qu'à des coordonnées incertaines de certaines antennes, dues à un mauvais rattachement d'icelles aux repères voisins connus en ED 50.

Une seconde campagne était alors nécessaire, afin d'approfondir ces enseignements. EDOC-2 eut lieu en 1977 et comporta 39 stations (cf. carte 1).

CAMPAGNES DOPPLER EUROPÉENNES

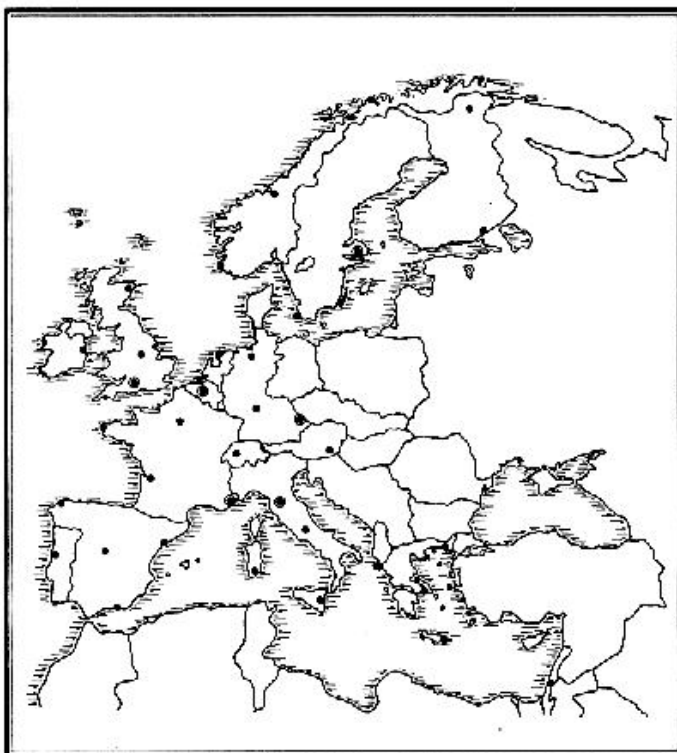


FIGURE 1.

Elle fut co-organisée par l'ORB, l'IFAG et l'IGN, qui jouaient aussi le rôle de centres de calcul. Les résultats finaux permirent en particulier :

— de montrer la consistance entre les logiciels au niveau de 50 cm ;
— de fournir, pour un réseau de 39 stations répar-

tics en Europe, un jeu homogène de coordonnées à un mètre près dans un système géodésique mondial quasi-géocentrique (NWL 9D) ;

de déterminer une formule globale de transformation entre ce système géodésique et le système

ED 50, ainsi que des résidus qui expriment les distorsions de ce dernier système.

Parallèlement, en 1976, l'IGN lança, dans le cadre du GRGS, une campagne Doppler de rattachements intercontinentaux, la campagne LESARD, qui comportait les stations de :

Saint-Mandé, France
San Fernando, Espagne
Toston, Canaries
Dakar, Sénégal
Cayenne, Guyane
Kourou, Guyane
Natal, Brésil (2 stations)

Les objectifs principaux étaient :

- d'obtenir des positions géocentriques de plusieurs radars du CNES (Cayenne-Montabo, Kourou-Diane, Natal) ;
- d'obtenir des paramètres de transformation de systèmes géodésiques avec un système global ;
- d'étudier les performances des méthodes par arcs courts pour des distances de plusieurs milliers de km.

Ces objectifs furent remplis et on disposa désormais d'une maîtrise des applications pour la localisation. Avec quelques jours de mesure, on obtenait 5 m en point isolé avec les orbites radio-diffusées, 1 m avec les orbites précisées, donc sous les conditions restreintes de diffusion du DoD des USA. La méthode par arcs courts donnait quant à elle 50 cm pour des distances n'excédant pas quelques centaines de km. Elle avait l'avantage, en revanche, de pouvoir être mise en œuvre sans aide étrangère.

Il restait désormais au GRGS à développer sa compétence dans l'exploitation dynamique de données Doppler issues d'un réseau global. Plusieurs raisons militaient pour une telle entreprise, dont la faisabilité technique n'était plus à démontrer, grâce aux résultats du NWL, repris par la Defense Mapping Agency (DMA) des USA : détermination du mouvement du pôle, exploitée par le GRGS/QP dans le cadre du BIH, amélioration du champ de gravité (programme GRIM développé ci-dessous), source purement française d'éphémérides précises pour le positionnement. Le projet MEDOC naissait ainsi en 1977.

Le réseau se constituait progressivement à partir de 4 stations françaises, grâce à une coopération internationale. Malheureusement, l'effort de collecte et de prétraitement monopolisait les ressources affectées à ce projet. Il fut alors décidé d'arrêter temporairement en 1980, afin de repartir sur des bases nouvelles. Ceci fut fait en 1984 dans le cadre d'un accord avec la DMA (MEDOC 2). Le GRGS équipa alors les stations de Tahiti, Kerguelen et Kourou de récepteurs Tranet 2, identiques à ceux du réseau Tranet, dont certaines stations étaient communes (cf. carte 2). Les résultats scientifiques arrivèrent enfin, apportant aux programmes GRIM et MERIT des contributions significatives, et surtout permirent de développer l'expertise du trai-

tement dynamique des mesures Doppler. Celle-ci allait être exploitée pour le projet DORIS, mais nous quittons ici l'histoire pour l'activité présente !

Le réseau MEDOC 2 allait récemment être spécialisé à la poursuite d'autres satellites, tels que GEOSAT. Il allait alors servir utilement dans le cadre de coopérations avec les USA.

La technique Doppler, quant à elle, était exploitable pour la localisation dès 1977. Les équipes du GRGS allaient participer à de nombreuses campagnes européennes à objectifs variés :

EROSDOC, colocation avec les stations européennes de télémétrie laser

SEATOC, pour localiser le réseau orbitographique de SEASAT

TIMEDOC, pour localiser avec précision les observatoires européens de temps fréquence

WEDOC 1 et 2, pour une campagne semblable à EDOC, mais incluant des pays d'Europe de l'Est

ALGEDOP, pour déterminer le géoïde en zone alpine

RETDOP, pour déterminer un réseau Doppler de base à inclure dans le réseau géodésique européen (RETRIG).

et d'autres...

A ces campagnes participaient régulièrement une station Doppler semi-permanente à l'Observatoire du Calern, situé sur le plateau du Calern, près de Grasse.

L'IGN, mais aussi d'autres organismes français (SHOM, CGG, compagnies pétrolières...), allaient désormais utiliser en production la technique Doppler, dans le monde entier, pour des besoins géodésiques, cartographiques, hydrographiques ou d'exploitation pétrolière.

De grandes campagnes auxquelles l'IGN et le GRGS allaient prendre une part active seront décrites ultérieurement (EDOREF, ADOS, MERITDOC).

Télémétrie laser sur satellite

La création en 1974 de l'Observatoire du Calern par le CERGA faisait une place importante à sa fonction de station géodésique et géodynamique permanente.

L'installation d'une station fixe de télémétrie laser sur satellite allait être l'élément fondamental de cet observatoire géodynamique.

Cette station était initialement de première génération (précision de 1 m sur la distance). Une station de 2^e génération fut construite ensuite et entra en fonctionnement opérationnel en 1978 (précision 20 cm). Elle fut récemment (1984) modifiée en 3^e génération (précision 2 cm) et est au niveau des meilleures stations laser existant dans le monde.

Cette station participa à une multitude de projets internationaux (MERIT, WEGENER/MEDLAS, Crustal Dynamics, IERS...). On peut estimer connaître la position de cet instrument à 5 cm dans un système de référence géocentrique. Grâce aux colocations avec des stations Doppler, une station laser Lune et avec le réseau géodésique national, cette

Réseau MEDOC

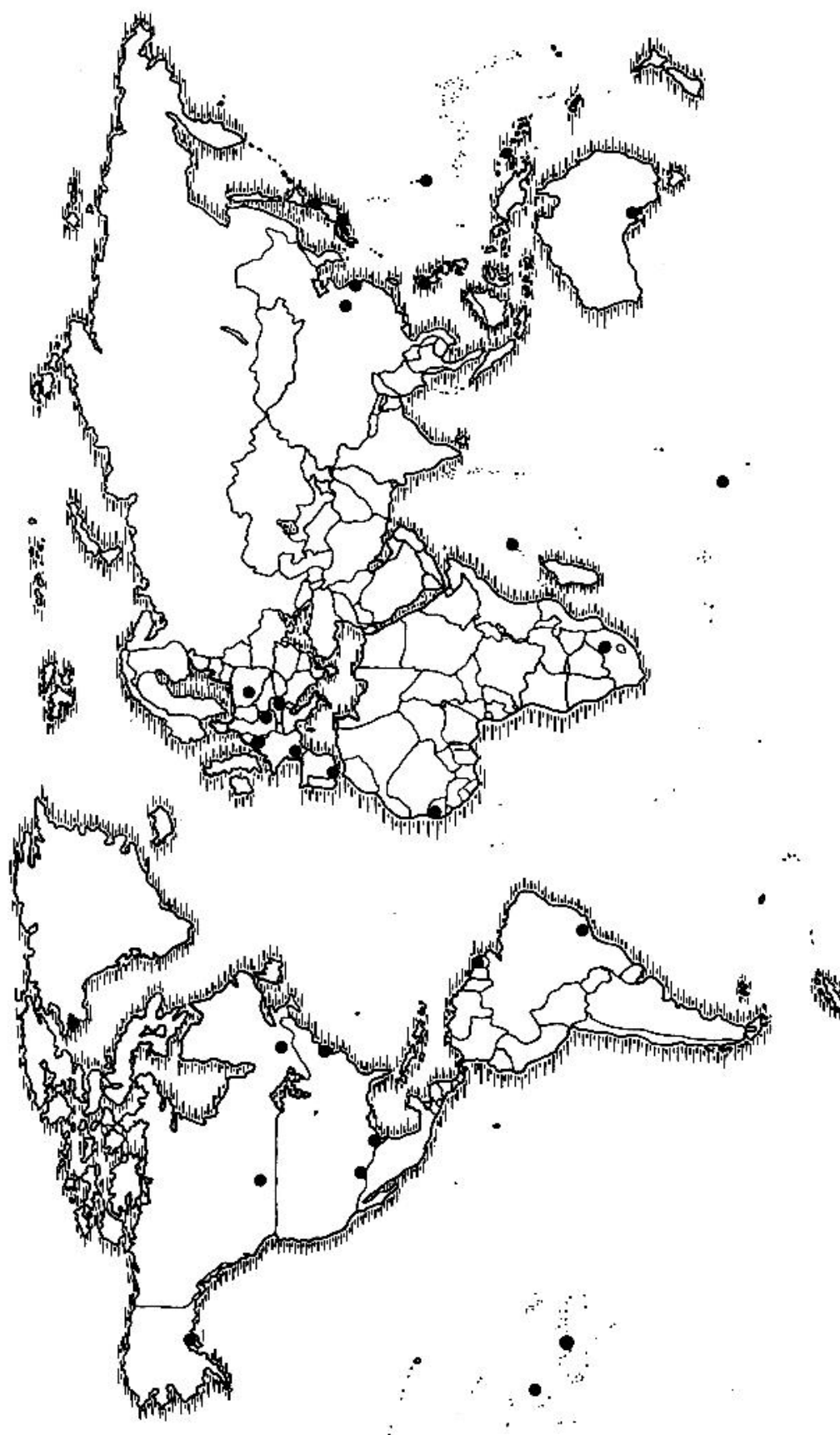


FIGURE 2.

station joue un rôle actuellement unique pour la conversion des données de localisation géodésique d'un système national (tel que NTF) à un système mondial géocentrique. En ce sens, on pourrait dire que la Croix du Panthéon devrait être remplacée par l'intersection des axes du laser satellite du CERGA.

L'activité française dans ce domaine fut aussi marquée par la coopération avec l'Espagne afin d'installer à l'Observatoire de la Marine de San Fernando, près de Cadix, une station de télémétrie laser, provenant de celle de 1^{re} génération du CERGA, et surtout par le lancement en février 1975, par le CNES, du premier satellite optimisé comme cible laser, STARLETTE, sphère de rétro-réflecteurs, avec cœur d'uranium, soit un diamètre

de 26 cm, en colocation avec les télémètres laser sur satellite. Les développements de cette station furent longs et délicats. Les premiers échos furent recueillis en 1981, et cette station fonctionna alors régulièrement dès 1982, avec une précision de 20 cm, sur une distance de près de 400 000 km. Elle fut très récemment transformée (1987) afin d'atteindre la précision de quelques centimètres !

Cette station a fourni une contribution fondamentale à la Mécanique du Système Terre-Lune, et à la Géodynamique en particulier (rotation de la Terre, position géocentrique du télémètre...). Elle participa en particulier à diverses campagnes internationa-

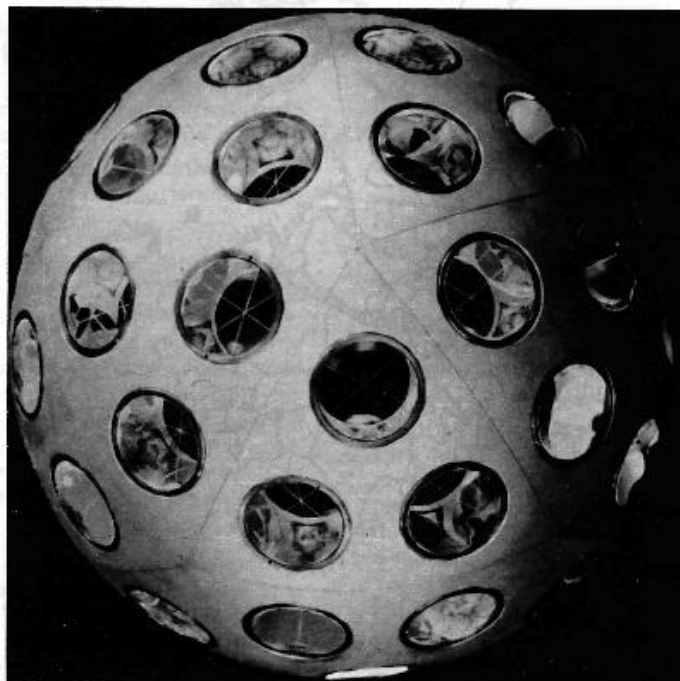


FIGURE 3.

Le satellite français STARLETTE.

© CNES

de 26 cm pour une masse de 47 kg. Ce lancement fut suivi de près par celui de LAGEOS par les USA, plus gros et surtout placé sur une orbite plus haute (6 000 km au lieu de 900 km pour STARLETTE). (Fig. 3).

L'activité laser satellite du GRGS ne fait que se développer et s'intensifier avec deux projets importants : lancement en 1991 d'une réplique de STARLETTE sur orbite polaire, STELLA ; et construction d'une station laser ultra-mobile, facilement transportable en tout point du globe et aisée de mise en œuvre.

Télémétrie laser sur la Lune

La télémétrie laser allait aussi pouvoir être appliquée à la mesure de distances Terre-Lune grâce à l'installation sur le sol lunaire de rétro-réflecteurs, par les missions Apollo et Lunakhod.

Après une phase de développement menée à l'Observatoire du Pic du Midi, vers 1971, il fut décidé de construire un tel instrument à l'Observa-

toire du Calern, en colocation avec les télémètres laser sur satellite. Les développements de cette station furent longs et délicats. Les premiers échos furent recueillis en 1981, et cette station fonctionna alors régulièrement dès 1982, avec une précision de 20 cm, sur une distance de près de 400 000 km. Elle fut très récemment transformée (1987) afin d'atteindre la précision de quelques centimètres !

Altimétrie radar par satellite

Une nouvelle technique de géodésie spatiale allait voir le jour lors d'un vol de Skylab en 1974 : l'altimétrie radar embarquée sur satellite. On allait pouvoir, au-dessus des océans, mesurer la différence d'altitude entre le satellite porteur et le niveau instantané de la surface de l'eau avec une précision décimétrique, et bientôt centimétrique !

Le GRGS, grâce à une coopération privilégiée avec les USA, notamment en leur offrant un soutien pour la poursuite de ces satellites, put bénéficier des données des diverses missions de ce type que ce pays organisa : GEOS-3 (1975), SEASAT (1978) et récemment GEOSAT.

L'exploitation de ces données allait avoir des répercussions de premier ordre en géodésie (géoïde fin sur les océans, anomalies de gravité associées...), géophysique (structure de la lithosphère océani-

que...) et océanographie (courants, marées, état de la mer...).

L'impact de ces missions, ainsi que la nécessité de les répéter dans le temps avec des orbites différentes, afin de couvrir le spectre spatio-temporel des phénomènes, a conduit à de nouveaux projets auxquels la France est étroitement associée : TOPEX/POSEIDON en coopération USA-France et ERS-1 de l'Agence Spatiale Européenne.

Accélérométrie — gradiométrie

En dehors des mesures qui relient des stations terrestres à un satellite, de nouvelles techniques allaient apparaître et fournir des informations in situ au niveau des satellites.

C'est le cas des mesures accélérométriques, réalisées à bord d'un satellite par la France en 1975, grâce au lancement de CASTOR qui emportait un instrument développé par l'ONERA (CACTUS). L'extrême sensibilité (10^{-9}) des mesures des forces non gravitationnelles qui s'exerçaient sur CASTOR a permis d'améliorer notre connaissance des modèles d'atmosphère. Ces études, menées au GRGS/CERGA, ont débouché sur un nouveau modèle, DTM, internationalement accepté.

Par ailleurs, l'ONERA poursuit ses études, notamment sur un gradiomètre spatialisable, c'est-à-dire un ensemble d'accéléromètres proches, dont les mesures fournissent en différentiel le tenseur de gradient de gravité au niveau du satellite. Cet instrument devrait voler un jour, dans une mission baptisée GRADIO, que la France souhaite réaliser avec ses partenaires européens et américains dans un proche avenir.

Interférométrie à longue base

La communauté géodésique du GRGS avait très tôt remarqué toute la puissance de l'interférométrie à longue base (VLBI). Malheureusement, la non disponibilité de l'aide des radios-astronomes français qui avaient choisi, contrairement à bien de leurs collègues étrangers, d'autres priorités que le VLBI, empêcha un développement rapide en France, et en particulier, aucun projet aboutissant à un radiotélescope adapté ne fut mené à bien. C'est largement grâce aux pressions exercées par des projets spatiaux, à savoir le satellite HIPPARCOS et les sondes VEGA, que se créa un certain nombre de développements instrumentaux (masers à hydrogène, systèmes d'enregistrement Mark 2), utilisables sur une antenne existante, grâce à l'Observatoire de Meudon et le Laboratoire de l'Horloge Atomique à Orsay, ainsi surtout qu'une compétence dans le traitement des données VLBI, conjointement développée aux GRGS/BDL et IGN. Ces groupes, grâce notamment à une coopération des USA (NASA et Jet Propulsion Laboratory) purent également organiser une première campagne française en VLBI en été 1985, avec des stations connues (Onsala, Madrid, Pretoria) et deux nouvelles, équipées par le GRGS : Nançay en France et Atibaia au Brésil.

Par rapport aux systèmes les plus performants qui offrent une exactitude de quelques centimètres, on peut estimer les positions issues de cette campagne VLBI à 20 cm. Ce fut là un résultat remar-

quable, qui donnait d'emblée au seul radiotélescope français disponible, Nançay, une position quasi ultime par VLBI, compte tenu de ses caractéristiques limitées en fréquence et en mouvement (monture méridienne).

Ce groupe, reconnu comme investigateur du programme Crustal Dynamics de la NASA, essaya récemment de pousser en avant des projets qui aboutiraient à la disponibilité d'une antenne capable de participer aux réseaux VLBI, mais en vain jusqu'à présent ! En revanche, il peut organiser un certain nombre de campagnes d'observation VLBI qui devraient apporter des contributions sensibles aux rattachements des systèmes de référence terrestres (connexion des réseaux DSN du JPL et NASA-NGS) et célestes (radio-étoiles pour HIPPARCOS, pulsars milliseconde...).

Le Global Positioning System

Dans les années 1970, les USA allaient définir un nouveau système mondial de navigation à base spatiale, afin de donner une réponse universelle aux divers besoins des armées. Ce système, dit NAVSTAR-GPS, devait fournir une position instantanée de 20 m à tout point, fixe ou en mouvement, et les USA prévoyaient alors que vers 1990, lorsqu'il serait pleinement opérationnel, il remplacerait définitivement le système Transit. Ne serait-ce que pour cette raison, les géodésiens allaient vite s'intéresser à ce système, et allaient alors découvrir des utilisations potentielles qui allaient faire de GPS un outil que certains voient maintenant comme universel !

Après avoir suivi les premières études, l'IGN acquit en janvier 1985 son premier récepteur GPS (français ! SERCEL TR5S), suivi du CEA, du SHOM, de l'IPG... Après avoir développé les moyens de traitement nécessaires à une exploitation géodésique de GPS, et les avoir testés sur certains réseaux (CERN et TURTMAN en Suisse), l'IGN entreprit dès 1986 diverses campagnes, notamment une nouvelle jonction franco-anglaise. Celle-ci avait plusieurs buts (cf. figure 4) :

- renforcer les jonctions existantes ;
- apporter dans la région du Tunnel sous la Manche des informations complémentaires, notamment en altimétrie ;
- étendre la jonction en Bretagne et Cornouailles ;
- rattacher ce réseau à un système mondial, en stationnant les points de Herstmonceux (laser satellite) et Chilbolton (VLBI) ;
- rattacher plusieurs marégraphes afin d'y déterminer la position du niveau moyen des mers par rapport au centre des masses (applications pour l'altimétrie radar, en particulier).

Les rattachements pénibles de 1951 et 1963 étaient refaits en quelques jours, et avec une précision accrue ! C'est déjà l'histoire de demain que nous risquons d'écrire ici... laissons-là pour plus tard.

LES DOMAINES D'APPLICATION

Le développement des techniques de géodésie

Campagne d'observations GPS

Ordnance Survey et Institut Géographique National

Aout 1986

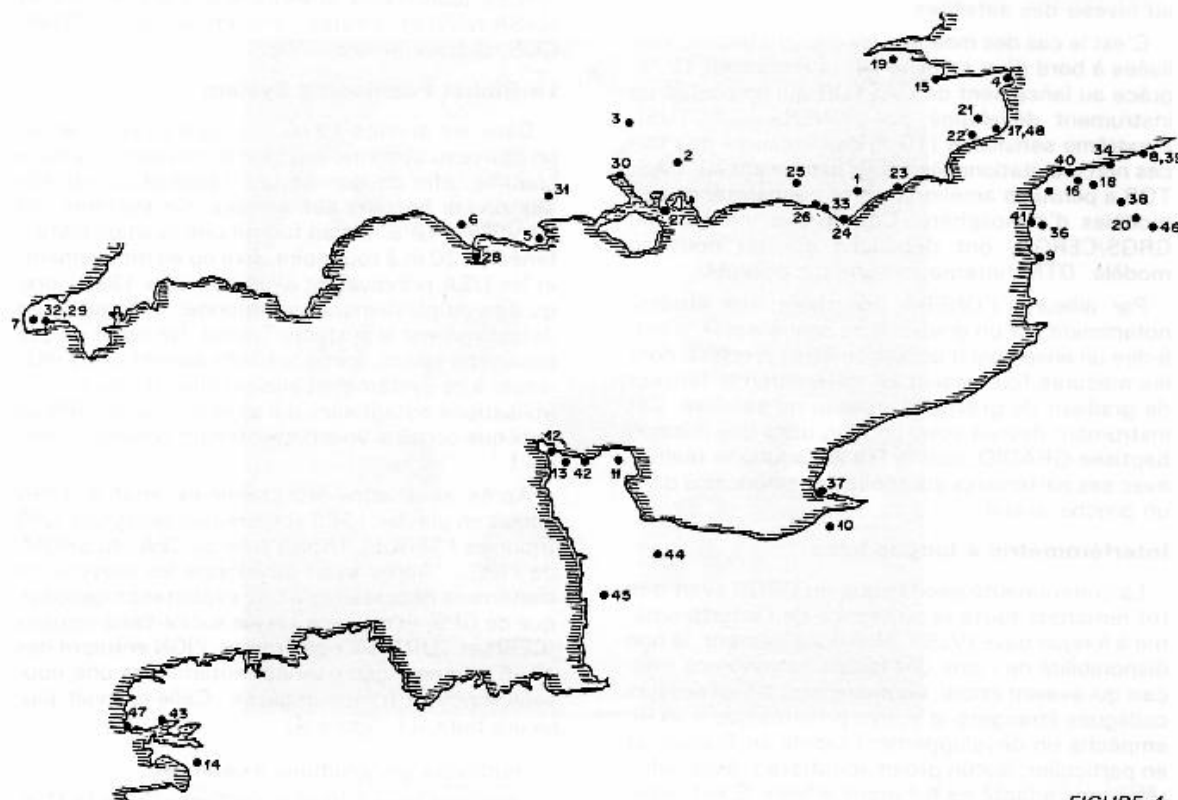


FIGURE 4.

spatiale a permis celui d'un certain nombre de domaines, soit en complément de techniques traditionnelles, soit en générant de nouveaux thèmes d'étude au sein du GRGS. C'est ce que nous allons esquisser brièvement maintenant.

Systèmes de référence

La détermination précise de positions à la surface topographique, l'étude des déformations de l'écorce, ainsi que celle de la rotation diurne de la Terre, nécessitent la définition et la réalisation de systèmes référence terrestres et célestes. Ce domaine commun à la Géodésie et à l'Astronomie fondamentale a fait l'objet de recherches intenses au sein du GRGS.

La présence du Bureau International de l'Heure (BIH) au sein du GRGS, l'existence de la campagne MERIT, initiée en 1978 afin de comparer les méthodes de détermination de la rotation terrestre, ainsi que de la campagne COTES, rajoutée à MERIT afin de mieux étudier les systèmes de référence sous-jacents et leurs inter-relations, ont été autant d'éléments moteurs à ces études.

Le GRGS a eu un rôle privilégié car il a pu exploiter, dans ce cadre, sa connaissance des diverses techniques : laser satellite, laser lune, Doppler avec notamment MEDOC, VLBI...

L'étude des systèmes célestes fut très active, utilisant aussi bien les travaux de mécanique céleste

du BDL, les études de rattachement du futur système Hipparcos, que les travaux tout récents sur les pulsars milliseconde.

L'étude des systèmes terrestres, leurs comparaisons et leurs combinaisons, fut développée depuis 1984 au GRGS/IGN, exploitant les données recueillies à de nombreuses sources, notamment par le BIH dans son rôle de coordinateur de MERIT. Il fut alors possible de construire une réalisation du système terrestre du BIH, désormais constituée de coordonnées géocentriques de stations de géodésie spatiale. Depuis 1984, un jeu de coordonnées est publié annuellement par le BIH.

La qualité des travaux français en ce domaine a été couronnée par la communauté internationale qui a confié à une équipe du GRGS (OP + BDL + IGN) le Bureau Central du tout nouveau (janvier 1988) Service International de la Rotation de la Terre (SIRT), qui succède au BIH sur des bases nouvelles issues des résultats de MERIT/COTES.

Rotation de la terre

L'implantation en France du BIH avait entretenu un intérêt soutenu pour l'étude de la rotation de la terre. Le BIH suscita des campagnes comme TRAPOL, MEDOC ou EROLD. Mais comme nous l'avons déjà mentionné, c'est dans le cadre de la campagne internationale MERIT que ces travaux s'intensifiaient, aussi bien sur le plan numérique que théorique. Des relations nouvelles s'installèrent : avec les météorologues pour l'influence de l'atmosphère sur les variations à court terme de la rotation terrestre, avec les géophysiciens internes pour le géomagnétisme et l'excitation sismique.

Cette activité ne devrait que s'amplifier en France, grâce au SIRT ou à l'apparition de nouvelles techniques (par exemple, le gravimètre supra-conducteur de l'IPG de Strasbourg).

Champ de gravité

L'application des méthodes dynamiques pour le traitement des données de poursuite de satellites artificiels, à des fins de géodésie ou de calcul d'orbite, nécessite une amélioration permanente des modèles des forces qui influencent le satellite. Le champ de gravité, avec son importance et ses irrégularités, est l'un des points critiques de cette modélisation.

Aussi le GRGS entreprit-il, dès 1974, une coopération avec l'Institut Allemand de Recherches Géodésiques (DGFI) de Munich, afin de déterminer de tels modèles de champ de gravité, connus sous le nom de GRIM. C'était le premier effort de ce type en dehors des USA ! L'utilisation des données de poursuite de divers satellites et de gravimétrie de surface permet progressivement d'améliorer les modèles, fruit de traitements longs et coûteux : GRIM-1 en 1975, GRIM-2 en 1976 et GRIM-3 en 1983.

GRIM-4 va prochainement sortir. L'inclusion de nombreuses données Doppler recueillies grâce à la campagne MEDOC en est un point fort par rapport à d'autres.

Là encore, l'existence en France d'un service international, successivement à Paris et Toulouse, lui aussi membre du GRGS, le Bureau Gravimétrique International (BGI), allait dynamiser cette activité.

Réseaux géodésiques

L'apport particulier de la géodésie spatiale pour les réseaux est la possibilité d'établir un canevas à large maille (des centaines de km !) dans un système mondial géocentrique, allant de 1 m (Doppler) à quelques cm (laser ou VLBI !) : bien sûr, les stations de haute précision (mieux que 10 cm, par laser ou VLBI) restent peu nombreuses (cf. carte 5).

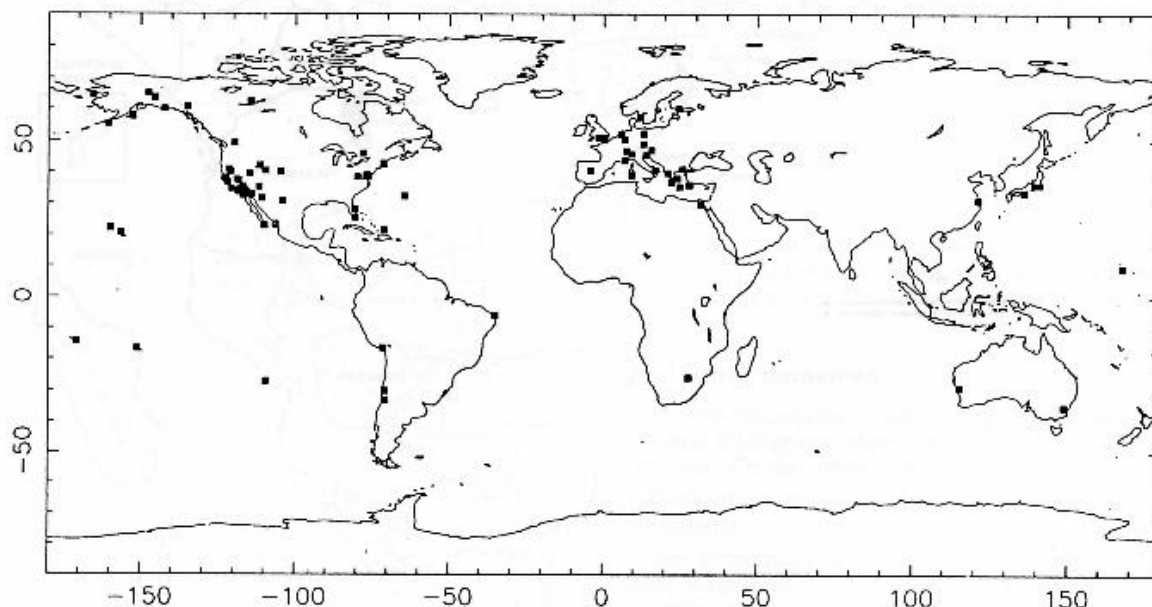


FIGURE 5.

tandis que les stations réalisées par Doppler se comptent par centaines. D'importantes campagnes Doppler pour réaliser des réseaux "d'ordre zéro" furent entreprises : en France (EDOREF), grâce au GRGS et à l'IGN en particulier, en Europe (campa-

gnes déjà mentionnées), mais aussi dans le monde (DOM-TOM et étranger), notamment le réseau Doppler continental africain (ADOS), pour lequel l'IGN réalisé à lui seul 70 stations sur un total de 300 (cf. carte 6).



Deux grands types d'applications aux réseaux s'offraient alors :

— La comparaison d'un réseau de référence issu de la géodésie spatiale à un réseau géodésique traditionnel permet de déterminer la transformation entre le système géodésique terrestre local ou national et un système mondial, géocentrique et homogène, ainsi que les distorsions résiduelles du système terrestre. La carte ci-jointe montre celles du réseau français officiel (NTF). Fig. 7.

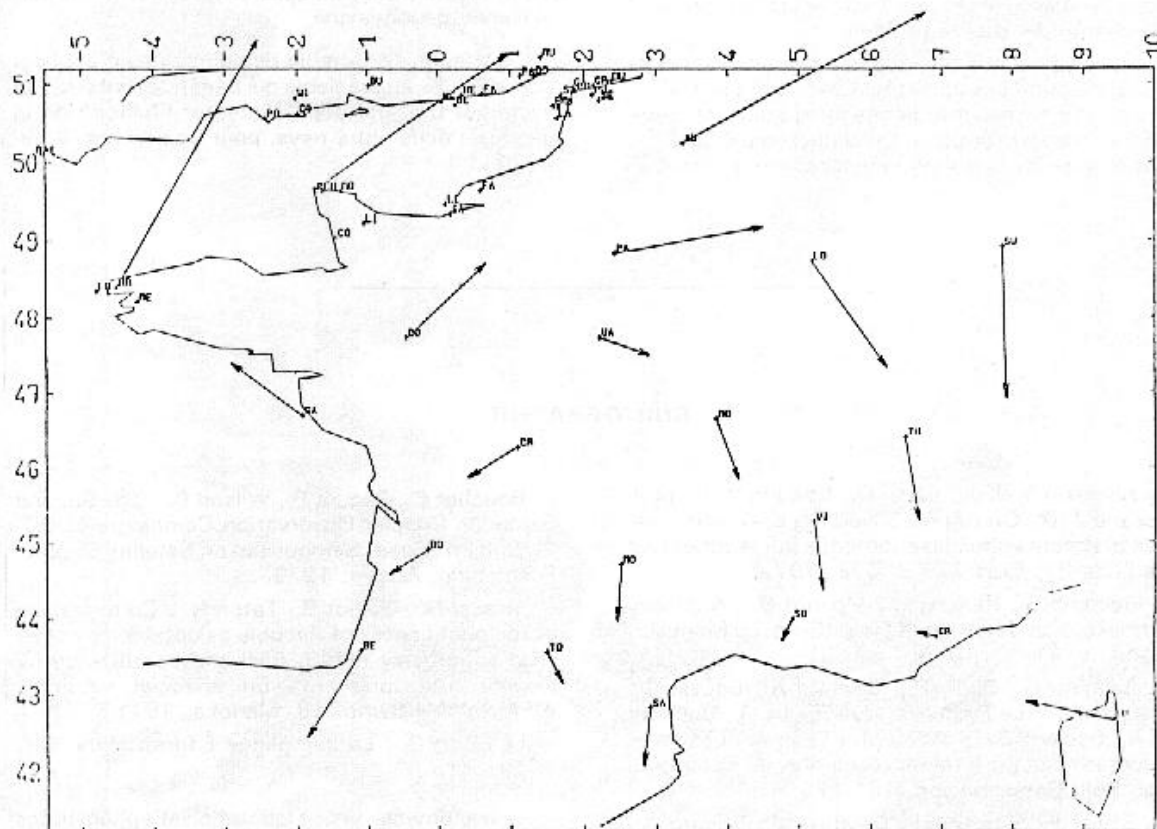


FIGURE 7.

Echelle : 0 1m

— La combinaison des données spatiales et terrestres permet de déterminer tous les points des réseaux dans un système géodésique mondial, géocentrique et homogène.

La commission RETRIG a ainsi terminé provisoirement sa tâche en publiant des coordonnées européennes (ED 87) supposées à quelques décimètres, dans un système parfaitement relié à un système mondial. C'est grâce à un ensemble de points laser et VLBI, d'ailleurs calculés par l'IGN pour le compte de RETRIG, que ce résultat a pu être atteint.

Les systèmes tels que GPS vont alors permettre très prochainement de multiplier les points de référence de précision de quelques centimètres. Il sera alors possible de déterminer les réseaux à cette précision, dans un système mondial géocentrique !

Réseaux géodynamiques

Les techniques spatiales allaient enfin pouvoir, par leur grande précision, déterminer des déplacements de la croûte :

— Sur le plan mondial, le programme Crustal Dynamics de la NASA, auquel le GRGS participe, allait fournir les premières valeurs des déplacements de plaques sur quelques années, grâce au laser sur LAGEOS ou au VLBI ; un bon accord avec les modèles géologiques, sauf aux zones frontières ou actives ;

— sur un plan local, des réseaux de surveillance furent enfin établis par géodésie spatiale, grâce à GPS : Djibouti, Pyrénées... sous l'impulsion de l'IPG de Paris.

et d'autres domaines...

Les techniques développées dans ce cadre allaient s'avérer d'un grand intérêt pour des communautés voisines. Ce qui mériterait une étude en soi.

Contentons-nous d'énumérer les points les plus marquants :

— Les techniques radio-électriques (GPS, VLBI) ou laser (expérience LASSO) permettent la synchronisation d'horloge à distance à quelques nanosecondes !

— Le géoïde fin en mer, tel qu'il peut être déterminé par l'altimétrie radar, fournit des informations très riches et systématiques sur la structure de la lithosphère océanique.

— L'altimétrie radar, conjointement à une orbite précise du satellite et à un modèle fin de géoïde océanique, permet de déterminer le signal océanographique dans son spectre spatial et temporel à la précision de quelques centimètres !

— Enfin, les techniques de géodésie spatiale se transposent progressivement de la Terre aux autres planètes du système solaire. Le GRGS/BGI a ainsi déterminé avec le JPL, en 1982, un modèle élaboré du champ de gravité de Mars !

On voit ainsi que ces récentes années ont vu une diversification des activités. Celle-ci n'a pas néanmoins fait diminuer la géodésie spatiale de base, en fait, tout au contraire. Un seul exemple conclura cet exposé des récents développements français

dans cette matière : le CNES, avec la collaboration du GRGS et de l'IGN, a développé un nouveau système original de poursuite radio-électrique de satellites bas (type SPOT) : le système DORIS. Un premier vol doit avoir lieu sur SPOT-2, en 1989. En plus de ses performances orbitographiques, ce système, également prévu sur TOPEX/POSEIDON et SPOT-3, doit fournir un positionnement géodésique à mieux que 10 cm dans un système mondial, ainsi qu'un positionnement relatif de précision largement comparable à GPS. De plus, son caractère ascendant (balises émettrices et mesures à bord) fait qu'il est particulièrement adapté à la surveillance géophysique.

C'est donc l'ensemble des domaines d'application évoqués au préalable qui bénéficieront d'un tel système. De quoi donc alimenter l'histoire de la géodésie dans notre pays, pour un prochain amateur !

BIBLIOGRAPHIE

— Abalakin V. K., Calame O., Kokurin Y.-L., Mulholland J.-D., Orszag A., Silverberg E.-G. : Analyse des premiers échos laser obtenus sur le réflecteur de Luna 21. *Cras* 276 B, 673, 1973.

— Balmino G., Reigber C., Moynot B. : A geopotential model determined from (Grim 1). *Manuscr. Geod.* 1, 41-69, 1976.

— Balmino G., Barlier F., Bernard A., Bouzat C., Ducasse M., Le Pichon X., Letoquart D., Runavot J.-J., Sacleux B., Souriau M. : Le projet Gradio et la détermination à haute résolution du géopotential. *Bull. Géod.* 58, pp. 151-179, 1984.

— Barlier F., Bouttes J., Delattre M., Olivero A., Contensou P. : Expérimentation en vol sur satellite d'un accéléromètre de très haute sensibilité. *Cras*, 281 B, 145-148, 1975.

— Biraud F., Boucher C., Rosolen C. : Future plans for French VLBI project : scientific perspectives and technical capabilities. *Proc. IAG Symp. n° 5 on Geodetic Applications of Radio-Interferometry*, pp. 302-306.

— Boucher C. : Methodology and field tests of GDOP, a geodetic computation package for the short arc adjustment of satellite Doppler observations. *Int. Geod. Symposium on Satellite Doppler Positioning*, Las Cruces, 1976.

— Boucher C., Feissel M. : Realization of the Bih terrestrial system. *Prés. à Intern. Symp. on Space Techniques for Geodynamics*, Sopron, Hongrie, 1984.

— Boucher C., Nard G. : Capabilities of the TR5S Sercel GPS receiver for precise positioning. *GPS Symposium*, Rockville, USA, 1985.

— Boucher C., Paquet P., Wilson P. : The Second European Doppler Observation Campaign (EDOC-2). *2nd Int. Geod. Symposium on Satellite Doppler Positioning*, Austin, 1979.

— Feissel M., Guinot B., Taton N. : Comparaison of the coordinates of the pole as obtained by classical astrometry (IPMS, BIH) and as obtained by Doppler measurements on artificial satellites (DPMS). *IAU Symp. 48*, Marioka, 1971.

— Le Cocq C. : La campagne Edoref. *Note IGN*, 1979.

— Lewandowski W. : Elaboration d'éphémérides de satellites Transit en vue de leur utilisation dans une méthode d'arcs courts. *Thèse ENSG*, St-Mandé, 1979.

— Nouel F. : Campagne Edoc. 27^e Journées Luxembourgeoises de Géodynamique, *Rapport GRGS*, 1975.

— Petit G., Lestrade J.-F., Boucher C., Biraud F., Rius A., Nothnagel A. : Positionnement par interférométrie sur radio sources des stations de Nancy et Atibaia dans un système de référence terrestre. *CR Acad. Sc. Paris*, t. 303, série II, n° 20, 1986.

— Reigber Ch., Balmino G., Moynot B., Mueller H. : The Grim-3 Earth gravity field model. *Manuscripta Geodaetica*, 8, pp. 93-138.

— Veillet C., Pierron F., Mangin J.-F., Barlier F. : Progrès récents et perspectives en télémétrie laser sur la Lune et sur satellites en France. *Note soumise aux CR Acad. Sc. Paris*.

