

Trois cents ans de géodésie française (suite)

par J.J. LEVALLOIS
Ingénieur Général Géographe

XV - De 1945 à l'ère spatiale (suite)

GRAVIMETRIE

La valeur de la pesanteur intervient dans la métrologie d'un certain nombre de grandeur physique :

- la définition de la pression atmosphérique
- celle du point d'ébullition de l'eau dans l'échelle internationale des températures
- la définition de l'ampère, etc...

on font appel.

Mais la géodésie et la prospection sont les clients principaux de la gravimétrie et, par la même occasion, fournissent éventuellement aux laboratoires des valeurs de la pesanteur suffisamment précises pour les travaux de routine.

Développement des mesures après 1945

Rappelons qu'en 1909 l'ancienne Association Géodésique Internationale avait décidé d'adopter une valeur de référence unique de la pesanteur à laquelle on se rallierait par des mesures relatives, à savoir :

$g = 9.81274$ (S.I.) $g = 981.274$ (C.G.S.)
en un point précis à l'Observatoire de Potsdam.

Ce choix définissait le "système de Potsdam".

Dans l'intervalle des deux guerres, ou peu après, on avait construit des appareils pendulaires perfectionnés assurant aux mesures relatives de la pesanteur une précision de l'ordre du milligal, par rapport à la station fondamentale :

- les pendules de la Gulf Research and Development Company (1932)
- les pendules de Cambridge (Lennox - Conyngham - 1930)
- les pendules de la Commission géodésique Italienne (1954)

et quelques autres, avait supplanté les pendules de Stuckrath, Sterneek, Mioni et opéré de nombreuses liaisons...

A partir de 1946 de très bons gravimètres, Worden, North American, Western, Askania, Lacoste Romberg, etc... donnant le 1/10 de milligal significatif ou mieux à la lecture furent lancés sur le marché des prospecteurs et des gravimétristes.

Ce sont de très remarquables instruments d'interpolation, beaucoup plus sensibles que les pendules ; leur emploi exige des soins méticuleux mais il est sûr. En dehors des précautions opératoires proprement dites, les lectures de ces gravimètres doivent être corrigées de la dérive (fermeture en circuit fermé, fonction linéaire du temps) et d'une correction d'étalonnage dont le but est d'exprimer en milligals vrais la différence des lectures L_A , L_B de

cadran faites en deux stations A et B - cette correction d'étalonnage est considérée, sauf cas spéciaux, comme fonction linéaire de la lecture : le coefficient K dit coefficient d'étalonnage est donné

par $K = \frac{g_B - g_A}{L_B - L_A}$ en valeur moyenne.

On applique également des corrections de marées terrestres qui atteignent des valeurs sensibles aux gravimètres. Elles sont mises en tables, basées sur une formulation assez complexe.

Mais le milligal vrai est-il accessible ? C'est tout le problème.

Pour calculer une valeur correcte de ce coefficient d'étalonnage à 10^{-7} près, il faudrait connaître avec la même précision les quantités g_A , g_B , ce que les mesures relatives au pendule ne peuvent pas donner. On en vient alors à la conception suivante : en établir une valeur moyenne sur un ensemble de stations pendulaires et déduire simultanément, compte tenu de la valeur de ce coefficient **supposé constant**, l'ensemble des corrections à apporter aux valeurs g de la pesanteur observée aux stations pendulaires, sauf bien entendu à la station fondamentale. Ceci se traduit par un système de relations d'observations linéaires qui, traité par une méthode de résolution, donne k et les appoints dg aux valeurs pendulaires g de la pesanteur. Bien entendu, on peut envisager le problème à une beaucoup plus grande échelle, en employant plusieurs gravimètres sur le même réseau.

Inversement si l'on donne la valeur correcte — ou réputée telle — du coefficient d'étalonnage, on peut extrapoler les mesures et écrire que l'accélération de la pesanteur au point B, relativement au point A, est égale à :

$$g_B = g_A + K (L_B - L_A)$$

et élaborer ainsi un réseau gravimétrique **rapporté à l'origine g_A et au coefficient d'étalonnage K** du gravimètre utilisé.

Les mesures pullulèrent :

- les campagnes de prospection fine se multipliaient
- des expéditions à caractère scientifique se lançaient dans des explorations lointaines
- les scientifiques se livraient à des études leur permettant d'entrevoir de très importants résultats : forme de la terre par la formule de Stokes, études générales de tectonique, etc...

Chacun étalonnait son gravimètre au mieux sur les stations connues et extrapolait les résultats. Il en résulta, comme toujours, une prolifération de réseaux indépendants, fort corrects en soi, mais sans liaison d'ensemble, qui révélaient sur les stations communes des discordances inacceptables

dépassant de loin les erreurs possibles, interdisant toute synthèse générale.

Il fallait intervenir si l'on voulait éviter des déboires et pour cela uniformiser.

En 1953 la Commission Gravimétrique internationale, organe de l'Association Internationale de Géodésie, prit la décision de sélectionner un nombre limité de stations bien réparties, pour constituer un réseau mondial de 1^{er} ordre, d'y mesurer la pesanteur avec les appareils pendulaires garantissant la précision maxima et avec les meilleurs gravimètres (faible dérive, coefficient d'étalonnage constant). Le but était de définir une référence mondiale homogène, servant de réseau d'appui à tous usagers.

On fit choix de 3 bases principales d'étalonnage :

- une base européenne de Catane (Sicile) à Hammerfest (Cap Nord)

- une base américaine d'Ushuaia (Patagonie) à Point Barrow (Nord Alaska)

- une base du Pacifique de Christchurch (Nouvelle Zélande) à Sapporo (Japon, Hokkaïdo) sur lesquelles les gravimétristes entreprirent leurs mesures.

Le plan de travail prévoyait également des liaisons transversales entre ces bases, pour assurer l'unité d'ensemble.

Commença alors entre organismes participants une course frénétique aux liaisons mondiales, les opérateurs sautant d'un avion dans un autre, parce qu'il fallait faire vite pour éviter la dérive, mesuraient *g* aux aérodromes, laissant aux organismes nationaux, le soin d'établir la liaison avec la station principale.

Pendant ce temps on procédait à des compensations partielles qui permettaient d'homogénéiser les réseaux nationaux ou internationaux (Europe), de déceler les liaisons douteuses, de mettre au point la pondération gravimètres-pendules, etc...

A titre d'exemple nous donnons ci-dessous les valeurs observées par C. Mazzon (1960) sur la base Hammerfest - Catane et les valeurs d'une compensation générale du réseau pendulaire européen (M. Kneissl - 1963).

	C. MAZZON	M. KNEISSL	
Hammerfest	982 633,66	982 632,36	
Bodö	982 387,83	982 387,29	
Oslo	981 928,67	981 927,29	
Copenhague	981 558,49	981 557,91	
Bad Harzburg	981 180,99	981 180,40*	
Paris		980 940,86	980 943 LEJAY-CORON 1950
Milan	980 565,00*	980 565,36	
Bologne	980 450,30		
Rome	980 364,13	980 364,36	
Catane	980 046,75	980 047,08	
* valeur prise comme origine			

Le Bureau Gravimétrique International tenait le catalogue général.

Le système restait celui de Potsdam. Mais un fait nouveau vint vers 1960 bouleverser la donne : les métrologistes venaient de mettre au point des appareils permettant en laboratoire la mesure absolue de la pesanteur avec une précision dépassant de loin les précisions antérieures.

Changement dans la définition de certaines unités de mesure

Le mètre fut pendant longtemps défini comme la distance séparant deux traits gravés à la surface d'un étalon matériel conservé sous triple serrure au Bureau International des Poids et Mesures (Sèvres). La comparaison d'une longueur de ce mètre étalon ou à une copie pouvait se faire à une précision de l'ordre de 10^{-7} (le dix millième de millimètre) dans les meilleures conditions.

Les progrès de la physique et les exigences de la pratique amenèrent peu à peu les physiciens métrologistes à étudier l'emploi d'un nouveau phénomène indéfiniment reproductible et susceptible d'une matérialisation expérimentale plus précise. En 1960, la Conférence Générale des Poids et Mesures décidait : (63)

"Le mètre est la longueur égale à 1 650 763,73 longueurs d'ondes, dans le vide, de la radiation correspondant à la transition entre les niveaux $2p_{10}$ et $5d_5$ de l'atome de krypton 86...". L'avantage de cette définition était de substituer aux pointés sous microscope, la comparaison des longueurs d'ondes entr'elles, opération très précise.

Elle permettait d'atteindre une précision de l'ordre de 10^{-8} ou mieux.

La seconde de temps fut longtemps définie par l'astronomie comme la 1/86400 fraction du jour solaire moyen ; or nous avons vu que les horloges à quartz des principaux observatoires décelaient des variations concomitantes dans sa durée. Comme on avait de fortes raisons de supposer qu'au point de vue de la théorie mathématique, le paramètre temps de la mécanique était mieux représenté par les vibrations du quartz, on décida de renoncer au jour solaire moyen. On y substitua d'abord en 1956 une définition théoriquement plus satisfaisante... "La seconde est la fraction 1/31556925,9747 de l'année tropique pour 1900", c'est ce que l'on nomma la seconde du "temps des Ephémérides". Elle était malheureusement très difficilement accessible.

Finalement, une comparaison entre les mesures astronomiques et les réalisations des laboratoires amena en 1967 la Commission Générale des Poids et Mesures à définir la seconde comme "durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la "transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de Césium 133..." ce qui ramenait la mesure des intervalles de temps à une comparaison de fréquences et à un comptage : il existe des horloges à Césium.

Depuis 1983 une nouvelle définition du mètre impliquant en fait celle de la seconde a été adoptée "le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de

1/299 792 458 de seconde'', la vitesse de la lumière étant considérée comme définitivement fixée à 299 792 458 mètres par seconde.

Mesures absolues : les nouvelles définitions et leurs conséquences métrologiques expérimentales allaient permettre de réaliser en gravimétrie scientifique des progrès considérables.

Les métrologistes entreprirent la mesure absolue de la pesanteur par observation de la chute des corps.

Les premières expériences furent entreprises à peu près simultanément par Ch. Volet et A. Thulin au Bureau International des Poids et Mesures, A. Cook au National Laboratory (Teddington - G.B), P. Agaletzky et R. Egorov (Leningrad), Martsinyak, Preston-Thomas (Ottawa).

La méthode exige les dispositions les plus subtiles de la métrologie. Le corps pesant est lancé vers le haut et l'on observe son mouvement libre, en notant à l'aller et au retour les temps de passage dans deux plans horizontaux distants de H .

Si T_1 et T_2 sont les intervalles de temps séparant respectivement les passages dans les deux plans respectivement, on obtient $g = 8 H / (T_1^2 - T_2^2)$. On procède dans un bon vide, on démontre d'ailleurs (ce n'est pas si simple) que la résistance de l'air résiduel n'altère pas le résultat dans le cas de symétrie ascension-descente.

Dès leurs premiers essais les physiciens constatarent un désaccord complet entre leurs résultats et le système de Potsdam, c'est ainsi que Volet et Thulin observèrent pour Sèvres A (B.I.P.M - 1960) la valeur $g = 980,928$ au lieu de 980,941 que lui attribuait le système de Potsdam.

Pour bien apprécier la valeur de ces premiers résultats, il suffit de constater que la distance des deux plans de référence et les temps de passage devaient être connus à mieux que 10^{-6} . On allait d'ailleurs faire encore mieux.

Le physicien métrologiste A. Sakuma (Japon) affecté au B.I.P.M. entreprit ses expériences. Il réalisa un appareil de mesure absolue de la pesanteur donnant le centième de milligal ou mieux $\pm 3 \times 10^{-9}$ par observation du mouvement d'un prisme trirectangle rétro-réfléteur, lancé vers le haut ; au cours de son mouvement ascendant et de sa chute libre on mesurait les temps de passage aux deux niveaux intermédiaires de l'ordre de quelques décimètres, de distance connue. Cette distance se mesure par interférométrie, le temps par une fréquence étalon.

D'autres appareils de mesures absolues furent également mis au point (Faller, Hammond) qui opérèrent en diverses stations (Washington, Denver, Fairbanks, Bogota...) et A. Cook poursuivait ses mesures. Les liaisons entre stations absolues — Faller se vérifie à Sèvres et à Teddington — confirmèrent la cohérence des mesures. On disposait donc vers 1968 de repères absolus de pesanteur, dont la précision était de l'ordre de 10^{-8} ou peut-être mieux. On pouvait donc concevoir un réseau mondial quasi absolu.

Le système I.G.S.N. 1971

L'International Gravity Standardization Net (58) est une synthèse numérique :

- des travaux gravimétriques entrepris depuis 1953, conformément au projet élaboré par la Commission Gravimétrie Internationale, précisé et étendu en 1962
- des mesures absolues connues vers 1968.

C'est le résultat d'un très gros calcul portant sur l'ensemble des liaisons retenues comme valables observées pendant une dizaine d'années.

Il unifie et homogénéise dans une compensation d'ensemble :



Main Gravimeter connection in IGSN 71.

Fig. 84

10 mesures absolues
1 200 mesures pendulaires
24 000 mesures de gravimétrie
et donne la valeur de la pesanteur calculée en 1854
stations bien réparties dans le monde entier (sauf
en Asie), avec une précision de l'ordre de 0,1 milli-
gal (fig. 84).

C'est vraiment le premier système mondial
homogène et précis sur lequel on puisse s'étalon-
ner avec sécurité. Il attribue à l'ancienne station
fondamentale de Potsdam $g = 981,260,19$ soit
une différence de 13,81 milligals avec la valeur
1905.

Bien entendu le calcul définitif fut précédé d'un
certain nombre d'essais, permettant le rejet des
observations douteuses, l'évaluation des corrélations,
des poids relatifs des mesures, l'analyse des
erreurs systématiques, etc.

Le groupe de travail qui l'a étudié et mis au point
constitué de 8 membres désignés par la Commis-
sion Gravimétrie Internationale : R. Mac Connell,
J. Tanner (Canada), T. Honkasalo (Finlande), C.
Gantar, C. Morelli (Italie), B. Szabo, U. Uotila, C.
Whalen (USA).

Il est publié (58).

Il sera certainement amélioré lorsque la multipli-
cation des mesures absolues, actuellement mal
réparties, permettra de fixer de meilleures valeurs,
notamment dans l'hémisphère Sud (Afrique du Sud,
Australie, Nouvelle-Zélande) et sur les territoires
interdits actuellement encore aux mesures interna-
tionales (URSS, Chine).

LA GRAVIMETRIE EN FRANCE

Le Bureau des Recherches Géologiques et Minières
(B.R.G.M.) a été organisé par décret du 23 octo-
bre 1959 qui précise (Article 1).

"Il est chargé de promouvoir la recherche et
l'exploitation des ressources du sous-sol et à cette
fin notamment :

- a) d'exécuter ou de faire exécuter sous sa direc-
tion toutes recherches de nature à faire progresser
les sciences de la terre et leurs applications ;
- b) d'assurer des missions de service public concer-
nant la connaissance du sol et du sous-sol ;
- c) d'entreprendre la recherche et l'exploitation des
ressources du sous-sol, à l'exclusion des hydrocar-
bures, et, à cet effet, d'exécuter ou de faire exé-
cuter des travaux de recherches géologiques et
minières..."

La prospection gravimétrique entre donc tout
naturellement dans ses attributions et son dépar-
tement de géophysique comporte une section de
gravimétrie, chargée du réseau gravimétrique natio-
nal de prospection, de son observation, de son
archivage et de sa conservation.

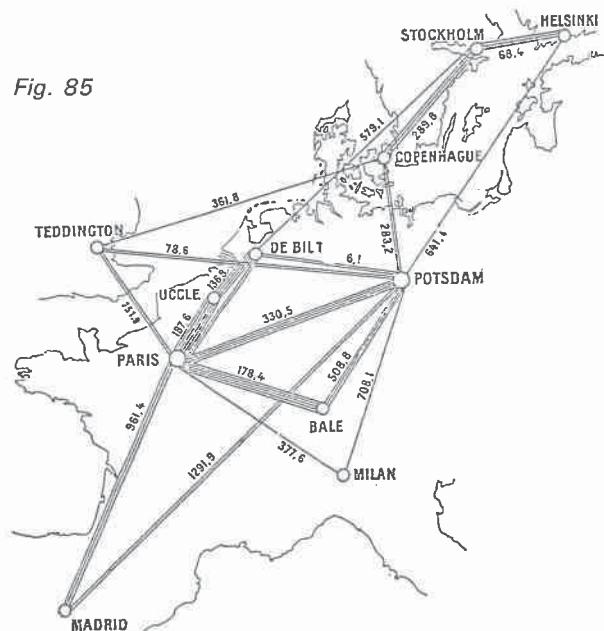
Le B.R.G.M. réunit en un établissement unique
un certain nombre d'organismes officiels antérieurs,
parmi lesquels le B.R.G.G. (Bureau des Recherches
Géophysiques et Géologiques) qui avait les mêmes
responsabilités en ce qui concerne le réseau gravi-
métrique national.

C'est l'histoire de ce réseau que nous nous pro-
posons de résumer ci-dessous.

La base Paris-Toulouse

Dès 1932 le R.P. Lejay avait proposé d'adopter
comme point fondamental du réseau français le
pilier E de l'ancienne salle de mesure de la pesan-
teur à l'observatoire de Paris, et fixé sa valeur à
 $g = 980\,943$ C.G.S. (système de Potsdam)

Fig. 85



Liaison Paris - Système de Potsdam (S. Coron, 1950).

Cette valeur fut confirmée par la suite par S.
Coron (1950) par compensation des principales liai-
sons pendulaires existantes entre les capitales de
l'Ouest européen, déterminant Paris de manière
directe ou indirecte (fig. 85).

A ce point fondamental E sont rattachés des
points satellites plus facilement accessibles, en par-
ticulier le point A : $g = 980\,943,35$ (cour de
l'Observatoire).

Pour établir en France un réseau de prospection
homogène, il fallait disposer d'une base d'étalon-
nage des gravimètres.

Une telle base doit jouir des propriétés suivantes :

- être facilement accessible à tous les prospec-
teurs
- présenter une plage de variations de g suffi-
sante. Elle doit donc se développer du Nord au Sud,
puisque g varie avec la latitude
- comporter un assez grand nombre de stations
intermédiaires pour qu'on puisse s'y rattacher
sûrement.

On choisit comme termes Paris (point E) et un
point précis du sol du laboratoire photographique
de l'Observatoire de Toulouse, où il s'agissait de
déterminer la valeur de référence.

J. Martin, physicien des Expéditions Polaires fran-
çaises, après un étalonnage soigneux de ses gra-
vimètres sur les stations pendulaires européennes,
obtenait pour Toulouse la valeur

$$g = 980,443,10$$

Sur la lancée, il prolongeait la base jusqu'à l'Observatoire du Pic du Midi où il trouva

$$g = 979,744,44 \text{ (vestibule d'entrée)}$$

De son côté, R. Bollo (B.R.G.M.) observait sur la base de Toulouse une différence de 500,79 milligals entre Paris A et Toulouse, ce qui aurait donné à Toulouse

$$g = 980,442,56 \text{ (1954)}$$

Mais la carte gravimétrique de la France (anomalies de Bouguer) est basée sur l'origine Paris A avec $g = 980,943$ donc en désaccord de 0.35 milligal avec le choix initial de P. Lejay et J. Martin, et postule une différence de 500.20 milligals entre Paris et Toulouse. Cet étalonnage — tout relatif — fut établi en 1963 par le B.R.G.M., il fixe à 980,442,80 la valeur de Toulouse.

En définitive, il y avait en France vers 1960 deux systèmes Paris-Toulouse :

— un système J. Martin avec une base Paris-Toulouse, dont les stations intermédiaires étaient Chartres, Château-Renault, Châtellerauld, Poitiers, Angoulême, Agen, Montauban

— un système B.R.G.M. Paris-Toulouse par Orléans, Vierzon, Limoges, Brive, Cahors, Montauban. Le B.R.G.M. avait en outre établi un certain nombre de bases d'étalonnage secondaires, faciles d'accès, pour calibrer les gravimètres des prospecteurs en France. Ces bases étaient en accord avec la définition Paris-Toulouse (amplitude moyenne de l'ordre de 100 milligals).

En 1977, M. Ogier, chef de la section des gravimétries du B.R.G.M. remesurait la base fondamentale Paris-Toulouse, Pic du Midi avec un excellent gravimètre et tout en maintenant la différence de 500,20 milligals rétablissait et remplaçait un certain nombre de stations détruites et corrigeait les autres (le gravimètre utilisé aurait fixé à 500,72 milligals cette différence, mais le système de la carte gravimétrique était fixé depuis longtemps à 500,20 []).

LE RESEAU NATIONAL

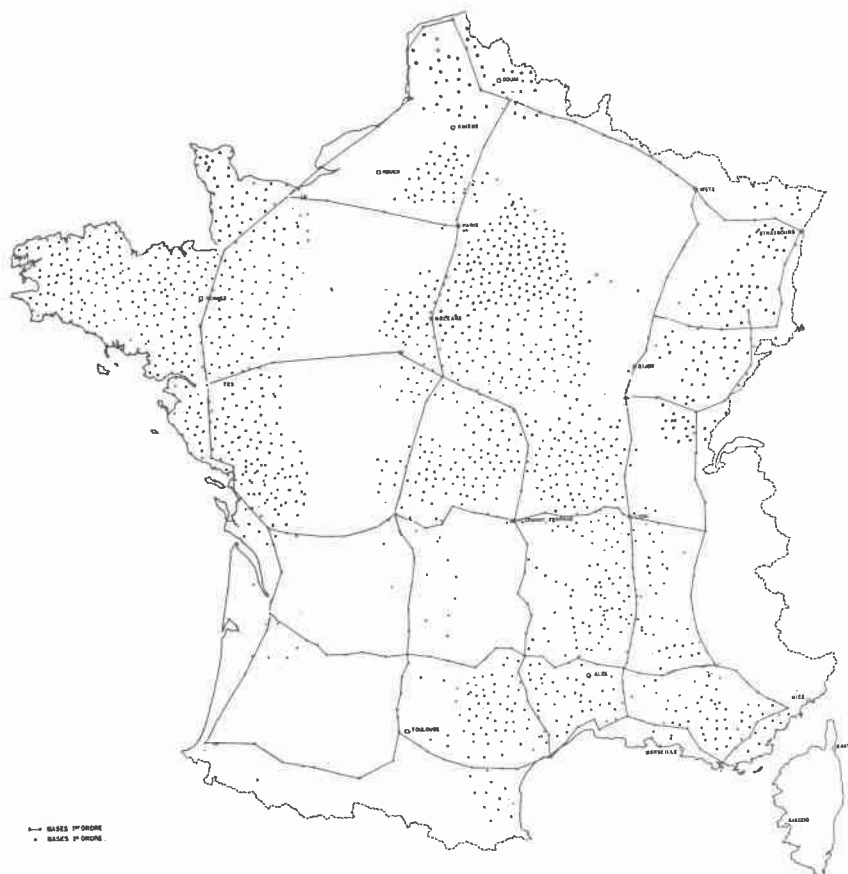
Le réseau ancien

Le B.R.G.M. avait poursuivi ses travaux de prospection en s'appuyant sur sa propre base Paris-Toulouse, ou sur des bases d'étalonnage dérivées.

Les travaux pouvaient donc être réputés ramenés à une même échelle gravimétrique mais avec des origines régionales non rattachées ou mal rattachées entre elles.

Pour unifier l'ensemble, le B.R.G.M. décide l'observation d'un réseau dit de 1^{er} ordre (R. Bollo, M. Didosky - 1965) reliant tous les levés partiels (fig. 86) et formant cadre des levés futurs. Les fermures de ce réseau étaient très correctes pour l'époque, la plus forte est égale à 0,144 milligal et leur moyenne quadratique à $\pm 0,065$ milligal (fig. 86).

Ce réseau a été compensé (J.-J. Levallois 1978) et pourrait servir d'appui aux réseaux régionaux, qui de l'un à l'autre présentent des cassures de l'ordre de plusieurs dixième de milligal, mais il reste encore



Réseau de 1^{er} et 2^e ordre, 1965.

Fig. 86



Fig. 87

un gros travail de vérification des données du deuxième ordre, d'étude de missions locales qui n'ont pas été exploitées de sorte que le projet n'a pas encore été mis à exécution. D'autre part, l'observation d'un nouveau réseau gravimétrique français de 1^{er} ordre incitait à différer l'opération.

Le nouveau réseau

Le nouveau réseau gravimétrique français est destiné à supplanter l'ancien réseau de 1^{er} ordre du B.R.G.M. et à lui substituer un réseau :

- calé sur des mesures absolues (appareil portatif Sakuma)
- disposant de bases très précises d'étalonnage
- comportant un nouveau réseau de 1^{er} ordre observé au gravimètre Lacoste-Romberg et d'un réseau de 2^e ordre d'interpolation entre les stations de 1^{er} ordre
- susceptible de servir de support au réseau de 3^e ordre constitué par l'ensemble du réseau ancien convenablement recalculé
- en liaison directe avec les réseaux limitrophes des pays étrangers.

Ce programme a été établi en accord avec le Bureau National de Métrologie (Déc. 1978) par le B.R.G.M. auquel a été confié la mise en œuvre.

Le réseau se compose de 78 traverses de 1^{er} ordre observées par les mesures de 4 gravimètres Lacoste-Romberg. Les stations absolues de Sèvres, Toulouse, Nancy, Orléans (B.R.G.M.), Dijon, Marseille, en assurant l'échelle absolue, elles ont été

occupées avec l'appareil portatif de S. Sakuma, leur précision est de l'ordre de 1/100 de milligal comme le montre par exemple le tableau ci-dessous extrait d'un compte rendu du B.R.G.M. (station de Toulouse - 18 séries - 105 tirs - 85 conservés, du 23 au 28/4/1983).

Série	n	g	g corrigé	t
6	9	980 427,3661	980 427,3606	0,0072
7	9	980 427,3661	980 427,3608	0,0072
8	12	980 427,3622	980 427,3617	0,0041
9	9	980 427,3637	980 427,3602	0,0055
10A	10	980 427,3604	980 427,3602	0,0050
10B	10	980 427,3583	980 427,3588	0,0060
11	16	980 427,3604	980 427,3600	0,0043
12	10	980 427,3606	980 427,3612	0,0015

Le réseau de 2^e ordre avait été observé antérieurement à celui de 1^{er} ordre () dans un système provisoire, très voisin du système définitif, en liaison directe avec un certain nombre de stations absolues des pays limitrophes sur lesquelles il s'étalonne suivant un circuit Sèvres, Bruxelles, Wiesbaden, Turin, Sèvres, Toulouse, Sèvres, Arles. On avait malheureusement omis, dans l'enthousiasme du nouveau projet, d'assurer la liaison avec l'ancien réseau. On y procéda donc ultérieurement : le réseau ancien pourra donc être incorporé dans le nouveau quand on le jugera utile.

Le petit tableau ci-dessous compare les valeurs de ce nouveau réseau et d'I.G.N. 1971 en quelques points communs (fig. 87) :

	France 1983	I.G.S.N. 71
Sèvres A	980 925,95	980 925,97
Toulouse A	980 427,68	980 427,74
Capens	980 387,97	980 388,08
Château-Renault	980 818,61	980 818,59
Poitiers	980 726,90	980 726,83
Montauban	980 491,53	980 491,54

L'accord est excellent, d'autant meilleure que les observations sont totalement et absolument indépendantes.

Depuis 1975, tout ce beau travail avait été exécuté sous la responsabilité de M. Ogier et avec sa participation personnelle. Il est mort prématurément (1986). On souhaite que le B.R.G.M. puisse poursuivre et achever son œuvre.

TRAVAUX GRAVIMÉTRIQUES OUTRE-MER

Les levés gravimétriques en Orient, Indochine, Philippines du R.P. Lejay, les mesures de Vening-Meinesz dans l'archipel Malais, les études de J. de Graaf-Hunter dans les Indes tournent autour de l'équilibre isostatique, de sa réalité de ses écarts. Leurs réseaux, établis sous rattachement systématique à un réseau d'étalonnage qui n'existait guère, pouvaient cependant leur ouvrir l'accès à certains problèmes de géologie profonde par l'étude des anomalies de Bouguer et des anomalies isostatiques.

On sait que l'anomalie de Bouguer est égale à la différence entre la valeur théorique de la pesanteur sur la surface de référence, à l'aplomb de la station, et la valeur observée au sol, ramenée à l'altitude zéro, par soustraction de la topographie : défalcation du plateau "horizontal" de la station et réduction à l'air libre.

Elle admet la forme classique

$Dg = 0.000\ 1968 \cdot h$ (sur la terre ferme).

L'expérience prouve que l'anomalie de Bouguer est une fonction bien continue, qui se laisse interpoler à l'œil, qu'elle est en très grande généralité négative sur les continents et positive en mer et qu'elle matérialise certains traits de géographie régionale ; on sait également qu'elle exagère la discordance, et cette remarque a précisément incité les géodésiens à rechercher dans les théories isostatiques l'explication des différences. La réduction isostatiques, quelle qu'en soit la structure (Pratt-Hayford ou Airy-Heiskanen) conserve sensiblement les propriétés de continuité et ramène les anomalies à des valeurs beaucoup plus vraisemblables — on dit, sans trop préciser ce que cela signifie qu'elles sont plus "représentatives".

Vening-Meinesz, le grand géophysicien hollandais, fut le champion de ce type d'études ; il con-

sacra une grande partie de son activité à la structure profonde de l'Insulinde, aux compressions de l'écorce, à la formation des "graben", etc... (52). P. Lejay était, quoique admiratif, un peu plus réticent ().

Les travaux gravimétriques exécutés par les français dans les pays d'Outre-Mer visaient davantage à la création de levés gravimétriques systématiques, représentés et traduits en anomalies de Bouguer ou isostatiques dans un but de prospection.

Ils furent exécutés par des gravimétristes très qualifiés, travaillant sans l'égide d'organismes officiels.

La méthode générale de travail est classique, c'est celle qui a été pratiquée pour le réseau français :

- on détermine un réseau d'appui aussi précis que possible constituant le canevas général. Selon l'étendue du pays cela représente quelques centaines de stations se contrôlant par leurs liaisons mutuelles, aller et retour,

- ce réseau peut alors servir à l'interpolation pour des dizaines de milliers de stations de prospection qui viennent s'y appuyer.

Le prospecteur s'intéresse surtout aux variations de l'anomalie de Bouguer, c'est pourquoi un réseau de prospection étendu à la région à étudier pourrait à la rigueur suffire, mais l'existence d'une dérive instrumentale l'oblige à se contrôler souvent, donc à travailler en mailles fermées, ce qui revient à observer le réseau des bases. Celui-ci présente en outre l'avantage de la permanence, au moins tant que les progrès techniques n'incitent à la réformer pour lui substituer son successeur.

Enfin lorsque la prospection présente un caractère étendu, franchissant les frontières, etc... l'homogénéisation d'ensemble implique le rattachement à un système (Potsdam par exemple) matérialisé par un réseau de référence international ou mondial.

Le réseau des bases est la référence métrologique des mesures, le calcul des anomalies de Bouguer implique en outre :

- d'une part le choix d'une densité moyenne régionale de la croûte superficielle - celle-ci peut varier entre d'assez larges limites 2,3 à 2,8 par exemple, (la valeur 2,67 utilisée dans l'expression de Dg est conventionnelle), les anomalies de Bouguer de la carte de France présentent des discontinuités graphiques dues à des choix de densités variées suivant les régions

- d'autre part la connaissance précise des altitudes des stations et du relief.

Le prospecteur devrait donc disposer d'un réseau d'altitudes et d'une cartographie correcte, qui n'existent pas toujours en pays neuf. Il est donc souvent amené dans les travaux de reconnaissance à utiliser les altitudes barométriques donc à n'obtenir que des anomalies approchées - une erreur de 10 mètres rare mais possible même dans un levé barométrique soigné, entraîne une erreur de 2 milligals sur les isogammes, tracés souvent à l'équidistance de 10 milligals.

TRAVAUX DE L'O.R.S.T.O.M.

L'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (O.R.S.T.O.M.) fut institué par la loi du 11 octobre 1943, validée le 24 novembre 1944. Son régime a subi de nombreuses vicissitudes, reflétées par des décrets successifs qui en modifiaient les attributions, les tutelles, les liaisons, etc... Tout en conservant son sigle, il s'appelle actuellement de par un décret du 5 juin 1984, Institut Français de Recherches Scientifiques pour le Développement en Coopération.

Placé sous la tutelle conjointe du ministre chargé de la recherche et du ministre chargé de la coopération et du développement, il a pour mission :

a) de promouvoir et de réaliser tous travaux de recherche scientifique et technologique susceptibles de contribuer au progrès économique, social et culturel des pays en développement, en particulier :

— par l'étude des milieux physiques, biologiques et humains de ces pays

— par des recherches expérimentales tendant à donner à ces pays la maîtrise de leur développement

b) d'assurer l'information scientifique et technique dans les divers milieux sociaux, professionnels et culturels concernés

c) de contribuer à l'application et à la valorisation sociale, économique et culturelle des résultats de ces recherches

d) d'apporter son concours à la formation à la recherche et par la recherche de français et d'étrangers

e) de favoriser, par la conclusion de contrats, l'action en commun des organismes travaillant dans son domaine de compétence

f) de participer à l'analyse de la conjoncture nationale et internationale et de ses perspectives d'évolution en vue de l'élaboration de la politique nationale en ce domaine.

Ces définitions, extrêmement larges, englobent un très gros éventail d'activités scientifiques telles que (énumération non exhaustive) :

— entomologie

— faune, génétique animale

— géologie, hydrologie, pédologie

— océanographie, géophysique, etc...

orientées par des commissions scientifiques compétentes.

La géophysique y occupe une place importante pour la recherche et la prospection. Ses responsables successifs, Mme F. Bayard-Duclaux, J. Goguel, apportèrent un soin particulier à développer la gravimétrie.

L'Afrique Occidentale, l'Afrique Centrale, Madagascar, la Nouvelle-Calédonie firent l'objet d'une couverture gravimétrique systématique.

De nombreuses publications, intéressantes et bien faites exposent les résultats essentiels, les analysent, les interprètent et présentent les cartes correspondantes des anomalies de Bouguer, à

l'attention des prospecteurs, des recherches minières, etc...

Réseau général d'étalonnage

En 1949, Mme Bayard-Duclaux proposait l'observation d'un réseau de bases gravimétriques permettant d'homogénéiser dans un système rattaché à Paris, une longue traverse en zone francophone d'Afrique jusqu'à Madagascar, la Réunion, l'île Maurice.

De cette traverse se détachaient de nombreuses liaisons avec d'autres réseaux, le tout formant l'ossature nécessaire au rattachement des travaux entrepris ou à entreprendre par l'O.R.S.T.O.M.

Ce projet fut approuvé et appuyé par l'aréopage scientifique des connaisseurs, reçut l'aide matérielle des compagnies aériennes françaises ainsi que celle des organismes étrangers intéressés.

Pour la campagne d'observations F. Duclaux s'assura le concours de J. Martin (expéditions polaires françaises), observateur méticuleux qui venait de définir la base Paris-Toulouse (56). Tous deux étudièrent de très près le comportement de leur gravimètre et la correction des erreurs systématiques, puis l'on procéda aux mesures. L'origine est fixée à Paris E, $g = 980\,943$. Les différentes liaisons ont été observées plusieurs fois (fig. 88).

Les résultats sont publiés dans (57). C'est un ensemble compensé de 293 stations dotant les territoires traversés d'un certain nombre de bases très sûres. La qualité est telle qu'il a été intégré dans le réseau I.G.S.N. 1971, moyennant une correction d'étalonnage et un décalage par rapport au système de Potsdam auquel il était rattaché (par la valeur à Paris).

Inversement on peut, en prenant les valeurs initiales (57) et les comparant à I.G.S.N 1971, identifier les coefficients d'un étalonnage relatif sur la quarantaine de stations I.G.S.N. communes aux deux réseaux et transformer les 250 stations non communes en I.G.S.N. 1971. L'écart-type est de $\pm 0,06$ milligal l'écart maximum de $0,17$ milligal : la formule

$$g(1971) = g(\text{ORSTOM}) - 17,696 + 1,227(g(\text{ORSTOM}) - 978,500)$$

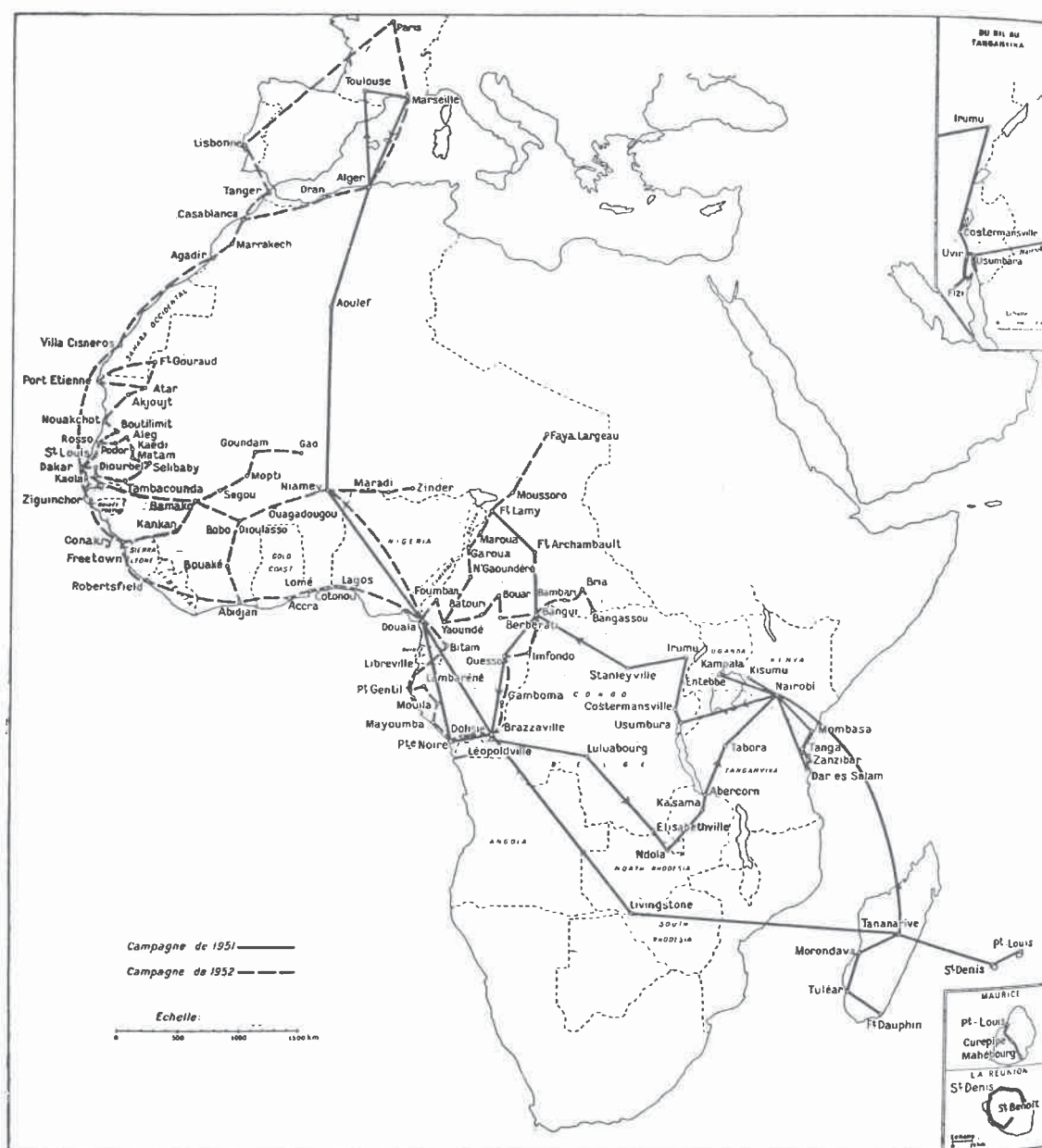
permettrait donc de transformer en un système très voisin de I.G.S.N. 1971 les levés gravimétriques rattachés au système Duclaux-Martin, et donc d'y incorporer presque tous les travaux de l'ORSTOM.

Travaux de prospection

Entre 1948 et 1952, Mlle Y. Crenn en Nouvelle-Calédonie et le R.P. Cathala à Madagascar entreprennent les premières missions gravimétriques de reconnaissance. Ces mesures seront ultérieurement reprises systématiquement et complétées entre 1965 et 1974 et poussées jusqu'à la Réunion et l'île Maurice.

La prospection en Afrique est entreprise par Y. Crenn qui s'adjoint plusieurs équipes de chercheurs et techniciens de géophysique.

1953-1955, liaison Sénégal-Tchad, couverture de la Côte d'Ivoire, de la Haute-Volta, du Niger, du Togo, de l'ex-Dahomey.



Réseaux d'étalonnage ORS TOM.

Fig. 88

A la fin des années 1960, outre les pays ci-dessus, la Mauritanie, le Tchad, le Mali, le Cameroun, la République Centre Afrique, le Congo, le Gabon sont couverts.

La densité des mesures varie selon les régions : de l'ordre de 200 points par degré carré dans les régions sahéliennes ou désertiques (Tchad - Niger), de l'ordre de 50 points par degré carré dans la forêt équatoriale.

Les principaux acteurs de ces levés ont été Y. Crenn, J. Rechenmann, P. Louis, et leurs assistants.

Tous ces travaux ont fait l'objet de nombreuses publications très soignées ; ils sont peu connus sauf de rares spécialistes ; ils représentent de la part de l'O.R.S.T.O.M. un effort remarquable qu'il faut souligner, et dont la France peut à bon droit se prévaloir.

TRAVAUX EN AFRIQUE DU NORD

Levé gravimétrique de l'Algérie-Tunisie

Le rôle essentiel fut joué par J. Lagrula, astronome adjoint à l'Observatoire d'Alger (La Bouzaréah) opérant en Algérie et Tunisie.

On peut distinguer deux phases dans ces travaux. La première comprend les mesures au gravimètre Holweck-Lejay et se termine vers 1949-1950.

La deuxième est une reprise des principales liaisons antérieures avec un gravimètre beaucoup plus moderne et plus précis.

1^{res} phases : vers 1933, l'Observatoire de la Bouzaréah fit l'acquisition d'un gravimètre Holweck-Lejay. Les premières campagnes furent entreprises à son compte jusqu'en 1939 et reprises à partir de 1946 avec l'aide de la Recherche Scientifique et de la Carte Géologique d'Algérie (53).

Il fallait tout créer : vers 1895-1900 Defforges et Bourgeois (S.G.A.) avaient observé une douzaine de stations en Algérie, avec la précision que nous savons. Elles ne pouvaient pas être retenues, il fallait constituer un réseau de stations d'étalement permettant l'interpolation ultérieure. J. Lagrula commença par étalonner son gravimètre sur un certain nombre de stations de référence, du bassin méditerranéen et en déduisit une valeur probable de g à la Bouzaréah (53) soit = 979,920. Il observait ensuite un réseau de "base" (stations) réparties sur l'ensemble du territoire de l'Algérie et de la Tunisie, dont il évalue la précision à ± 3 milligals.

Il extrapolera ce réseau très au Sud (Fort-Lamy, Niamey) et établit la liaison avec le réseau du Maroc (53) donne le tableau général de ses stations comprises dans la région limitée par la frontière algéro-marocaine, la Méditerranée, la frontière Tunisie-Tripolitaine et le 30° parallèle, en tout 463 stations toutes basées sur la valeur de la Bouzaréah, et publiée une carte des anomalies isostatiques correspondantes.

La Compagnie Générale de Géophysique procède

Contribution
du Pendule
Holweck-Lejay
43 bis au réseau
général africain

Station	Pendule H.L.	Martin	Western 53	Autre valeur	
BOUZAREA	979.911	979.912.8	979.912.0	979.910.9	(Harding)
Tanger	979.732.5			979.733	(Lejay)
Ber Rechid	979.558.5	979.557.6	979.557.3		
Marrakech	979.317	979.317.8	979.317.3	979.320	(Lejay)
Tunis	979.916			979.912	(Harrison)
Remada	979.460		979.458		
Aoulef	978.990.5	978.990.0	978.990.0		
El Goléa	979.249		979.247.3	979.247.5	(C.P.A.)
Fort-Flatters	979.054.5		979.051.7	979.052.4	(C.P.A.)
Tamanrasset	978.454		979.452.9		
Fort-Lamy	978.185	978.186.1			

Enfin, toujours avec son Western, il établit un réseau de bases sahariennes pouvant servir de cadre à la prospection (Pétroles d'Aquitaine, Fig. 89).

J. Lagrula a accompli, pratiquement seul, un très gros travail de mesure et de calcul - car à l'époque de ses travaux, l'ordinateur accessible à tous n'existait pas encore et le calcul des anomalies isostatiques n'est pas une sinécure.

Astronome entraîné aux techniques minutieuses de la mesure, il écrivait "... une idée assez répandue range l'utilisation d'un instrument parmi les labeurs de manœuvre. Ce point de vue est souvent inexact... la mesure constitue... une étape fondamentale... ; les résultats des mesures sont intangibles et comme on ne sait à quelles diverses sautes ils seront accommodés il faut s'efforcer de fournir du premier choix".

Il était en outre capable, comme le montre la lecture de ses œuvres, de dépasser les limites de la métrologie gravimétrique, de faire des synthèses d'ordre géologique et d'aller loin dans l'interprétation.

Son réseau serait aujourd'hui peut-être dépassé, mais à cette époque il représentait bien "le premier choix" et a grandement contribué aux succès des prospections qui s'y rattachèrent.

dera à l'interpolation pour les recherches de prospection.

2^e phase : vers 1950 J. Lagrula reçoit le gravimètre Western qu'il appelait de ses vœux, avec lequel il va pouvoir reprendre et corriger son réseau initial (54).

Il commence par étalonner avec beaucoup de soin son gravimètre, et effectue les liaisons nécessaires pour établir une nouvelle valeur à la Bouzaréah pour laquelle il trouve $g = 979,912$ (système de Potsdam. La valeur obtenue en 1951 par F. Duclaux et J. Martin est égale à 979,91279).

Il peut alors établir un réseau conforme aux recommandations initiales de la Commission Gravimétrique Internationale, et par la même occasion, recherche un coefficient d'étalement plus correct pour le pendule Holweck-Lejay de ses premiers travaux, ce qui lui permet de corriger les valeurs initiales (53), en appliquant ce coefficient.

La comparaison des résultats (1958) est résumée dans le tableau ci-dessous dont l'intérêt est de montrer la marge d'indécision des gravimètres et des liaisons à cette époque.

Levé gravimétrique du Maroc

Une première mesure (relative) de la pesanteur avait été faite par F. Reignier (S.G.A. 1931) avec l'appareil Mioni, par rapport à Paris. Il avait été fixé à 979,563 la valeur à la station gravimétrique de l'Observatoire Averroës (Ber Rechid), cette valeur fut confirmée par P. Lejay par une liaison au gravimètre. En 1938 et 1939 G. Roux et C. Clariond observent 49 stations, appuyées sur cette valeur (gravimètre Holweck-Lejay) qu'ils complèteront en 1948 par une mesure de 20 stations dont certaines reprises. Ils opéraient en liaison étroite avec J. Lagrula.

Un beau réseau est observé par la Compagnie Générale de Géophysique en 1950. Il comprend un ensemble de 1 268 stations distantes d'une trentaine de kilomètres formant réseau maillé, 42 mailles de périmètre moyen 300 km (gravimètre North American).

En 1960-1961 l'I.G.N. réobserve un nivellement de précision, auquel se juxtaposent les déterminations gravimétriques permettant le calcul des cotes géopotentielles soit 2 500 stations situées, comme l'exige un tel nivellement, à proximité immédiate des repères de nivellement, mais n'ajoutant du fait de sa spécificité que peu de renseignements nouveaux.

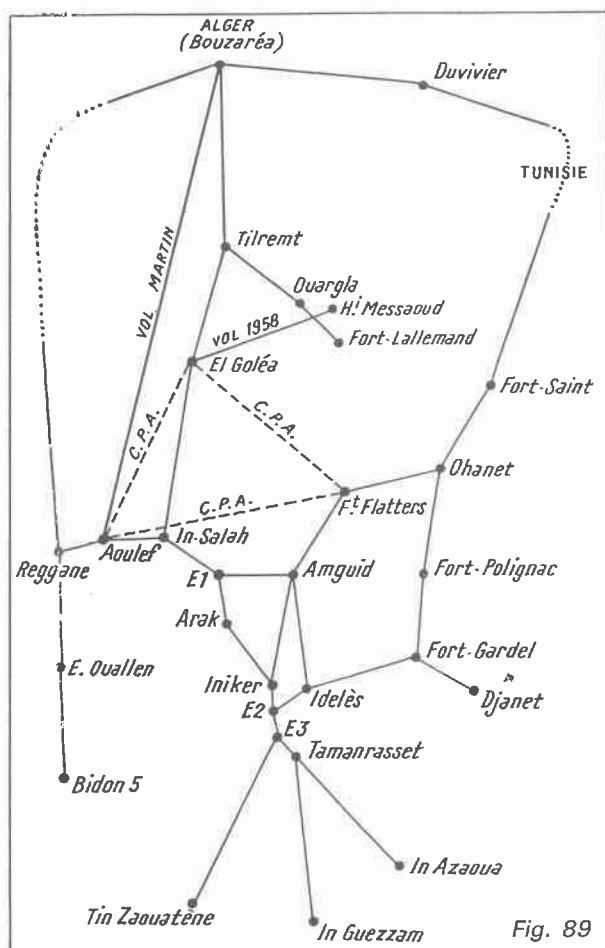


Schéma des principales stations sahariennes. Fort-Saint, Fort Polignac, Djanet, Bidon 5, Tin Zaouatene, In Guezzam, In Azaoua ne sont pas des stations de référence, mais des stations simples.

Les mesures de 1950 avaient abouti à une première publication de cartes d'anomalies de Bouguer.

Après l'accès du Maroc à l'indépendance (1956) le Service Géologique Marocain décida (1961) de compléter cette publication. Il estima après étude que le travail devait être repris de fond en comble, y compris le réseau de bases.

Un réseau nouveau fut donc implanté par la Compagnie Africaine de Géophysique (filiale de la C.G.G.) opérant sous la direction des Mines et de la Géologie du royaume (fig. 89), sur lequel est appuyé la nouvelle carte des anomalies. Il repose sur la valeur $g = 979,557,53$ à Averroès et la station de Casablanca $g = 979\,644,26$ déterminées par l'O.R.S.T.O.M. (F. Duclaux, J. Martin). La direction des travaux a été assurée par l'autorité du royaume, et n'était donc plus depuis 1956 sous responsabilité française.

PARTICIPATION A LA VIE INTERNATIONALE

Organisations scientifiques

Après la première guerre intervient, nous l'avons vu, une vaste réorganisation de l'activité scientifique mondiale.

Sous le patronnage du Conseil International des Unions Scientifiques, (C.I.U.S. ou I.C.S.U., dont le siège est actuellement à Paris) un certain nombre d'unions constituaient l'armature de la concertation scientifique.

Cette organisation ne fut que très légèrement retouchée en 1946.

L'Union Géodésique et Géophysique Internationale (U.G.G.I. ou I.U.G.G.), dont la dénomination précise les attributions, coiffe les activités de ses sept Associations constitutives :

- Association Internationale de Géodésie
- Association Internationale de Sismologie et de Physique de l'Intérieur de la Terre
- Association Internationale de Volcanologie et de Chimie de l'Intérieur de la Terre
- Association Internationale de Géomagnétisme et d'Aéronomie
- Association Internationale de Météorologie et Physique de l'Atmosphère
- Association Internationale des Sciences Hydrologiques
- Association Internationale des Sciences Physiques de l'Océan.

La participation des scientifiques intéressés aux travaux des unions s'exerce par l'intermédiaire des comités nationaux : le Comité national français de géodésie et géophysique est l'organe représentatif de la France auprès de l'U.G.G.I. : il n'y a pas à proprement parler de membres des Associations, il y a des délégations, désignées par les comités nationaux, pour participer aux travaux des Unions ou des Associations lors des assemblées générales quadriennales ou des symposiums.

Chaque Union ou Association est administrée par un bureau, élu lors des assemblées générales : Président, Vice-Présidents, Secrétaire Général et ses adjoints. Elle fixe elle-même ses statuts et son règlement intérieur.

Les travaux scientifiques de l'Association Internationale de Géodésie sont du ressort de sections, de Commissions Internationales (ex : Commission gravimétrique internationale) et de groupes d'études spécialisés, tous ces organismes ayant Président (et éventuellement secrétaire).

Les Comités nationaux délèguent leurs représentants aux commissions, mais les groupes d'études font appel à des spécialistes nommément désignés.

La France, sans chercher à se pousser aux premiers rangs, a toujours fait bonne figure à l'U.G.G.I. et à l'A.I.G.

Depuis les remaniements de l'organisation de l'Union, consécutifs à la fin de la 2^e guerre mondiale, elle a fourni :

A l'U.G.G.I.

- un Président J. Coulomb (1967-1971)
- un Secrétaire Général G. Laclavère (1951-1967)

A l'A.I.G.

- 3 Secrétaires Généraux successifs P. Tardi (1948-1960), J.-J. Levallois (1960-1975), M. Louis (1975-) et des Secrétaires adjoints correspon-

dants pour les mêmes périodes (J.-J. Levallois, M. Louis, C. Boucher). Le Bureau Central de l'A.I.G. a son siège à Paris depuis 1922 (G. Perrier 1922-1946).

D'autre part un certain nombre de Services permanents, rattachés directement à I.C.S.U., exercent des activités scientifiques dans le sein des Unions : ils sont chargés de collecter et de traiter les données d'observations continues, enregistrées dans le monde entier et de les tenir à la disposition des organismes scientifiques nationaux intéressés. Ils forment une Fédération des Services Astronomiques et Géophysiques (F.A.G.S.).

Ils sont confiés à certaines nations, volontaires pour en assurer le bon fonctionnement et le rayonnement international.

La France a la responsabilité de deux d'entre eux :

- le Bureau International de l'Heure (B.I.H.)
- le Bureau Gravimétrique International (B.G.I.)

La domiciliation de ce genre de services pose des problèmes administratifs plus ou moins bien résolus : les Unions Scientifiques ne sont pas des organisations intergouvernementales, aucune convention internationale officielle ne garantit donc l'existence ou la subsistance de tels services au sein des organismes scientifiques nationaux.

Il en résulte que si le service a été créé sur initiative personnelle, c'est sur l'influence scientifique et le sens des relations publiques de son directeur qu'il faut compter pour le faire subsister, l'héberger, lui fournir le personnel et les commodités nécessaires (lumière, chauffage, téléphone, etc.) et quelles que soient la bonne volonté et la compréhension de l'organisme accueillant, malgré les subventions — très maigres — que F.A.G.S. alloue parcimonieusement, l'organisme végète et ne peut répondre convenablement aux conditions justifiant son existence.

La seule solution est de l'accueillir au sein d'un organisme national solide, dont les buts scientifiques s'harmonisent avec ceux du service international projeté ; la communauté d'intérêts crée une symbiose fructueuse pour les deux organismes, et garantit la valeur internationale des travaux.

Le B.I.H. est depuis sa création, comme on l'a déjà vu, domicilié à l'Observatoire de Paris, et l'on imaginerait difficilement meilleure adéquation.

En ce qui concerne le B.G.I. la situation fut assez longue à se décanter : créé en 1951 à l'instigation du R.P. Lejay, qui en fut le premier directeur, il fut transféré à sa mort (1958) dans les locaux de l'Institut de Physique du Globe (I.P.G.) qui assurait les commodités (locaux, entretien, chauffage, téléphone, etc.) mais ne prenait pas ses activités en compte.

La cheville ouvrière des travaux était Mlle S. Coron, physicienne adjointe détachée de l'I.P.G., héritière de la pensée du R.P. Lejay, qui assurait la marche des travaux techniques, sous la responsabilité des directeurs successifs, P. Tardi (1958-1974), J.-J. Levallois (intérim 1975-1979) ; mais le foisonnement des mesures, la banalisation

de l'informatique, les progrès des banques de données, le manque de personnel et de crédits montraient à l'évidence la précarité et l'inconfort de la situation. En 1979 sur proposition du Comité National le B.G.I. fut transféré à Toulouse au C.N.E.S. en liaison avec le Groupe de Recherches de Géodésie Spatiale, et forme avec l'aide du B.R.G.M. pour la banque de données, de l'I.G.N. pour une partie du personnel, un service désormais solide, doté de moyens qui manquaient, et qui lui permettent d'accomplir avec succès sa mission internationale, sous la direction de G. Balmino.

TRAVAUX INTERNATIONAUX

Le réseau européen unifié de nivellement (R.E.U.N)

En 1955 un symposium se réunissait à Florence pour étudier un projet de réseau européen de nivellement, unifié par compensation générale d'un certain nombre de mailles tirées des réseaux nationaux.

Le but du travail était purement scientifique : les nations intéressées mettaient en commun les données d'observations de leur choix pour en tirer un ensemble homogène, et d'un seul tenant.

Le problème, simple en apparence, était assez embrouillé :

- les réseaux nationaux dataient de différentes époques et leurs précisions n'étaient pas toujours comparables
- chacun d'eux était basé sur sa propre origine nationale (dont la définition était parfois assez vague) par exemple :
- l'origine du réseau français était au marégraphe de Marseille
- celle du réseau italien au marégraphe de Gênes
- celle du réseau allemand au marégraphe de Kiel
- celle du réseau suisse à la Pierre du Niton (Lac Léman)
- celle du réseau belge, au niveau de la basse mer à Ostende, référence changée par la suite
- etc., etc.,

On prit les décisions suivantes :

- 1) l'origine serait le zéro normal d'Amsterdam, d'ailleurs sans liaison directe avec la mer (N.A.P.)
- 2) chacun sélectionnerait ses lignes de nivellement au mieux
- 3) le réseau serait calculé en cotes géopotentielles $C = \Sigma g dh / 1\ 000$; où g serait exprimé en unités C.G.S., le dénominateur $1/1\ 000$ étant sans dimensions
- 4) les marégraphes seraient soigneusement reliés au réseau, et leurs données seraient réduites à une même époque origine (1950.0)
- 5) trois équipes de calculs (Delft, Stuttgart, Paris (I.G.N.)) étaient chargées d'effectuer les calculs, indépendamment les uns des autres.

Le géodésien danois O. Simonsen fut désigné pour préparer et coordonner le travail : c'était un homme particulièrement méticuleux. Il lui fallut trois ans pour démêler l'écheveau et dégager les données correspondantes.

La compensation — très simple — fut alors entreprise et les résultats des calculateurs s'avérèrent pratiquement identiques, bien que les méthodes de calcul fussent différentes (équation conditionnelles, variations de coordonnées - mêmes poids). L'examen des résultats fut soumis à Delft à une étude statistique des résidus où le N.G.F. fut mis sur la sellette. Effectivement, la compensation lui apportait de fortes distorsions dues aux fermetu-

res anormales des mailles de liaison avec les états voisins.

Un calcul provisoire fut repris par l'I.G.N. en 1970 après la réobservation du réseau primordial français (J.-J. Levallois, Y. Maillard), les résultats paraissent sensiblement améliorés. Nous indiquons à titre de comparaisons, dans les deux systèmes, les altitudes des marégraphes.

Marégraphe	REUN 1970	REUN 1957	Marégraphe	REUN 1970	REUN 1957
Tromsø	- 0.117	- 0.110	La Palice	- 0.164	+ 0.005
Narvik	- 0.017	- 0.010	St-Jean-de-Luz	- 0.229	+ 0.140
Heimajo	- 0.084	- 0.077	Vigo	- 0.118	+ 0.261
Bergen	- 0.066	- 0.059	Cascais	- 0.237	+ 0.140
Tregde	- 0.120	- 0.113	Cadix	- 0.194	+ 0.184
Nevlungshavn	- 0.068	- 0.061	Méditerranée		
Smogen	- 0.083	- 0.076			
Esbjerg	- 0.044	- 0.037			
Cuxhaven	+ 0.021	+ 0.028			
Den Helder	- 0.090	- 0.089			
Ostende	- 0.116	- 0.145			
Dunkerque	- 0.072	*			
Dieppe	- 0.192	*			
Le Havre	- 0.111	*			
Cherbourg	- 0.169	*			
Brest	- 0.089	- 0.015			
St-Nazaire	- 0.179				
			Malaga	- 0.317	+ 0.031
			Alicante	- 0.410	- 0.032
			Port-Vendres	- 0.514	- 0.219
			Marseille	- 0.390	- 0.170
			Nice	- 0.472	*
			Monaco	- 0.396	*
			Genova	- 0.381	- 0.329
			Venise	- 0.329	- 0.291
			Trieste	- 0.365	- 2 0.350

On voit nettement que le réseau français 1969 a entièrement modifié les altitudes des marégraphes, sur toute la côte atlantique et méditerranéenne entre Brest et Marseille.

Dans le contexte habituel des commissions internationales, un calcul tel que celui du R.E.U.N. n'est jamais terminé : il y a toujours quelque part, une traverse refaite, une liaison frontière améliorée, un collègue qui veut y apporter son grain de sel, ce qui donne l'occasion de reprendre le calcul et de discuter les nouveaux résultats. D'autres compensations se sont succédé depuis 1970, malheureusement les marégraphes ne semblent pas y avoir été pris en compte, ce qui paraissait pourtant un des thèmes les plus intéressants du travail. On sait en effet, par l'étude des seuls marégraphes, que le niveau marin monte en fonction du temps sur toutes les côtes européennes. Les variations séculaires suivantes ont été constatées (ordre de grandeur).

Méditerranée	Atlantique
Port-Vendres + 13 cm	Cascais + 16 cm
Marseille + 18 cm	Lagos + 11 cm
Gênes + ?	St-Jean/Luz + 18 cm
Trieste + 14 cm	Brest + 20 cm

L'ampleur du mouvement diminue en Manche et Mer du Nord, et s'annule vers le Jutland

Dénivelée Méditerranée - Océan Atlantique

Vers 1872 Bouquet de la Grye, célèbre ingénieur hydrographe, remarquant que la densité de l'eau de la Méditerranée est supérieure à celle de l'Océan, en avait déduit que, par le principe des vases communicants, un équilibre devait s'établir entre Médi-

terranée plus salée et Océan, par le détroit de Gibraltar ; la cote de l'Océan par rapport au niveau de Marseille devait être positive. Son calcul lui donna une dénivelée de 1,00 mètre, presque exactement égale à celle qu'indiquaient les altitudes de Bourdaloüe à Brest (1,04 m).

Malheureusement, cette concordance trop parfaite était viciée à la base :

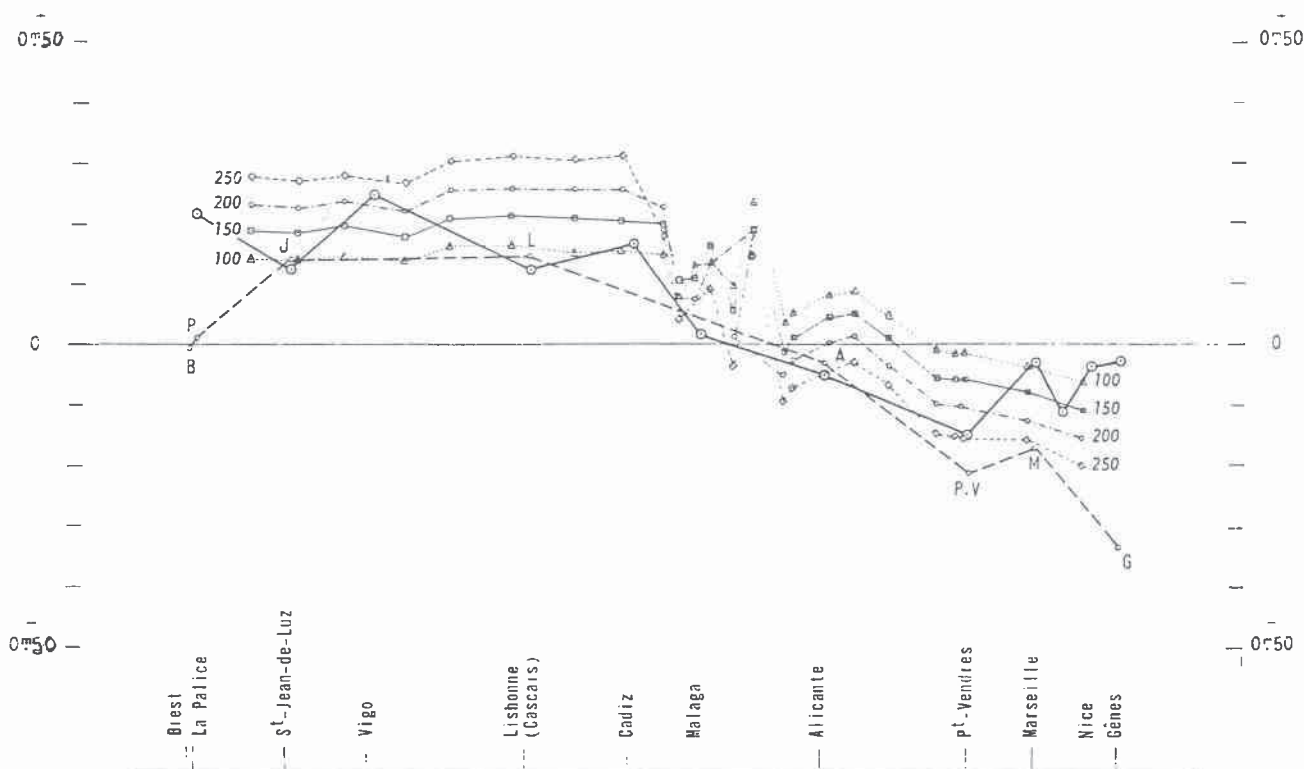
— d'une part, parce que les altitudes de Bourdaloüe ont été calculées de manière assez rudimentaire, un calcul certainement plus correct leur attribuerait une cote très différente, de l'ordre de + 0,20 m au lieu de 1,04 m

— d'autre part, parce que la densité de l'eau de mer doit être prise en moyenne et la valeur choisie par Bouquet de la Grye est fort critiquable (fig. 90).

Les océanographes, en particulier M. H. Lacombe ont montré que cette dénivelée effectivement positive (altitude de Brest supérieure à altitude de Marseille) doit être comprise entre 0,20 m et 0,45 m, concentrée sur quelques centaines de kilomètres le long des côtes entre Lisbonne (Océan) et Alicante (Méditerranée).

Ch. Lallemand s'était toujours élevé contre l'existence d'une telle dénivelée, en s'efforçant de montrer que les valeurs obtenues par les nivellements étrangers (nivellement espagnol en particulier) n'étaient pas probantes.

Cependant L. Cahierre et P. Lejay (C.R.A.D.S. 1955) utilisant la boucle du N.G.F. Marseille, Bordeaux, La Rochelle, La Pallice, Tours, Nevers, Lyon, Marseille et la calculant en cotes géopotentielles à partir de la carte des anomalies de la pesanteur trouvent eux aussi une dénivelée positive de 0,12 m.



Dénivelées Océan-Méditerranée, d'après H. Lacombe.

Fig. 90

Les valeurs des deux compensations 1957 et 1970 s'accordent, malgré la distorsion, pour donner une dénivelée positive, car si l'on compare les altitudes des marégraphes sur toute la côte, entre Ostende et Cadix (Atlantique) et Malaga et Trieste (Méditerranée) on trouve sur la moyenne :

	1957	1970
Atlantique	+ 0.081	- 0.156
Méditerranée	- 0.194	- 0.400
Dénivelée	+ 0.28 m	+ 0.24 m

Tout récemment l'I.G.N. a fait reprendre dans des conditions d'extrême précision (M. Kasser - 1983) une traverse Nord-Sud. Par rapport à cette traverse les nivellements N.G.F. et I.G.N. 1969 présentent un systématisme Sud-Nord de + 25 cm (I.G.N. 1969) et - 35 cm (N.G.F.). Il y a de fortes chances pour que cette traverse soit beaucoup plus précise que les deux nivellements précédents (bien que toute erreur systématique n'y soit pas exclue).

Compte tenu du fait que les deux nivellements antérieurs ne présentent guère de systématisme Est-Ouest, M. Kasser a corrigé les altitudes des marégraphes atlantiques de chaque système d'une quantité égale au systématisme Nord-Sud constaté pour chacun à la même altitude. Il a obtenu les cotes suivantes que l'on peut comparer à celle du R.E.U.N. 1970 augmentées de 0,39 m, (pour ramener le R.E.U.N. 1970 à l'origine Marseille).

Marégraphe	1983	1970
Dunkerque	0.28	0.31
Dieppe	0.21	0.20
Le Havre	0.30	0.28
Cherbourg	0.16	0.22
Brest	0.17	0.30
St-Nazaire	0.22	0.21
La Pallice	0.26	0.23
St-Jean-de-Luz	0.19	0.16

autrement dit R.E.U.N. 1970 et traverse 1983 sont bien d'accord, ce qui semblerait prouver que le réseau R.E.U.N. a réduit dans une certaine proportion le systématisme I.G.N. 1969 par l'intermédiaire des réseaux étrangers. Tout ceci serait à voir de plus près : la cause de ces erreurs Nord-Sud reste mystérieuse — d'autres pays les ont également constatées, la Grande-Bretagne, les USA — il n'est pas exclu d'autre part qu'il y ait une certaine pente de la mer le long du rivage atlantique (variations de salinité, régime des pressions atmosphériques, des vents, des courants, etc...).

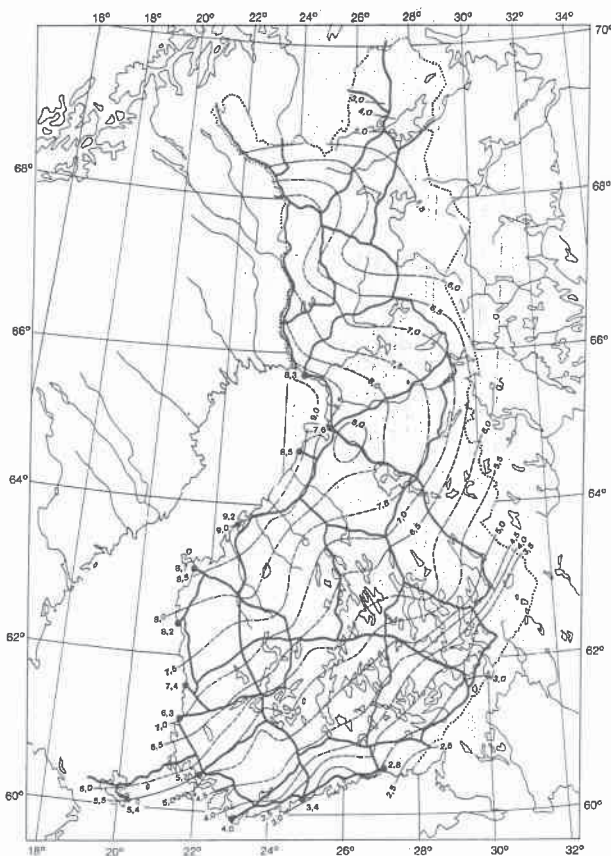
En tous cas R.E.U.N. 1957, R.E.U.N. 1970, traverse I.G.N. 1983 sont bien d'accord pour attribuer à l'Atlantique une cote supérieure à celle de la Méditerranée, respectivement 0,29, 0,24, 0,22 m et ceci entre bien dans la fourchette annoncée par H. Lacombe. On est loin des résultats de Corabeuf, 1,67 m - (1827) et de Bouquet de la Grye 1,00 m - (1872).

Quant au niveau moyen de la Baltique tous les calculs s'accordent à lui attribuer une dénivelée positive par rapport au N.A.P. croissant depuis les détroits danois jusqu'au Golfe de Botnie où elle atteint 30 cm environ.

Ici aussi on sait qu'une importante variation séculaire est observée sur tous les marégraphes, elle est négative, peut atteindre dans le golfe de Finlande — 0,7 cm par an (surrection) et s'accompagne d'un basculement général des altitudes continentales, dont on attribue la cause à une relaxation isostatique de la croûte, soulagée du poids des glaces de la dernière glaciation.

MOUVEMENTS RECENTS DE L'ECORCE TERRESTRE

Il existe au sein de l'Association Internationale de Géodésie depuis 1979, une Commission internationale des mouvements récents de l'écorce terrestre dont le but est de promouvoir la recherche de ces mouvements en relation avec les activités sismiques, volcaniques ou autres, à l'aide de mesures géodésiques réitérées. Elle définit les problèmes essentiels, les coordonne — si possible — au point de vue international, etc... Elle se subdivise en sous-commissions géographiques.



Carte de la Finlande donnant les lignes de nivellement et, en tirets, les lignes d'égale soulèvement en millimètres par an. Les points indiquent l'emplacement des marégraphes.

Fig. 91

Un centre international, domicilié à Prague, est chargé de rassembler les résultats, d'exécuter les travaux de cartographie nécessaires et d'informer la communauté scientifique des travaux récents, de constituer une bibliographie générale, etc...

Les géodésiens et les géophysiciens n'avaient pas attendu la création de cette commission pour

procéder à de telles mesures. Depuis très longtemps on parle de la variable temps comme d'une 4^e dimension en géodésie, et les différents pays ont mené des études de ce genre :

— les mesures géodésiques exécutées le long de la faille St-Andréas qui longe la côte du Pacifique et est responsable de séismes de grande magnitude (San Francisco, Alaska, etc...) sont à juste titre célèbres (fig. 91). La répétition des nivellements finlandais a mis en évidence les basculements dont nous avons parlé plus haut.

Les mesures italiennes dans le delta du Pô montrent un mouvement rapide du subsidence...

Les synthèses générales que propose la Commission sont encore, même avec l'aide de la théorie des plaques, assez lointaines selon toute probabilité, mais des études locales sont très positives et offrent à la géodésie un champ de travail attrayant.

Mouvement de surrection alpine

En 1971, M. F. Jeanrichard, Chef du Nivellement au Service Topographique Fédéral (Suisse) annonçait dans une importante communication présentée à l'Assemblée Générale de l'A.I.G. (Moscou) que la comparaison des nivellements anciens et récents sur la traverse transalpine Lucerne, Gothard, Bellinzona, Chiasso, mettait en évidence, selon toute probabilité, un mouvement de surrection du massif alpin. Il rappelait que E. Senftl avait en Autriche mis en évidence des faits analogues dans le massif de la Tauern et proposait une réunion commune aux services des nations riveraines des Alpes, (Allemagne R.F., Autriche, France, Italie, Suisse) pour étude concertée.

J. Maillard, Chef du Nivellement à l'I.G.N., qui venait précisément de terminer le nouveau réseau de 1^{er} ordre, décida de comparer sur quelques traverses alpines le N.G.F. et I.G.N. 1969, et étudia trois profils :

- un profil Bourg, Nantua, La Roche-sur-Foron
- un profil Grenoble, Aiguebelle, St-Jean-de-Maurienne, Modane, Tunnel de Fréjus
- un profil Veynes, Gap, Embrun, Briançon, Mont-Genèvre.

Le premier profil choisi à dessin dans la zone sud de la chaîne du Jura, ne révélait rien d'anormal, par contre les deux profils alpins mirent en évidence de fortes discordances systématiques entre les sommes des dénivelées brutes mesurées sur les repères retrouvés en place. Consulté, le Professeur Lemoine de l'Ecole des Mines remarqua que le profil des discordances dessinait assez fidèlement la traversée de massifs cristallins, alors que les variations observées par les suisses et les autrichiens correspondaient à des structures géologiques très voisines.

Tout ceci tend à confirmer la rémanence d'un soulèvement alpin, dans les zones cristallines ; les valeurs trouvées en Suisse, en Autriche et en France sont de l'ordre de 1 millimètre à 1,5 millimètre par an. On ne peut être absolument affirmatif, car les nivellements de précision ne sont pas exempts d'erreurs systématiques — on l'a bien vu

— mais comme le profil à travers le Jura, n'indique rien de tel, en France comme en Suisse, cela peut être un élément rassurant.

Il faut espérer que de nouvelles mesures seront reprises ultérieurement, vers 2020 pour voir, et dans cet espoir, sur les conseils du Professeur Lemoine, l'I.G.N. a reconnu et observé la partie française d'une traverse France-Italie par le Col de la Lombarde, de la Vallée de la Tinée vers Coni (Cuneo).

Dans le même ordre d'idée, l'I.G.N. a mesuré en 1972 deux traverses de haute précision des Vosges au Rhin, jusqu'à Kehl et jusqu'à Brisach : on sait que dans cette région, la vallée du Rhin est un fossé d'effondrement (Rheingraben) que les géologues et géodésiens allemands étudient avec minutie : il n'est donc pas inutile de leur apporter quelques éléments supplémentaires pour étayer leurs conclusions.

D'autres profils ont été implantés en France, à travers un certain nombre de failles, à la demande des géologues. Il faut espérer que ces travaux préliminaires ne tomberont pas dans l'oubli et que l'I.G.N. y réitérera les mesures à une cadence raisonnable.

Travaux géodésiques au Territoire des Afars

En 1972, M. H. Tazieff, au cours d'une conférence télévisée, exposait l'intérêt qui s'attachait à l'étude tectonique du Territoire des Afars et des Issas (depuis lors République de Djibouti) dans la région du Golfe Tadjoura (Nord de Djibouti). C'est une région où la séparation des plaques Afrique et Arabie, et son système de fractures se manifestent activement par des séismes, des éruptions volcaniques fréquentes, provoquant des failles ouvertes spectaculaires.

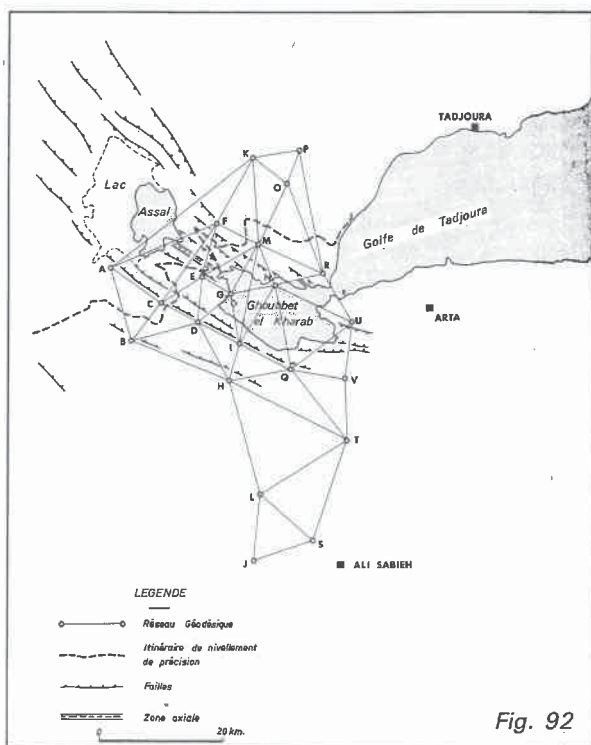


Fig. 92

Le Président de la République G. Pompidou qui était à l'écoute, lui adressa une lettre personnelle exprimant l'intérêt soulevé par son exposé et l'invitant à faire appel autant que de besoin à l'aide logistique de l'Armée qui entretenait un fort détachement sur place. M. H. Tazieff pressentit l'I.G.N. pour implanter un réseau géodésique très précis, dont l'auscultation périodique mettrait en évidence les mouvements relatifs du sol, et pourrait d'autre part servir à accrocher un réseau de détail à mailles plus petites.

Profitant des facilités qu'ouvrait la haute intervention, l'I.G.N. observait donc en 1973 un réseau extrêmement précis, appuyé au Nord et au Sud sur des régions réputées stables, doublé d'un nivellement de 1^{er} ordre joignant le Golfe de Tadjoura à la région de Gaggad (80 km à l'Est). De nombreux côtés furent mesurés au géodimètre (fig. 92). Après compensation les écarts types du réseau ressortaient à $\pm 1,2$ seconde centésimale sur les directions, $\pm 2,4$ cm sur les distances (ordre de grandeur 15 à 20 km).

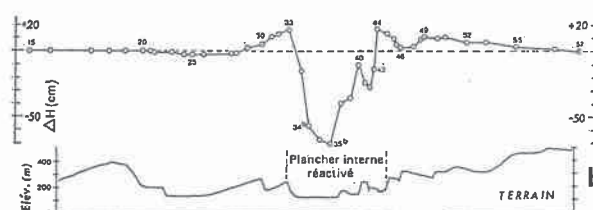
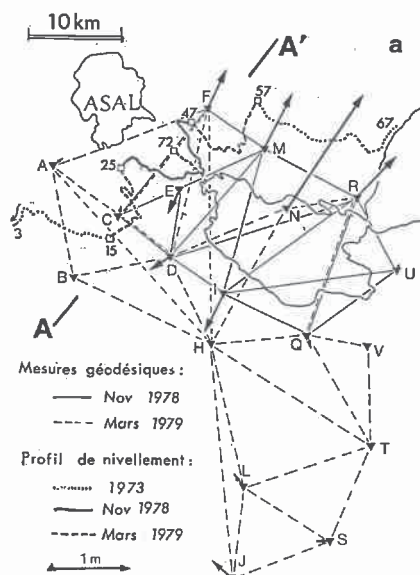


Fig. 93

Tous les points géodésiques et tous les repères de nivellement firent l'objet d'une fiche signalétique circonstanciée, permettant de les retrouver ou d'en reconstituer l'emplacement, et l'ensemble des travaux et des mesures est minutieusement consigné dans (59).

Une recherche coopérative sur programme (R.C.P. 180) chargeait l'Institut de Physique du Globe de l'étude géophysique de la région, à l'Observatoire d'Arta et dans les stations réparties dans la zone intéressée.

L'événement ne se fit pas attendre ; fin 1978 une crise sismovolcanique affectait le territoire surveillé : un tremblement de terre de magnitude 5,3

suivi d'une éruption volcanique et de nombreuses répliques, provoquait des fissures de l'ordre du mètre, des déplacements longitudinaux de l'ordre de plusieurs décimètres et réactivait des failles anciennes. La direction générale et la localisation de ces failles correspond sensiblement à une bande de 3 ou 4 km de large joignant sur la carte le Ghoubatt al Kharab au Lac Assal.

Les mesures consécutives à ces phénomènes confirmèrent l'importance des déplacements relatifs, en longueur et en Altitude (fig. 93). Après la crise de 1978, une surveillance accrue montrait que des mouvements progressifs de l'ordre de plusieurs centimètres par an continuaient à se produire. Il faut laisser aux géophysiciens le soin de les interpréter (60).

D'autres événements se sont produits depuis. Ils sont très attentivement suivis par l'I.P.G. mais le réseau reste : sa remesure complète serait certainement très souhaitable, mais ce ne sera pas une promenade.

La mission de 1973 avait été très dure : dans une région des plus déshéritées de la planète (stérilité, sécheresse, température, difficultés de parcours) la mission de l'I.G.N. sous les ordres de H. Drechou aurait éprouvé les pires ennuis sans l'aide totale que lui assura l'Armée (transports aériens, hélicoptères,

jeeps, goudiers, etc...) ce qui eut pour résultat de diviser par 3 ou 4 le concours financier de l'I.G.N. ; ce qui n'empêcha pas au retour, le contrôle financier, toujours vigilant, de demander des justifications car les crédits engagés par l'I.G.N., environ 120 000 F avaient été dépassés d'environ 10 %. La photocopie de la lettre présidentielle l'aida beaucoup à apaiser ses scrupules.

Le réseau géodésique européen (RETRIG)

Nous avons évoqué plus haut les acrobaties auxquelles se livrèrent les géodésiens au cours de la 2^e guerre mondiale pour unifier les systèmes géodésiques nationaux et en tirer un canevas unifié suffisant aux besoins militaires.

Peu après la guerre, l'Army Map Service (USA) proposa de procéder à une compensation générale des réseaux européens, ou plus exactement de constituer un cadre général homogène auquel chaque nation pouvait se raccorder à peu près correctement. Les pays de l'Est refusèrent de s'associer au projet ; les autres pays acceptèrent et firent parvenir les données correspondantes par l'intermédiaire de l'A.I.G. Les principales chaînes géodésiques nationales et les jonctions internationales correspondantes formaient l'ossature du réseau (fig. 94).



Fig. 94

Le calcul fut exécuté par l'U.S. Coast and Geodetic Survey sous la direction de Ch. A. Whilten. Il est basé sur l'ellipsoïde d'Hayford, et calé sur une ensemble de stations astronomiques : le point fondamental est donc une sorte de moyenne. La méthode de calcul adoptée est très voisine de la méthode que W. Bowie avait utilisée pour la 1^{re} compensation du réseau géodésique des USA (économie de calculs à l'époque où l'ordinateur était inconnu).

Le réseau est décomposé en chaînes et en figures de jonction de ces chaînes. Chaque figure de jonction est compensée en soi, orientée, mise à l'échelle en se basant sur une moyenne des données voisines (bases, azimuts astronomiques) ou sur les données locales si elles existent : on connaît donc pour chaque chaîne les longueurs et azimuts des côtés extrêmes où elles aboutissent. On les compense séparément avec accord de base et d'azimut aux extrémités et on calcule les différen-

ces de coordonnées ainsi définies entre extrémités de chaîne dL, dM, pour un point donné du nœud de jonction.

On déplace alors par translation en dL, dM, (moindres carrés) les nœuds de jonction en exprimant que leur position définitive satisfait au mieux les dL, dM calculés, considérés comme observations directes. Cette position fixée, on compense à nouveau les chaînes sur les nouvelles positions (variations de coordonnées) ce qui assure échelle, azimut et coordonnées par un simple changement de termes constants des systèmes initiaux. C'est simple et efficace sinon rigoureux.

Chaque nation ne reçut que les résultats qui la concernaient. Ultérieurement fut publiée une liste de déviations de la verticale établie par le Brigadier G. Bomford : elle comportait pour tous les points astro-géodésiques, alors connus de l'ensemble du réseau, les valeurs $\xi = \varnothing_A - \varnothing_G$ $\eta = (L_A - L_G) \cos \varphi$



Cette liste, qui fut tenue soigneusement à jour, puis étendue par son auteur jusqu'à l'Inde à travers la Turquie, l'Iran, etc... fut également complétée par les pays qui procédaient à des observations supplémentaires. G. Bomford en tira un premier géoi'de européen (fig. 95), rapporté au point fondamental de Potsdam (altitude zéro).

Il fut complété ultérieurement par l'I.G.N. (J.-J. Levallois, H. Monge).

Les résultats de la compensation 1950 furent critiqués. C'était pourtant un bon travail d'ensemble effectué avec soin.

En 1954, l'A.I.G. créait une Commission Euro-

péenne du RETRIG qui décida de reprendre à son compte le calcul d'ensemble du réseau. Un symposium se réunit en 1956 à Munich. Les résolutions suivantes y furent adoptées :

- le réseau européen serait constitué par l'ensemble des triangulations nationales de 1^{er} ordre disponibles
 - la compensation s'effectuait en variations de coordonnées, par la méthode rigoureuse
 - chaque nation effectuait ses propres calculs
 - les calculs nationaux aboutiraient au système normal réduit des coordonnées de liaison avec les autres pays, après élimination partielle des incon-
- nues indépendantes (méthode des groupes)

— l'ellipsoïde de Hayford serait la surface de référence, le point fondamental étant le point de la Frauenkirche (Munich) avec ses coordonnées 1950

— le centre de calcul de Munich (assisté par ceux de Delft, Londres, Paris-I.G.N.) serait le centre principal, sous la responsabilité de M. Kneissl, Président de la Commission du RETRIG.

Le réseau fut longtemps à la recherche de sa structure définitive : le RETRIG 1950 en avait montré les points faibles, il fallait reprendre ou compléter des mesures ; d'autre part, à l'époque, l'ordinateur commençait seulement à être à la disposition du géodésien, il fallut établir les programmes, étudier les méthodes de calcul propres à réduire les "erreurs d'arrondi" dans les résolutions des grands systèmes linéaires.

Le bilan du calcul s'établit ainsi (1979) :

20 238 observations de directions

2 372 observations de distances

481 observations d'azimuts

correspondant à

3 597 stations de 1^{er} ordre

7 194 inconnues (coordonnées géographiques)

3 941 constantes d'orientations (Zo de station).

Diverses études théoriques et pratiques permirent aux géodésiens de tracer des voies nouvelles.

Dans un premier calcul, purement géométrique, on ne traita que les observations angulaires et les rapports d'échelles.

Au cours d'une deuxième phase, on introduisit les azimuts de Laplace et toutes les mesures de distances. La solution correcte fut obtenue en 1979 lorsque toutes les données furent enfin rassemblées, étudiées, corrigées etc...

On y fit rentrer, au moins à titre provisoire, une liaison Doppler entre les points anglais du Nord et l'Ecosse et des Orcades et la côte de Norvège. Le réseau définitif est appelé ED 1979 (European Datum).

La part prise par la France dans cette opération fut importante :

— le réseau français avec ses 4 776 directions, ses 796 stations, ses 31 bases était un des gros morceaux. Sa préparation fut longue : reprise des carnets d'observations, rectifications, mise en forme et collationnement des données. La méthode des groupes était familière à l'I.G.N. mais les études de résolution des grands systèmes linéaires devaient être renouvelées. Les travaux d'H. Dufour ont mis en relief des méthodes d'un puissant intérêt (méthode des résidus conjugués, des gradients conjugués, évaluation de la précision de la N.T. française (voir plus haut).

Dans les organisations internationales comme l'A.I.G. il est toujours beaucoup plus facile de créer des commissions que de les dissoudre ; la Commission du RETRIG existe encore actuellement (1987). Il est question d'introduire dans le réseau les mesures spatiales, etc... On peut toujours tout améliorer car une tâche de cette envergure n'est jamais terminée. En dehors des coordonnées du réseau unifié d'Europe Occidentale proprement dite, l'entreprise a suscité des études importantes de

The European Triangulation Networks
blocking in RETRIG II - 1979



Fig. 96

mathématiques appliquées, d'évaluation, de structure des réseaux etc... malheureusement (fig. 96) les pays de l'Est n'ont point participé aux travaux, ni communiqué leurs données. Le tour de la Méditerranée occidentale par les triangulations espagnoles, marocaine, algérienne, tunisienne, italienne dont la jonction géodésique est complète — quoique parfois ancienne — n'est pas davantage entré en ligne de compte : c'est bien dommage.

Il a été dit que l'une des applications les plus importantes du RETRIG serait de fournir des informations sur les mouvements de la croûte terrestre en Europe. Je pense personnellement que ce beau travail de compensation ne le permettra point, à moins de reprendre à intervalles de 40 à 50 ans, sur les mêmes points, les mêmes mesures avec une précision accrue, ce qui paraît peu probable ni même souhaitable. C'est sur des polygones limités, avec des procédés plus précis qu'on pourrait y parvenir, et l'on est en droit de douter de l'utilité de reprendre toutes les triangulations à une époque où les méthodes sur satellite promettent des résultats très supérieurs.

Jonctions franco-anglaises

Depuis la jonction de 1861 aucune liaison géodésique n'avait été observée entre la France et l'Angleterre.

Clarke avait, en 1858, achevé la compensation du réseau britannique ; d'autre part vers 1890 la nouvelle triangulation française atteignait la région de Dunkerque : une nouvelle liaison n'aurait rien ajouté à l'état ancien, les anglais désirant ne pas modifier leurs coordonnées.

Une nouvelle triangulation des Iles Britanniques fut entreprise à partir de 1936 à l'instigation de

Martin Hotine — un grand nom — mais les stations de la jonction de 1861 n'étaient pas comprises dans le nouveau réseau.

La première compensation du RETRIG mit en évidence les faiblesses de la connection, c'est pourquoi en 1950 Institut Géographique National et Ordnance Survey convinrent d'une opération commune qui fut observée en 1951 (fig. 96). Des conférences techniques très précises mirent au point un protocole minutieux d'observations (vacations

quotidiennes, heures d'observations, conventions de signaux optiques, poids des observations).

Le groupe français était sous les ordres de J. Segons, les observations angulaires étant faites au cercle azimutal répétiteur côté français, au théodolite Tavistock côté anglais. Nous ne nous étendrons pas davantage sur cette liaison sans histoire, mission de 1^{er} ordre classique parfaitement réussie de part et d'autre où tous les triangles ferment bien, sauf 2 dont la fermeture est de l'ordre de 8 secondes centésimales.

JONCTION GEODESIQUE FRANCO-ANGLAISE 1951.

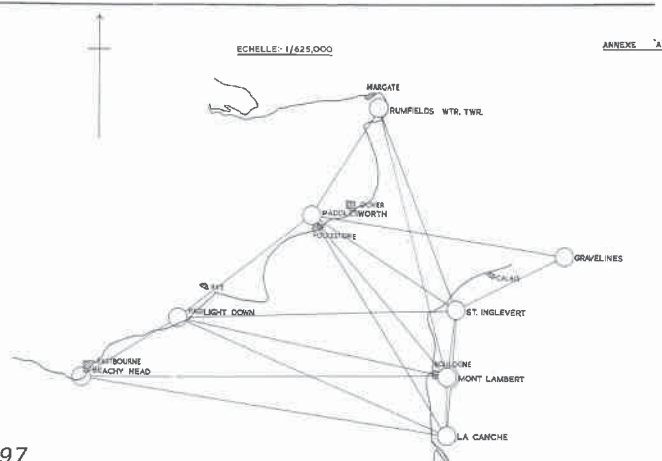


Fig. 97

Une autre liaison, plus difficile, fut entreprise en 1963 entre les sommets du Cotentin, l'île de Wight et la côte Sud anglaise (Dorset) (fig. 97). Elle différait de la précédente par la longueur des côtes de la traversée, de l'ordre de 110 kilomètres, dans une région (La Manche) où les très bonnes visibilitées sont peu fréquentes, et où, de part et d'autre, il fallait monter des signaux d'une trentaine de mètres pour assurer l'intervisibilité. Aux observations angulaires s'ajoutèrent des observations de distance au telluromètre, conçues de manière à assurer le rattachement même si les visées optiques s'avéraient inobservables. L'opération était assez hardie, la portée du telluromètre était évaluée à une soixantaine de kilomètres, mais les anglais avaient prévu et expérimenté une méthode de mesure avec stations auxiliaires montées sur un petit navire navigant vers le milieu de la visée en la traversant : le minimum de la somme des deux distances relevées de manière continue correspondait à la distance totale (sauf quelques corrections) (fig. 98).

En fait les mesures directes des distances furent moins difficiles que prévu. De part et d'autre on avait augmenté le diamètre des paraboloïdes émetteurs et récepteurs, précaution qui fut d'ailleurs gênante à cause du vent quasi permanent mais on s'aperçut que les visées passaient très bien au pied du signal... et même avec le petit paraboloïde, malgré les brouillages (fading, radars, etc...).

Les visées optiques ne passèrent pas si facilement : il fallut attendre plus d'un mois avant que deux ou trois nuits exceptionnellement claires permettent l'observation réciproque ; cette occasion ne se renouvela qu'une fois.

JONCTION FRANCO ANGLAISE DU COTENTIN (1963)

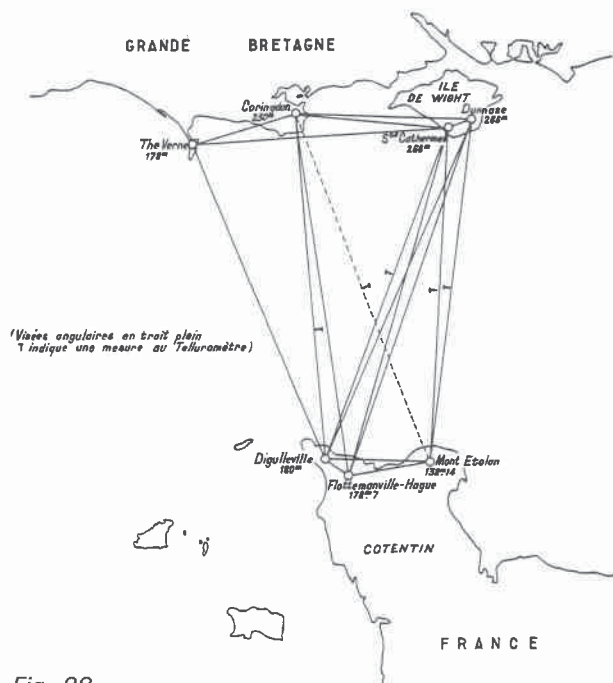


Fig. 98

La précision angulaire en a souffert, l'écart type d'une fermeture de triangle est de $\pm 5''4$ soit $\pm 2''2$, pour une direction, la fermeture maxima est de $+ 10''15$ (triangle Coringdon, Diguleville, Flottemanville).

TABLEAU DES FERMETURES

E - Mont Etolan
 FH - Flottemanville-Hague
 Di - Digulleville
 D - Dunnose
 SC - St Catherine's Hill
 C - Coringdon
 V - The Verne

Triangle	Spherical excess		Misclosure	
	Sexagesimal seconds	Centesimal seconds	Sexagesimal seconds	Centesimal seconds
D - E - FH	6.870	21.204	+ 1.012	+ 3.123
D - E - Di	9.276	28.630	+ 0.852	+ 2.630
D - E - SC	1.932	5.963	+ 2.944	+ 9.086
D - FH - Di	2.762	8.525	- 0.283	- 0.873
D - FH - C	15.715	48.503	- 1.688	- 5.210
D - FH - SC	1.792	5.531	+ 1.190	+ 3.673
D - Di - C	15.060	46.481	+ 1.884	+ 5.815
D - Di - SC	1.643	5.071	+ 3.086	+ 9.525
D - SC - C	0.424	1.309	- 2.834	- 8.747
SC - E - FH	6.730	20.772	- 0.742	- 2.290
SC - E - Di	8.987	27.738	+ 0.994	+ 3.068
SC - FH - Di	2.613	8.065	+ 1.613	+ 4.978
SC - FH - C	13.499	41.664	- 0.044	- 0.136
SC - Di - V	20.483	63.219	- 0.738	- 2.278
SC - Di - C	12.993	40.102	+ 1.632	+ 5.037
SC - V - C	1.208	3.728	+ 0.462	+ 1.426
C - Di - V	8.698	26.846	- 1.908	- 5.889
C - Di - FH	2.107	6.503	+ 3.289	+ 10.151
E - FH - Di	0.356	1.099	- 0.123	- 0.380

Les mesures de distances sont par contre très cohérentes comme le montre le tableau compartif des mesures françaises et anglaises extrait de (61).

Line	No. of measurements		Mean measured length reduced to sea level	Final accepted length reduced to sea level
	G.B.	France		
Dunnose - Mont Etolan	16	16	108 539.157 108 539.279	108 539.218
St Catherine's Hill - Mont Etolan	21	12	105 096.619 105 096.573	105 096.602
St Catherine's Hill-Digulleville	29	20	109 583.067 109 583.115	109 583.087
Coringdon - Digulleville	29	18	106 883.539 106 882.950	106 883.313
Coringdon - Mont Etolan	11*			117 268.704
Coringdon - Flottemanville Hague	12			112 668.416
Dunnose - Digulleville	14			115 015.934
Dunnose - Flottemanville Hague	10			116 464.122
St Catherine's Hill - Flottemanville Hague	14			111 529.331
The Verne - Digulleville	16			107 464.024
Digulleville - Mont Etolan		10		33 770.501
Coringdon - Dunnose	19			55 981.268
Coringdon - St Catherine's Hill	12			48 724.958
Coringdon - The Verne	12			32 421.382
The Verne - St Catherine's Hill	12			80 232.422
The Verne - Dunnose	12			87 785.151

* Computed from direct measurements on this line.

Les calculs effectués séparément par l'Ordnance Survey et l'I.G.N. donnent des résultats très voisins que les Britanniques ont publié dans [61]. Les calculs français sont restés à l'état de dossier.

Les observations étaient coordonnées par l'I.G.C.N. Savoyant pour la France et par D.C. Crouch et J. Niblock pour la Grande-Bretagne.

Les jonctions de 1951 et 1963 ont été introduites dans la compensation européenne de 1979.

RECHERCHES SCIENTIFIQUES

L'avènement de la géodésie spatiale, ses succès

spectaculaires, laissent souvent dans l'ombre les acquisitions tant théoriques que pratiques de la géodésie classique pendant cette période ; il y en eut pourtant et d'importantes.

Au premier plan des théoriciens, M.S. Molodensky, géodésien soviétique, reprenait à partir de 1942 les concepts de base de la géodésie géométrique et de la géodésie dynamique. Pour Molodensky il y a une réalité : la surface terrestre et les mesures qu'on y exécute. L'ellipsoïde est une surface sous-jacente sur laquelle on projette les points de la surface terrestre. Les altitudes "normales" sont définies par l'égalité du potentiel terrestre

mesuré et du potentiel **théorique** à l'altitude H sur la verticale de l'ellipsoïde équipotentiel de référence : $\Sigma g \cdot dh = \gamma_0 (1 - H/R) \cdot H$. Le géoïde ou plus exactement le "quasi-géoïde" est la surface d'altitude zéro de ce système ; c'est ce quasi-géoïde que l'on calcule par la formule de Stokes ou mieux à l'aide d'une équation intégrale (de Molodensky) dont la formule de Stokes n'est qu'un cas très simplifié. Molodensky a également apporté du nouveau dans l'étude des marées terrestres et du mouvement du pôle.

Martin Hotine, géodésien britannique, qui indépendamment de Molodensky retrouva certains des résultats de ce dernier, les systématisa dans le concept de géodésie tridimensionnelle "... to free geodesy from its centuries-long bondage in two dimensions..." et s'inspirant des premiers travaux de A. Marussi (Italien) exprima en langage tensoriel les propriétés fondamentales de l'espace gravimétrique.

A Bjerhammar (Suède), H. Moritz (Autriche), T. Krarup (Danemark) ont abordé, étudié, de nouvelles techniques mathématiques ou rectifié et corrigé les anciennes. Le premier a généralisé la notion de matrice inverse, proposé de hardis modèles d'extension spatiale des mesures gravimétriques terrestres, H. Moritz a étudié les méthodes d'interpolation, l'extension de la méthode des moindres carrés aux données corrélées (méthodes de prédiction, de collocation) dont T. Krarup a précisé les conditions de validité et étendu le domaine d'application aux différentes variables du potentiel, le tout sans perdre de vue les buts pratiques de la géodésie. Leurs méthodes s'appliquent en géodésie terrestre et spatiale. Ils ont fait école parmi les jeunes géodésiens, meilleure preuve de la valeur de leurs concepts.

C'est vers 1950 que E. Bergstrand, physicien suédois, mit au point le premier appareil de mesure directe des distances par modulation de l'intensité d'une émission lumineuse et mesure du déphasage entre émission et réception au retour du faisceau réfléchi. C'est au fond la méthode de la roue dentée de Fizeau reprise sous une autre forme. On sait la fortune du principe, utilisé aujourd'hui dans tous les télémètres des géomètres, et repris par le telluromètre en fréquences radios.

R.C.A. Edge en Angleterre, dans un très remarquable rapport, précise les conditions d'emploi des appareils en géodésie, et au nom de l'Ordnance Survey, établissait à 298 792,5 km/s la vitesse de la lumière par comparaison avec les bases mesurées au fil d'invar pour la nouvelle triangulation de Grande-Bretagne.

Les travaux gravimétriques à l'échelle géodésique mondiale ont été développés principalement par les Etats-Unis et le Canada. Leur calage par rapport à la valeur de la pesanteur absolue a été réalisé grâce aux appareils des physiciens métrologistes (A. Sakuma-B.I.P.M.), Cook (Teddington), Falter (USA) etc...

Mais les données gravimétriques relatives au continent asiatique et à la partie européenne de l'URSS restent inconnues, étant considérées comme confidentielles, par les intéressées.

— L'astronomie de position s'est enrichie d'instruments de très haute précision pour l'observation de la polhodie et, concurremment au Photo Zénith Tube (P.Z.T.), l'astrolabe impersonnel de A. Danjon, d'emploi beaucoup plus souple, fait partie des services des observatoires mondiaux en astronomie fondamentale.

— Dans un autre domaine ou R. Licolazet (I.P.G. Strasbourg) s'est distingué le Centre International des Marées terrestres (F.A.G.S.) domicilié à l'Observatoire de Bruxelles (P. Melchior) centralise les résultats de toutes les recherches, les analyse, les publie, les compare aux valeurs théoriques et poursuit ses propres mesures avec les appareils qu'il a mis au point (appareil Melchior-Verbandert).

— La microgéodésie de haute précision, auxiliaire indispensable du physicien nucléaire (implantation des anneaux de collision du CERN par exemple) y a trouvé son domaine d'élection, J. Gervaise (France) en est un représentant très connu.

— Les méthodes inertielles de levé d'itinéraire sont en plein essor. Elles sont employées couramment aux USA et au Canada. La France est en retard sur ce point, il est vrai que le problème s'y pose de manière différente.

En Allemagne, en Grande-Bretagne, en Italie, en URSS etc... la géodésie s'enseigne à l'Université ou dans des écoles techniques, telles que le Polytechnicum de Zurich, dans des cours de plein exercice.

En France il n'y a pratiquement pas d'enseignement universitaire de la géodésie ; il y avait antérieurement à l'Ecole Polytechnique, un cours de géodésie et d'astronomie qui a évolué vers l'astrophysique où il est maintenant spécialisé.

La géodésie s'enseigne dans les écoles d'application des établissements publics tels que l'Institut Géographique National, le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, aux ingénieurs qui y sont affectés à leur sortie de l'Ecole Polytechnique ou par les concours internes qui sont ouverts aux candidats des différents grades.

Cet enseignement est forcément dirigé vers les activités essentielles de l'établissement responsable. Il en résulte que celui qui veut acquérir des connaissances extérieures à ses activités est contraint de s'instruire par lui-même, en général dans les ouvrages étrangers, ou suivre des cours de 3^e cycle universitaire sur des matières étroitement spécialisées en rapport avec ses intentions (par exemple en mécanique céleste).

Une certaine liaison recherche, application avec l'université serait très souhaitable à la fois pour les établissements et l'université. Peut-être serait-elle possible par l'intermédiaire des Instituts de Physique du Globe : la coopération I.G.N.-I.P.C. aux Afars en est un excellent exemple.

Quoi qu'il en soit la structure administrative française, notamment les règles de recrutement, ne permettent guère de créer un organisme à la fois d'enseignement et de recherches analogue à l'Ohio State University. Le problème est difficile. Nous verrons comment il a pu être contourné pour la géodésie spatiale.

REPEREZ-VOUS ...

avec ADRESSE !

REPERE TOPOMETRIQUE MURAL ESSILOR - SLOM



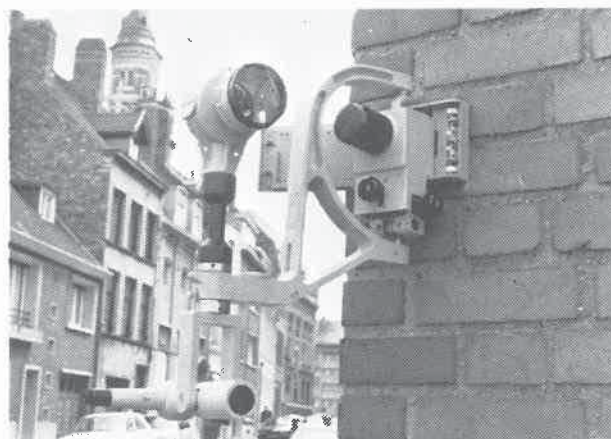
Repère fermé en position adresse postale.

Avantages :

- Point connu en XYZ.
- Double fonction (adresse postale et matricule du point).
- Stabilité et longévité du réseau Topométrique.
- Très haute résistance aux agressions (intempéries, vandalisme).
- Respect de l'environnement.
- Intégration en banque de données facilitée.
- Utilisable en toutes circonstances.
- Connaissance du positionnement des réseaux enterrés.

Double fonction du Repère :

- Fermé : adresse postale + visées angulaires.
 - Ouvert : accès aux informations logées dans le couvercle (coordonnées en XYZ du point, position des réseaux enterrés à proximité etc...).
- Utilisation pour visées avec tachéomètres électroniques (toutes marques) ou pour nivellement direct.



Repère ouvert avec accessoire pour tachéomètre électronique.

PRODUIT DEVELOPPE AVEC L'AIDE DE L'ANVAR



Documentation sur demande à :

SLOM



11 Bis, Rue du Perche, 75003 PARIS - Tél. : (1) 42 71 28 30 - Télex : 240.729

LA SOPHISTICATION PLUS LA SIMPLICITÉ.

STATIONS TOTALES NIKON DTM-1 ET DTM-5

La sophistication, c'est la haute technologie de l'opto-électronique.

Grâce à elle, une nouvelle gamme d'appareils géodésiques a vu le jour. Les stations totales, à la fois théodolites et télémètres.

Des codeurs rotatifs permettent une précision d'angle de la seconde pour le Nikon DTM-1 et du milligrade pour le DTM-5. Sans micromètre.

Un calculateur ultra performant équipe les stations totales Nikon. La mesure des distances n'avait jamais été aussi précise, aussi rapide.

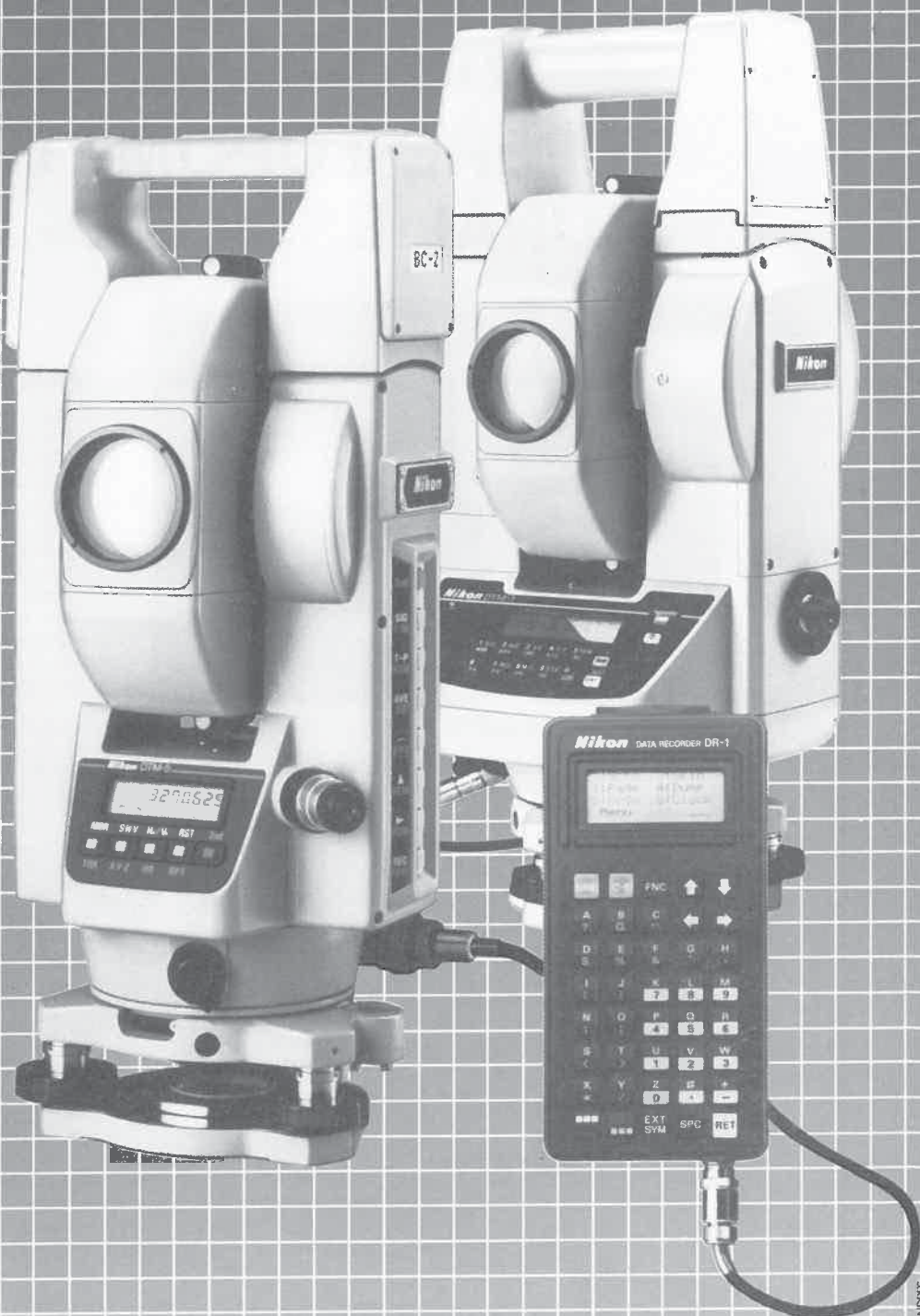
Les stations totales Nikon DTM-1 et DTM-5 ont un «plus». La simplicité, grâce à l'automatisation. Couplées avec l'enregistreur de mesures programmable DR-1, elles travaillent pratiquement seules.

Elles sont complètement Nikon. Autrement dit, robustes, fiables, avec la perfection optique et l'avance technologique Nikon.

Très compactes et légères, elles sont simples à utiliser. Vous devriez demander un essai.

Pour assister à une démonstration ou recevoir une documentation sur les stations totales Nikon DTM-1 et/ou DTM-5, écrivez ou téléphonez à Nikon France s.a.

- Division Instruments - BP 33 94222 - Charenton-le-Pont Cedex. Tél. (1) 43.75.97.55.



XVI — Géodésie spatiale : les premiers pas

L'Assemblée Générale de l'Union Géodésique et Géophysique Internationale (UGGI) réunie à Toronto (Canada) se sépara à la mi-septembre 1957.

John O'KEEFE (USA) y avait, entre autre proposé la constitution d'un groupe de travail consacré à l'étude du mouvement des satellites artificiels, que l'on s'apprêtait fiévreusement à lancer. Les tentatives s'étaient jusqu'alors soldées par des échecs et le succès paraissait encore si lointain que la proposition ne fut pas retenue. Le 4 octobre suivant, l'URSS réussissait avec Spoutnik 1 la première expérience de satellisation...

Ce fut le coup de pied dans la fourmilière.

Un champ nouveau s'ouvrait à la science, dont il embrassait une famille énorme d'activités, depuis la biologie, la médecine, le renseignement militaire, les télécommunications, la géographie physique et économique, la physique, les sciences de l'Univers et parmi elles la géodésie.

Le Conseil International des Unions scientifiques créait un Comité Spécial de Recherches Spatiales (COSPAR).

En France, la loi n° 61-1382 du 19 décembre 1961 créait un Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) :

Art. 1^{er} — Il est institué sous le nom de Centre National d'Etudes Spatiales un établissement public scientifique et technique, de caractère industriel et commercial, doté de l'autonomie financière et placé sous l'autorité du Premier Ministre.

Art. 2 — Le Centre National d'Etudes Spatiales a pour mission de développer et d'orienter les recherches scientifiques et techniques poursuivies dans le domaine des recherches spatiales.

Il est notamment chargé :

1° De recueillir toutes informations sur les activités nationales et internationales concernant les problèmes de l'espace, son exploration et son utilisation ;

2° De préparer et de proposer à l'approbation du comité interministériel de la recherche scientifique et technique les programmes de recherche d'intérêt national dans ce domaine ;

3° D'assurer l'exécution desdits programmes, soit dans les laboratoires et établissements techniques créés par lui, soit par le moyen de conventions de recherche passées avec d'autres organismes publics ou privés, soit par des participations financières ;

4° De suivre, en liaison avec le ministère des affaires étrangères, les problèmes de coopération internationale dans le domaine de l'espace et de veiller à l'exécution de la part des programmes internationaux confiée à la France ;

5° D'assurer soit directement, soit par des souscriptions ou l'octroi de subventions, la publication de travaux scientifiques concernant les problèmes de l'espace.

Rappels élémentaires

Si nous nous bornons initialement au cas théorique d'une terre à symétrie rigoureusement sphérique, un satellite artificiel (ou non) graviterait selon les lois de Képler :

— l'orbite serait une ellipse, admettant un foyer au centre de la terre (fig. 99)

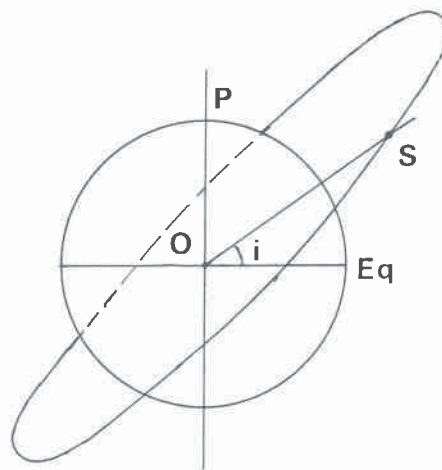


Fig. 99

— le plan de cette ellipse serait invariable par rapport aux étoiles et défilerait donc devant les méridiens terrestres

— l'orbite serait décrite suivant la loi des aires par le rayon vecteur centre de la terre - satellite

— la période T du satellite serait donnée par la 3^e loi de Képler (précisée par la théorie mécanique) $G(M + m) = 4\pi^2 a^3/T^2$ où :

— GM est le produit de la masse terrestre M par la constante de l'attraction universelle (m masse du satellite négligeable)

— T est la période de révolution

— a est le demi grand axe de l'ellipse décrite.

On a d'autre part pour la pesanteur la valeur (très grossière)

$$g = \frac{GM}{R^2} \text{ d'où la relation : } T = 2\pi (a^3/gR^2)^{1/2} : \text{un}$$

satellite qui graviterait à la surface de la terre (a = R) aurait donc pour période :

$$T_0 = 2\pi \frac{R}{g} \text{ soit environ 1 heure, 24 minutes.}$$

Un satellite de demi-grand axe "a" aura pour période approximative

$$T_0 \left(\frac{a}{R}\right)^{3/2}$$

d'où l'on tire par exemple que la période d'un satellite gravitant :

— à 1 000 km est de l'ordre de 1 heure, 45 minutes

— à 36 000 km de 24 heures, altitude des satellites "stationnaires".

On voit également qu'un satellite ne peut survoler que les régions terrestres comprises dans une zone de latitude $-i, +i$, i étant l'inclinaison du plan orbital sur l'Equateur ; les satellites polaires survolent seuls successivement toutes les régions du globe. Une base de lancement ne peut donc, sauf correction ultérieure de trajectoire, lancer que des

satellites dont l'inclinaison équatoriale i soit supérieure à sa latitude (intérêt de la base de Kourou).

Le satellite n'étant pas lumineux par lui-même n'est observable aux instruments d'optique que s'il est éclairé par le soleil ; bien entendu il ne peut être observé directement en plein jour par suite de l'intensité de diffusion de la lumière solaire, c'est donc la nuit lorsqu'il n'est pas éclipsé par le cône d'ombre de la terre qu'il est accessible à l'observation directe.

D'autre part sa vitesse de déplacement sur l'orbite est de l'ordre de $7750 \frac{R}{a}$ m/sec (elle diminue avec

a) : un satellite gravitant à 1 000 km va défilé à raison de 23' par seconde au-dessus d'un point survolé ; pour qui connaît la difficulté des pointés optiques — le champ d'une lunette est de l'ordre du degré — son observation précise implique donc les dispositifs spéciaux de suivi.

On est accoutumé de nos jours à utiliser le satellite sans le voir, mais on se doute bien que les observations optiques de nuit furent initialement les seules possibles et que ce sont elles qui ont permis de déterminer les premiers mouvements précis, d'en tirer les conséquences scientifiques qui en retour permettent les utilisations pratiques aveugles.

En France, les principaux intéressés par l'étude du mouvement des satellites étaient à titres divers :

- le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES)
- le Bureau des Longitudes
- certains services internationaux domiciliés en France
- l'université
- l'Institut Géographique National (IGN).

En 1963-1964 le CNES créait un département "Calcul d'Orbites" chargé du traitement des données de poursuite des satellites et de la restitution de leurs trajectoires, indispensable pour fournir les éphémérides nécessaires aux instruments de poursuite.

Il devait, par sa vocation même, restituer les orbites et par conséquent modéliser les forces, gravitationnelles ou autres, qui agissent. Il fallait définir le potentiel de gravité en altitude, donc faire appel aux données géodésiques déjà connues, comparer prévision et réalité, noter les discordances, interpréter et rectifier, etc...

- le Bureau des Longitudes, spécialiste des questions de référentiel stellaire et de mécanique céleste était tout désigné pour faire profiter le département naissant de son expérience en ces matières,
- le Bureau International de l'Heure et le Bureau Gravimétrique International étaient, chacun en ce qui le concernait, directement intéressés,
- l'Université (Paris VI) créait dans son diplôme d'Etudes approfondies d'astronomie une option orientée vers les spécialisations nouvelles : mécanique céleste (65), mouvement des satellites artificiels (63), géodésie dynamique, fort appréciée du CNES qui y puisa de nombreuses recrues,
- l'IGN ne pouvait que s'ouvrir aux moyens nouveaux que l'espace apportait à la géodésie pratique ou théorique.

Enfin d'autres organismes, l'ONERA, certains laboratoires du CNRS (aéronomie) avaient beaucoup à attendre des observations spatiales, qui attireraient également l'intérêt des astronomes, des aéronomistes et géophysiciens.

GEODESIE GEOMETRIQUE

Pendant que les spécialistes de mécanique céleste poussaient leurs calculs et affinaient leurs modèles, d'autres mettaient au point des méthodes purement géométriques de liaison à distance dans lesquelles, le satellite artificiel jouait le rôle de mire géodésique auxiliaire, et les étoiles celui de repères de direction. La triangulation spatiale préconisée par Väisälä (Finlande) et d'Atkinson (G.B.) est basée sur le principe suivant : en un lieu et une date donnée, au cours du mouvement diurne de la sphère céleste, les étoiles défilent et leurs positions, définies sur la sphère des fixes par des siècles d'observations astronomiques, sont reliées à l'heure sidérale locale HS par des relations trigonométriques.

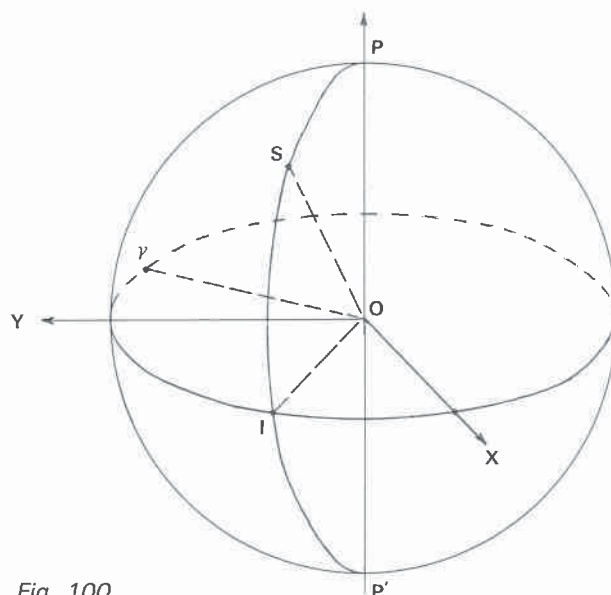


Fig. 100

Soit HS l'heure sidérale locale au méridien G, H l'angle horaire (observé) δ la déclinaison de l'étoile, α son ascension droite, on a :

$$\begin{aligned} \widehat{G\gamma} &= HS & \widehat{\gamma I} &= \alpha & \widehat{GI} &= H & IS &= \delta \\ \text{et les cosinus directeurs de la direction stellaire dans un système d'axes rétrograde sont :} \\ p &= \cos H \cos \delta = \cos (HS - \alpha) \cos \delta \\ q &= \sin H \cos \delta = \sin (HS - \alpha) \cos \delta \\ r &= \sin \delta \end{aligned}$$

Si, pour simplifier, on adopte comme origine terrestre le méridien de Greenwich, l'heure sidérale, l'ascension droite et la déclinaison sont définies avec une grande précision par les éphémérides astronomiques en fonction du temps universel t . La direction spatiale OS est donc caractérisée dans le **système terrestre de Greenwich** par p, q, r , à l'instant t , rapporté à un système d'axes rectangulaires o, x, y, z , tel que o, x, y soit dans le plan méridien de Greenwich (oy dirigé vers l'ouest) : tou-

tes les étoiles cataloguées sont donc définies en position.

Supposons alors qu'un satellite spécialisé émette un signal lumineux instantané, que l'on photographiera sur fond d'étoiles de plusieurs stations terrestres différentes. Par effet de perspective, le satellite apparaîtra sur les plaques de chaque station sur un fond d'étoiles différentes, dont les directions p, q, r , sont connues dans le système x, y, z , de Greenwich, pourvu que l'on connaisse en chaque station l'heure précise T.U. de la prise de vues des étoiles de fond. Si par conséquent, on peut par mesure des plaques et interpolation déterminer l'ascension droite et la déclinaison de l'éclair lumineux, on connaît sa direction précise (p, q, r) et l'intersection des rayons correspondants définit la position spatiale de l'éclair dans le système terrestre.

S'il y a plusieurs éclairs successifs, enregistrés aux mêmes stations, dont quelques-unes peuvent n'être pas connues, les visées correspondantes définissent à partir des positions calculées du satellite des intersections inverses qui se recoupent sur les points inconnus et les définissent en position dans le système général des coordonnées : c'est une triangulation spatiale, que deux points connus en position sur la terre suffisent à définir.

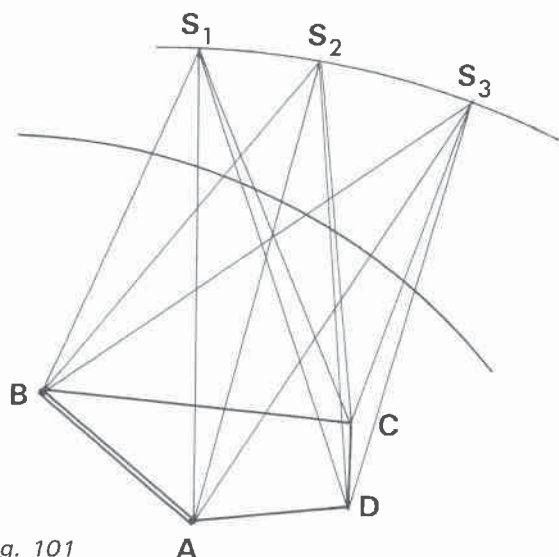


Fig. 101

Satellites utilisés

A des fins géodésiques furent lancés un certain nombre de satellites émetteurs d'éclairs (ANNA, GEOS B). Ils étaient programmés pour émettre au-dessus d'une région donnée à la surface terrestre, une salve de 5 à 7 éclairs, à une cadence de l'ordre de la seconde, à un instant bien précis, ce qui permettait de les identifier avec certitude sur les plaques sensibles, connaissant les coordonnées approchées de chaque station.

D'autres satellites (GEOS A, D1C, D1D, STARLETTE...) étaient munis en surface de prismes cataphotes (corner reflectors) : on connaît la propriété du prisme trirectangle de réfléchir exactement dans la direction incidente tout rayon lumineux qui le frappe, il en résulte que si on réussit à émettre d'une station terrestre vers le satellite un éclair lumineux suffisamment énergétique et si l'on peut en

détecter le retour, le temps de parcours aller-retour donnera la distance du satellite à l'instant d'émission (compte tenu des corrections d'aberration). Ils étaient destinés à la mesure de la distance station-satellite, à l'aide de télémètres "Laser".

Les satellites Echo I et Echo II, plus tard le satellite PAGEOS, lancés par les Etats-Unis, étaient des ballons de fort rayon en matière plastique très fine, revêtus d'une couche métallisée réfléchissant le soleil. Ils étaient lancés pliés, et se déployaient dans le vide par sublimation d'un composé chimique spécial, déposé à l'intérieur. Ils se présentaient comme des étoiles brillantes comme VEGA (Echo I et II) ou la polaire (PAGEOS), et laissaient sur la plaque photographique une trace très brillante.

On les utilisait en triangulation spatiale en les photographiant avec des chambres munies d'obturateurs à éclipses (cadence de l'ordre de la seconde) : la trajectoire apparaissait alors sur la plaque comme une courbe en pointillé dont les traits devaient être datés avec une grande sûreté (10^{-3} seconde) si on voulait une précision de l'ordre du décimètre dans les liaisons géodésiques. Un raisonnement très grossier montre que la distance des points terrestres déterminés de cette manière est de l'ordre de grandeur de l'altitude du satellite. Les satellites Echo permettaient des liaisons de l'ordre de 1 000 à 2 000 kilomètres, le satellite Pageos, destiné à une triangulation spatiale mondiale entreprise par l'US COAST AND GEODETIC SURVEY, se prêtait à des liaisons de 4 000 à 6 000 kilomètres.

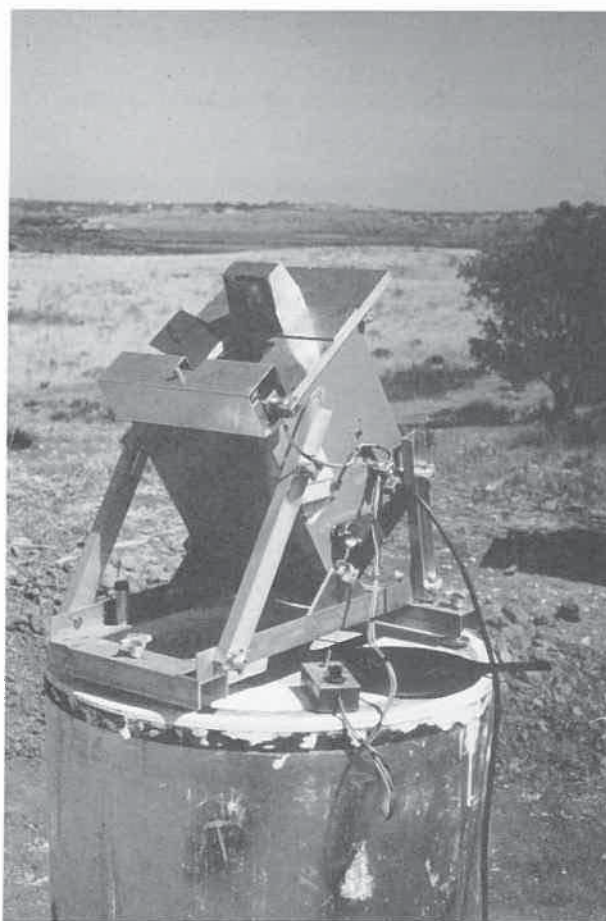


Fig. 102

Les instruments d'observation photographique étaient de types assez variés :

- les chambres "balistiques" Wild BC 4 étaient des théodolites photographiques très perfectionnés de grande ouverture $f/2,6$, diamètre d'objectif de 12 cm munis d'obturateurs permettant soit de cadencer les prises de vues (satellites passifs brillants) soit de photographier les éclairs émis par le satellite. Elles étaient montées sur limbes gradués, de précision géodésique, et pourvues de très bons niveaux,

- des chambres beaucoup plus modestes — et moins coûteuses — pourvues d'objectifs de faible ouverture relative et d'obturateurs tournants synchronisés par les signaux horaires furent utilisées par l'IGN en particulier pour l'observation des satellites Echo I et II et Pageos (fig. 102),

- les chambres BAKER-NUNN utilisées particulièrement par les équipes du Smithsonian Astrophysical Laboratory étaient de véritables télescopes à grand champ avec lesquels on pointait et poursuivait le satellite — son image recueillie sur un film était donc ponctuelle — tandis que les étoiles y apparaissaient successivement sous la forme de segments parallèles dont on rapportait l'origine à la position du satellite et à la base de temps. Il fallait évidemment disposer d'un catalogue stellaire très dense.

En fait, un certain nombre de laboratoires construisaient leur propre matériel d'observation à exemplaire souvent unique, comme par exemple la caméra "Antares" construite par P. Muller (Observatoire de Nice).

Précisions des mesures photographiques

Divers facteurs entrent en compte :

- la vitesse orbitale des satellites utilisables est de l'ordre de 7 km par seconde, si par conséquent on admet que les différentes chambres photographiques qui observent simultanément sont synchro-

nisées à 10^{-3} secondes près, une première indétermination sera de l'ordre de grandeur de quelques mètres,

- la précision des mesures sur plaques photographiques (on n'emploie pas les films trop déformables) est de l'ordre de ± 2 micromètres, pour les étoiles ou le satellite ; pour des focales de l'ordre de 30 cm, ceci implique une précision de l'ordre de $1/150\,000$, correction faite des distorsions de l'objectif, et l'emploi d'émulsions fines,

- les coordonnées des étoiles doivent être connues à mieux qu'une seconde d'arc près ($1/200\,000$) ce qui est vrai pour les étoiles fondamentales, mais peut ne l'être pas pour toutes les étoiles du champ, ce qui peut poser d'irritantes questions portant sur le choix du catalogue, sur le nombre des étoiles à faire entrer dans la mesure et sur les méthodes mathématiques d'interpolation pour y rattacher les positions observées du satellite,

- il faut également tenir compte de la réfraction différentielle entre les étoiles et le satellite, etc...

En définitive, une mesure de direction sur plaque est susceptible d'une précision de l'ordre de 10^{-5} ou mieux sur une moyenne de mesures.

D'autre part on ne sait pas très bien comment se comporte le réflecteur ballon, diffuseur ?, réflecteur parfait ?, le ballon est-il réellement sphérique ou déformé ?... le point lumineux visé dépend de la station et la phase y varie en fonction du temps ; il est donc bien difficile de définir à 3 ou 4 mètres près le point réellement visé, et ceci limite encore la précision des visées sur ballon.

Certains de ces inconvénients sont évidemment évités dans l'observation des satellites à éclairs, dont la servitude essentielle réside dans l'obligation de programmer la région où le satellite émettra ses éclairs : ce type d'observations ne peut donc être réservé qu'à l'exécution d'un programme précis, accessible aux seuls participants, mais les résultats sont bien meilleurs.

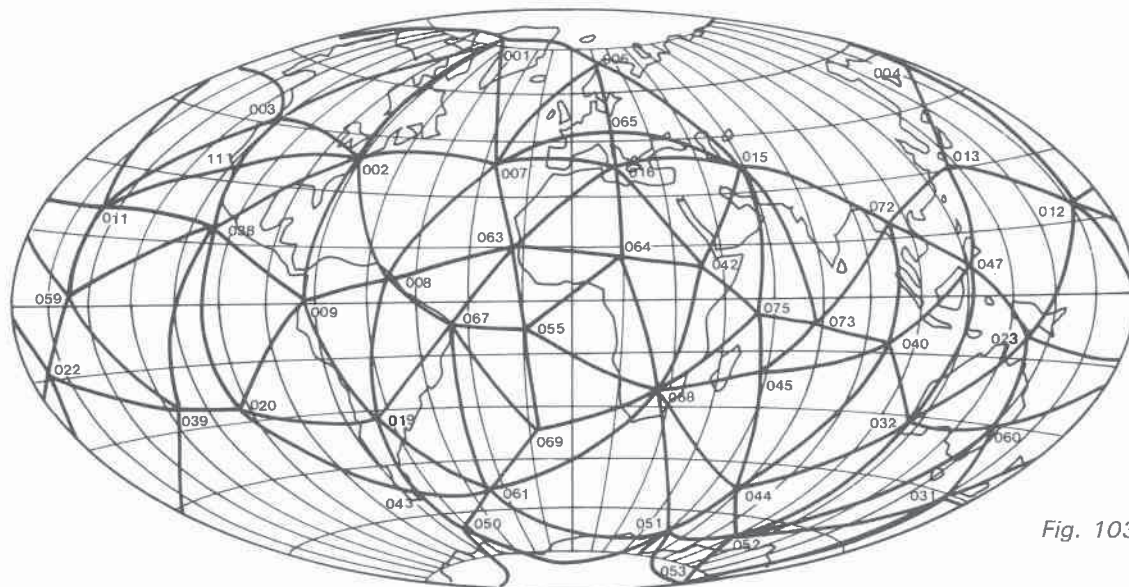


Fig. 103

— Les 45 stations du système géodésique mondial obtenu par triangulation spatiale par H. H. Schmid (d'après le *Journal of Geophysical Research*, V, 79, p. 5362, 1974, publié par l'*American Geophysical Union*).

Le réseau du Coast and Goedetic Survey

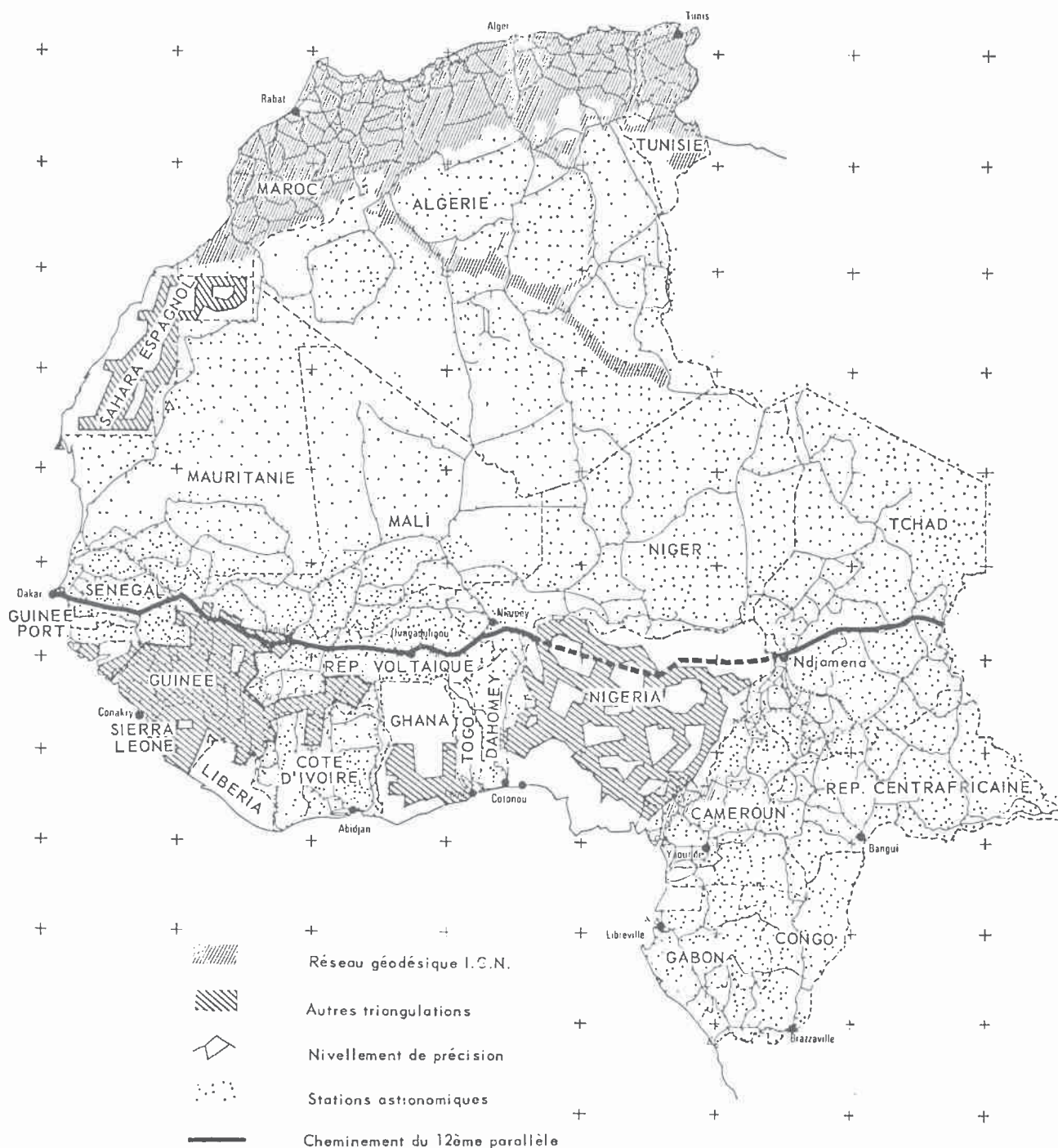
Le satellite ballon Pageos fut lancé par les Etats-Unis pour servir de cible lumineuse dans l'exécution d'un projet mondial (Fig. 103). La campagne fut préparée et menée avec le soin minutieux que l'on devine et débuta vers 1966-1967.

Les observations étaient enregistrées par des chambres balistiques BC4 de Wild placées soigneusement sous coupole de campagne.

L'échelle du réseau était assurée par un certain

nombre de très longs cheminements terrestres de l'ordre de plusieurs milliers de kilomètres, observés dans des conditions draconiennes de précision :

- les cotes de l'ordre de 20 kilomètres étaient mesurées au géodimètre et vérifiées au telluromètre, avec étalonnage constant des fréquences,
- la précision angulaire était celle du 1^{er} ordre,
- la transmission d'azimut était soutenue par de nombreuses stations d'azimut de Laplace (une sur trois ou quatre stations) avec maximum de fermeture tolérée,



- Canevas planimétrique fondamental.

Fig. 104

— en chaque station on déterminait les coordonnées astronomiques de manière à pouvoir calculer les altitudes d'un géoïde.

La Fig. 104 représente le cheminement du 12^e parallèle, de N'Djamena à Dakar ; observé par l'IGN sauf la partie traversant le Nigeria.

La précision du réseau (U.S.C.G.S) est excellente — environ deux fois meilleure que celle des travaux IGN correspondants (voir plus loin), celle des coordonnées est de l'ordre de ± 10 m et on en a déduit un ellipsoïde terrestre de demi-grand arc 6.378 128 m bien voisin des valeurs admises pour la référence internationale 1980.

Ce réseau de stations peut d'autre part constituer un réseau de poursuite précis, comparable aux réseaux dynamiques et indépendant de toute hypothèse.

Ce travail peut être considéré comme le couronnement de la géodésie géométrique.

GEODESIE DYNAMIQUE

Au-delà des lois de Képler, le mouvement du satellite est perturbé : le potentiel terrestre est de la forme (r distance du satellite au centre des masses terrestres) :

$$W = \frac{GM}{r} \left[1 + \frac{y_2}{r^2} + \dots + \frac{y_n}{r^n} + \dots \right]$$

où les quantités y_n sont les "fonctions sphériques" : chaque y_n est une combinaison linéaire précise de $(2n + 1)$ fonctions des lignes trigonométriques de la latitude et de la longitude terrestres. Leur théorie a été établie par Legendre et Laplace pour étudier précisément le champ de gravité des planètes et de la terre en particulier.

Comparée à l'orbite théorique du satellite décrite selon les lois de Képler, c'est-à-dire selon le terme GM/r du potentiel, l'observation met en évidence des discordances systématiques attribuables au potentiel perturbateur et à d'autres causes physiques : attraction perturbatrice luni-solaire, marées de l'océan et de l'écorce, frottement atmosphérique, pression de radiation solaire qui sont très loin d'être négligeables.

Si l'on représente toutes ces actions sous forme de développements mathématiques le problème revient à identifier les coefficients (inconnus), des monômes trigonométriques puis à résoudre les énormes systèmes numériques dont ils sont solutions.

La mécanique céleste est évidemment à la base de tous les calculs, mais le travail ne peut guère avancer que pas à pas, par approximations successives, vu l'extrême imbrication des actions individuelles qui parfois se séparent mal.

Heureusement, l'expérience a montré que les coefficients des fonctions y_n décroissent en fonction de n , ce qui permet (en calcul) d'isoler plus facilement les termes principaux, et de tronquer les développements à un ordre raisonnable.

La théorie du mouvement d'un satellite gravitant est certainement complexe, les calculs de mécanique céleste ont un aspect rébarbatif que les non

spécialistes mettent un certain temps à ingurgiter. Il faut d'autre part que les éléments initiaux des satellites étudiés se prêtent à la mise en évidence des coefficients numériques du développement, autrement dit que tel écart à l'orbite théorique soit susceptible de ne caractériser qu'un petit nombre d'influences : l'étude du champ de gravitation implique donc une grande variété de données initiales, inclinaison de lancement, altitude de lancement, direction spatiale de la vitesse initiale, etc... Les satellites de haute altitude seront surtout sensibles aux premiers harmoniques du développement, ceux de basse altitude sont sensibles aux variations à courte période du champ mais sont perturbées par le frottement atmosphérique, qui dépend lui-même de l'activité solaire...

Les pionniers de l'étude du mouvement des satellites artificiels furent Brouwer, Kozaï, Ishak, Gaposhkin, Anderlé, aux Etats-Unis, en URSS, Axionov et l'Institut d'Astronomie Théorique de Leningrad, en Grande-Bretagne King-Hele, G.E. Cook, en France les astronomes J. Kovalesky (62), B. Morando (Bureau des Longitudes) (63), et les personnels spécialistes du Centre National d'Etudes Spatiales et de l'ONERA. Les géodésiens de l'IGN n'étaient initialement pas préparés à ces problèmes dont la nouveauté et l'intérêt attirèrent vers la géodésie française des vocations et des énergies nouvelles, pour son plus grand bien.

Les éléments fondamentaux

La description du mouvement d'un satellite artificiel repose essentiellement sur une procédure d'approximations successives : la première approximation permet de définir une orbite spatiale képlérienne moyenne (ellipse, loi des aires, plan de l'orbite, dimensions, positions dans le plan orbital).

Le système d'axes de référence est celui d'un catalogue stellaire établi pour une date donnée (en général 1950,0). L'équateur de ce catalogue ($\delta(1950,0) = 0$) est le plan xoy, le point O est le centre des masses terrestres et le point vernal de l'époque définit la direction ox ($\alpha(1950,0) = 0$).

Par rapport à ce système d'axes, les caractéristiques de l'orbite sont :

- l'inclinaison i du plan de l'orbite,
- l'angle Ω , position de l'intersection du plan orbital avec ox : $\Omega = Ox, ON$,
- dans ce plan, la direction du sommet P, le plus proche de O, de l'ellipse képlérienne (périgée) est définie par l'angle $\omega = ON, OP$.

Le demi-grand axe de l'ellipse est a , son excentricité e .

La liaison entre la description géométrique de l'orbite et le temps est la variable $M = n(t - t_0)$ où n est le moyen mouvement et t_0 l'instant du passage du satellite au périgée, on pose souvent $Mo = nto$.

La liaison entre la position du satellite sur son orbite et le temps t est assurée par les définitions suivantes :

$$n = 2\pi/T$$

$$GM = 4\pi^2 a^3/T^2 \quad n = \sqrt{GM/a^3} \text{ (3e loi de Képler)}$$

En définitive 5 quantités définissent à un instant donné la géométrie de l'orbite spatiale du satellite.

a, e demi grand axe et excentricité de l'ellipse orbite,
i, inclinaison du plan, Ω l'ascension droite du nœud ascendant,
 ω argument de la latitude du périégée.

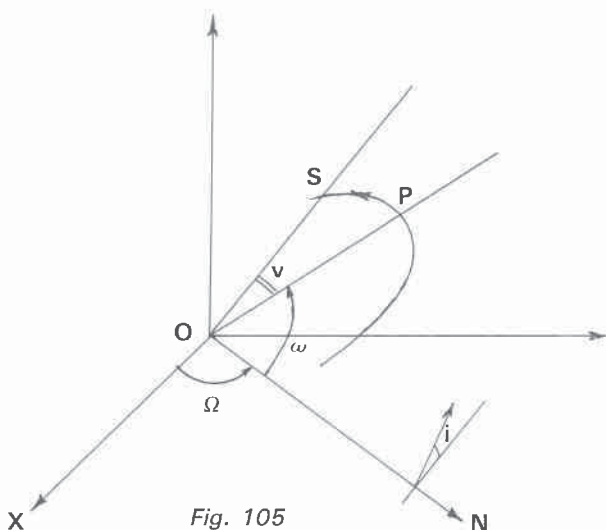


Fig. 105

La liaison avec la variable temps implique la connaissance de l'instant t_0 de passage au périégée et la connaissance de la constante GM ou de la période T du satellite. Tous les éléments étant ainsi déterminés on peut calculer à un instant t par un calcul analytique simple les coordonnées spatiales théoriques x, y, z et celles du vecteur vitesse x, y, z (62).

Inversement si l'on observe à partir d'une station terrestre (de coordonnées topocentriques connues par rapport au centre O) n positions successives du satellite ($n > 3$) en ascension droite et déclinaison, rapprochées dans le temps (environ 5 minutes), on peut en déduire à l'instant moyen, les coordonnées géocentriques x, y, z, la vitesse x, y, z du satellite ainsi que la distance satellite observateur (méthode de Laplace) et en tirer les 6 éléments a, e, i, Ω , ω , t_0 (62).

Perturbations

Les 6 éléments de l'orbite seraient invariants, à la précision des observations près, si la terre était à symétrie rigoureusement sphérique ; il n'en n'est rien et si l'on répète le calcul précédent sur d'autres données d'observation les 6 éléments considérés varient dans le temps de manière continue ; on enregistre des variations périodiques ou des dérivées fonction du temps, que l'on compare à leurs expressions algébriques tirées de l'analyse mathématique des causes perturbatrices, en particulier le potentiel terrestre, ce qui revient à dire que a, e, i, Ω , ω , t_0 varient en fonction du temps.

La constante GM de gravitation du potentiel terrestre a été déterminée par l'étude du mouvement

des sondes spatiales lorsqu'elles s'éloignent de la terre et par conséquent ne sont pratiquement plus sujettes qu'au 1^{er} terme du potentiel terrestre (et au potentiel lunaire), c'est ainsi qu'on a proposé pour elle des valeurs de l'ordre de (1984).

$$GM = 3986005 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{sec}^2 \text{ (S.I.)}$$

Gauss et Lagrange avaient donné dès le début du XIX^e siècle, des formulaires exprimant les variations des 6 éléments de l'orbite képlérienne

($\frac{da}{dt}, \frac{de}{dt}, \frac{di}{dt}, \frac{d\Omega}{dt}, \frac{d\omega}{dt}, \frac{dM_0}{dt}$) en fonction :

- soit des forces perturbatrices, c'est-à-dire des forces qui ne sont pas forcément contenues dans la description képlérienne (Gauss) et qui peuvent être de nature quelconque,
- soit des dérivées partielles du potentiel perturbateur par rapport aux 6 variables képlériennes (Lagrange), qui ne contiennent pas par exemple le frottement atmosphériques.

Nous ne nous hasarderons pas dans les très longs calculs de mécanique céleste que le lecteur trouvera en détail en (62), (63), (65). Nous donnons seulement ci-dessous le tableau des équations de Lagrange tiré de (62) où R désigne la fonction perturbatrice, c'est-à-dire, la partie du potentiel : $R = W - GM/r$.

$$\frac{da}{dt} = \frac{2}{na} \frac{\partial R}{\partial M}$$

$$\frac{de}{dt} = \frac{1-e^2}{na^2 e} \frac{\partial R}{\partial M} - \frac{\sqrt{1-e^2}}{na^2 e} \frac{\partial R}{\partial \omega}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{\cos i}{na^2 \sqrt{1-e^2} \sin i} \frac{\partial R}{\partial \omega} - \frac{1}{na^2 \sqrt{1-e^2} \sin i} \frac{\partial R}{\partial \Omega}$$

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{na^2 \sqrt{1-e^2} \sin i} \frac{\partial R}{\partial i}$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\sqrt{1-e^2}}{na^2 e} \frac{\partial R}{\partial e} - \frac{\cos i}{na^2 \sqrt{1-e^2} \sin i} \frac{\partial R}{\partial i}$$

$$\frac{dM}{dt} = n - \frac{2}{na} \frac{\partial R}{\partial a} - \frac{1-e^2}{na^2 e} \frac{\partial R}{\partial e}$$

Sa simple lecture montre que R doit être exprimée en fonction des 6 éléments orbitaux (calculs algébriques assez fastidieux). D'autre part M, Ω , ω étant des angles, intervenant par leurs lignes trigonométriques, les quantités $\frac{da}{dt}, \frac{de}{dt}, \frac{di}{dt}$ s'exprimeront

en fonction périodiques de Ω, ω, M : a, e, i, oscilleront donc autour d'une valeur moyenne finie, tandis que les termes $\frac{d\Omega}{dt}, \frac{d\omega}{dt}, \frac{dM}{dt}$ étant fonction des

a, e, i, pourront avoir une partie constante, ce qui donnera pour Ω, ω, M , une dérive proportionnelle au temps. Enfin la connaissance d'élément approchés, a, e, i, Ω, ω, t_0 et celle de leurs dérivées $\frac{da}{dt}, \frac{de}{dt}, \frac{di}{dt}, \frac{d\Omega}{dt}, \frac{d\omega}{dt}, \frac{dM}{dt}$ va permettre de calculer à un instant donné une position correcte du satellite perturbé, puisque l'on peut calculer les valeurs pré-

cises des éléments instantanées $a, e, i, \Omega, \omega, t$ en calculant les dérivées dont on connaît l'expression, et en les intégrant dans le temps en appliquant le formulaire képlérien.

Harmoniques zonales, tesseraux, sectoriaux

Dans l'expression du potentiel perturbateur, chaque terme Y_n contient $2n + 1$ fonctions des lignes trigonométriques de la latitude géocentrique φ et de la longitude L .

Chacun d'entre eux est de la forme (q variant de 0 à n).

$J_n q P_n q (\sin \varphi) \cos q (L - L_0)$ ou encore $P_n q (\sin \varphi) (C_n q \cos q L + S_n q \sin q L)$ est une fonction connue, définie par n et q (Legendre), $J_n q$ un coefficient numérique (inconnu). On appelle harmoniques **zonales**, ceux pour lesquels $q = 0$; ils sont indépendants de la longitude, harmoniques **tesseraux** ceux pour lesquels $0 < q < n$ qui dépendent à la fois de la latitude et de la longitude, harmonique **sectorial**, celui pour lequel, $q = n$; il ne dépend que de la longitude.

Déterminer les $J_n q$ et $L_n q$ (ou $C_n q, S_n q$) est un des problèmes essentiels de l'analyse harmonique des perturbations. S'il est résolu, au moins jusqu'à un certain degré, le champ spatial W sera connu à cette précision, ce qui permettra de définir à chaque instant, la position des satellites avec toutes les conséquences qui en résultent pour les problèmes de navigation et de localisation dans un référentiel terrestre général, répondant ainsi à une question que les géodésiens se posaient depuis longtemps comme on l'a vu. D'autre part si l'on ajoute à W le potentiel centrifuge $1/2 \omega^2 r^2 \cos^2 \varphi$ et si l'on

$$\text{pose } W + \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \cos^2 \varphi = \text{Constante}$$

au voisinage de la terre cette expression représente — sous quelques réserves mathématiques — une surface de potentiel constant, c'est-à-dire le géoïde.

A titre d'exemple très simple, le potentiel du sphéroïde de Clairaut s'écrit

$$W = G \left[\frac{M}{r} + \frac{1 - 3 \sin^2 \varphi}{2r^3} \times (C - A) \right] + \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \cos^2 \varphi$$

dans cette expression le terme $\frac{3 \sin^2 \varphi - 1}{2}$ est un

polynôme de Legendre et ce potentiel s'écrit, posant $J_{2,0} = (C - A)/Ma^2$

$$W = \frac{GM}{r} \left[1 - J_{2,0} \frac{a^2}{r^2} \times P_2 (\sin^2 \varphi) \right] + \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \cos^2 \varphi$$

$J_{2,0}$ est le coefficient numérique de l'harmonique zonal du 2^e degré, c'est lui qui combiné avec le terme du potentiel centrifuge détermine l'aplatissement du sphéroïde de référence par

$$\alpha = \frac{3}{2} J_{2,0} + \frac{1}{2} m \quad (1^{\text{re}} \text{ question de Clairaut}).$$

D'une manière plus générale les harmoniques zonales décrivent le potentiel d'une surface de révolution dont la méridienne et la distribution des masses seraient plus complexes que celles du sphéroïde de Clairaut.

A chaque révolution, le satellite subit de manière répétitive l'influence de ces harmoniques, selon son

inclinaison, son altitude, son excentricité, quel que soit l'angle Ω . L'accumulation de ces effets sera mise en évidence par l'observation, en particulier celle des dérives.

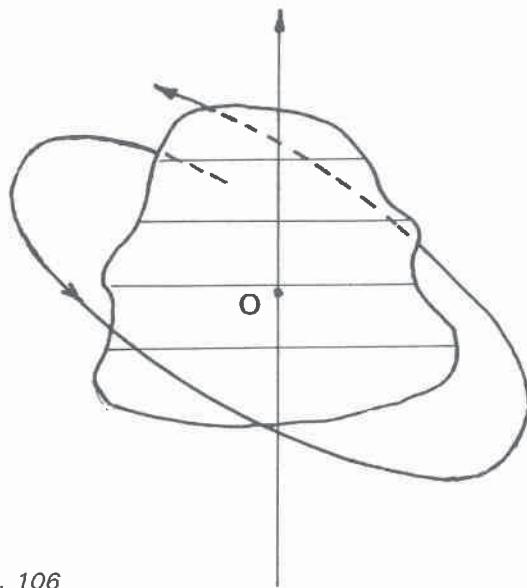


Fig. 106

Les harmoniques zonales d'ordre pair (polynômes de Legendre) ont une composante symétrique dans les deux hémisphères : $P_n (\sin^2 \varphi)$ alors que les harmoniques zonales impairs ont le signe de $\sin \varphi$: $P_{2n+1} (\sin \varphi)$: ils entraînent donc une dissymétrie hémisphère nord, hémisphère sud dans les dérives ou les variations des éléments moyens ; c'est précisément ce qui permet de séparer leurs actions de celles des harmoniques pairs, et toutes ces actions sont indépendantes de la rotation terrestre.

L'action des harmoniques tesseraux est beaucoup plus difficile à mettre en évidence et on a longtemps considéré qu'elle agissait comme un bruit : elle dépend en effet de dissymétries du potentiel (ou de l'attraction) fonctions de la latitude et de la longitude, très variables d'un point à l'autre de la terre dues à des variations du relief, des densités internes au sens large etc... mais il existe un cas où de telles actions peuvent être mises en évidence, c'est le cas de la résonance : supposons que la période d'un satellite soit un sous multiple presque exact de 24 heures. Toutes les 24 heures il survolera les mêmes régions, dont les actions combinées influenceront de même manière sur son orbite : il y aura donc un effet cumulatif observable caractérisant un $J_n q$ et un $L_n q$ significatif.

Inutile de préciser que les expressions permettant de calculer les J_n sont très complexes.

Dès 1958, on savait que l'aplatissement $1/297$ de la référence géodésique internationale devait être révisé ; en toute première approximation les premiers calculs montraient que l'orbite du satellite pouvait se déduire de celle d'une ellipse moyenne :

— dont le plan serait animé autour de l'axe des pôles d'un mouvement de rotation uniforme (facteur $d\Omega/dt$),

— dont la ligne des apsides (grand axe) tournerait dans ce plan avec une vitesse angulaire uniforme (facteur $d\omega/dt$).

La mécanique céleste donne pour ces deux quantités les valeurs respectives

$$\frac{d\Omega}{dt} = - \frac{3}{2} \frac{nR^2 \cos i}{a^2 (1 - e^2)^2} J_{2,0}$$

$$\frac{d\omega}{dt} = 3n R^2 \frac{(3 - 15/4 \sin^2 i)}{a^2 (1 - e^2)^2} J_{2,0}$$

où R est le rayon terrestre, a le $1/2$ grand axe de l'ellipse képlérienne ; e l'excentricité de l'orbite, n le moyen mouvement, i l'inclinaison de l'orbite sur l'équateur et $J_{2,0}$ le coefficient numérique intervenant dans l'équation de Clairaut comme on vient de le voir.

L'interprétation des observations donnait pour J_2 des valeurs comprises entre 1082.1×10^{-6} et 1082.7×10^{-6} , l'aplatissement était donc de l'ordre de $1/298.2$, valeur voisine de celle trouvée par Helmert (1901) et par Isotoff (URSS-1942) pour l'ellipsoïde dit de Krassovsky, à partir de l'analyse de la pesanteur et des arcs connus.

Le coefficient $J_{2,0}$ actuellement évalué à 1082.63×10^{-6} est un nombre pur. C'est de loin le plus grand des J_{nq} , il correspond à

$$\alpha = 1/298.257$$

Les autres J sont de l'ordre de quelques 10^{-6} .

Pour montrer la complication réelle des calculs algébriques nous reproduisons selon (62) un tableau exprimant les valeurs de $\frac{d\Omega}{dt}$ en fonction des coefficients J_{2n} jusqu'à l'ordre 10, en attirant l'attention du lecteur sur le fait que ces formules ne contiennent qu'une partie des termes nécessaires (il n'y a aucun terme J d'ordre impair, ni action luni-solaire, ni etc...).

a, e, i , les valeurs moyennes des éléments métriques,

$$p = a(1 - e^2),$$

$$s = \sin i,$$

$$n = \sqrt{GM/a^3}.$$

$$\begin{aligned} \frac{d\Omega}{dt} = & -\frac{3}{2} J_2 \frac{nR^2}{p^2} \cos i \\ & + J_2 \frac{nR^4}{p^4} \cos i \left[\left(-\frac{45}{8} + \frac{3e^2}{4} + \frac{9}{32} e^4 \right) + \left(\frac{57}{8} - \frac{69}{32} e^2 - \frac{27}{64} e^4 \right) s^2 \right] \\ & + J_4 \frac{nR^4}{p^4} \cos i \left(\frac{15}{4} - \frac{105}{16} s^2 \right) \left(1 + \frac{3e^2}{2} \right) \\ & + J_6 \frac{nR^6}{p^6} \cos i \left(-\frac{105}{16} + \frac{945}{32} s^2 - \frac{3465}{128} s^4 \right) \left(1 + 5e^2 + \frac{15}{8} e^4 \right) \\ & + J_8 \frac{nR^8}{p^8} \cos i \left(\frac{315}{32} - \frac{10395}{128} s^2 + \frac{45045}{256} s^4 - \frac{225225}{2048} s^6 \right) \\ & \quad \times \left(1 + \frac{21}{2} e^2 + \frac{105}{8} e^4 + \frac{35}{16} e^6 \right) \\ & + J_{10} \frac{nR^{10}}{p^{10}} \cos i \left(-\frac{3465}{256} + \frac{45045}{256} s^2 - \frac{675675}{1024} s^4 \right. \\ & \quad \left. + \frac{3828825}{4096} s^6 - \frac{14549535}{32768} s^8 \right) \\ & \quad \times \left(1 + 18e^2 + \frac{189}{4} e^4 + \frac{105}{4} e^6 + \frac{315}{128} e^8 \right) \\ & + \dots; \end{aligned}$$

L'étude détaillée des observations, poursuivie pendant plusieurs années sur une gamme variée

d'inclinaison des satellites permet de poser les termes constants des relations d'observation et de résoudre en J_{nq} les systèmes numériques qui en résultent (des dizaines de milliers d'observations, des centaines d'inconnues).

La Standard Earth 1966

C'est en 1966 que la Smithsonian Astrophysical Observatory publia le premier travail d'ensemble définissant à la fois un champ spatial résultant de l'observation suivie de 10 satellites et les coordonnées géocentriques d'un certain nombre de stations mondiales exprimées dans un système général cohérent, compatible avec ce champ.

On pourrait croire a priori qu'il y a un cercle vicieux puisque les valeurs numériques des termes du potentiel ont été déterminées à partir d'observations issues de stations supposées connues en position. En réalité un certain nombre d'éléments J , en particulier les harmoniques zonaux, ne dépendent pas de la longitude des stations d'observation : ils sont donc bien définis a priori, et l'on a constaté que l'étude des résidus d'un modèle de potentiel donné, aussi complet que possible, permettait d'y séparer les corrections dx, dy, dz des coordonnées approchées des autres inconnues, en particulier des J_{nq}, L_{nq} tesseraux, ce qui permet également le calcul d'un certain nombre de ces derniers, à conditions que le réseau d'observation des stations soit suffisamment dense.

A titre de curiosité disons que la Standard Earth 1966 du SAO était le résultat de calculs portant sur 34775 relations d'observation.

Elle comportait outre les harmoniques zonaux, les harmoniques tesseraux (avec des lacunes) jusqu'à l'ordre 15, ainsi que les coordonnées des 12 stations de base du réseau d'observation SAO (chambre Baker-Nunn).

C'était le premier exemple de réseau mondial cohérent.

Localisation par effet Doppler

Si l'on enregistre à terre la fréquence reçue d'un satellite pourvu d'un émetteur stable, par suite du mouvement relatif de la source et de l'observateur, on enregistrera une fréquence variable en fonction du temps, la fréquence augmentant lorsque le satellite approche et diminuant lorsqu'il s'éloigne de l'observateur. Ce phénomène est extrêmement sensible et mesure à chaque instant t la vitesse radiale relative de la source et de l'observateur, autrement dit (théoriquement du moins).

$$\frac{d}{dt} [(x_s - x_o)^2 + (y_s - y_o)^2 + (z_s - z_o)^2]^{1/2}$$

x_s, y_s, z_s coordonnées du satellite à l'instant t
 x_o, y_o, z_o coordonnées terrestres du récepteur.

Si par conséquent on connaît à l'instant t la position précise du satellite, x_s, y_s, z_s , on peut écrire une équation contenant les coordonnées x_o, y_o, z_o inconnues de la station, dont on connaît toujours par ailleurs une position approchée.

Pratiquement la mesure revient à un comptage de cycles N d'un dispositif hétérodyne du récepteur, entre les instants $t'1$ et $t'2$ de celui-ci ; si f_r

est la fréquence propre du récepteur, f_s celle du satellite, l'équation de principe s'écrit sous une forme intégrée entre t_2 et t_1 (temps satellite).

$$(f_r - f_s) N = (f_r - f_s) (t'_2 - t'_1) + \frac{f_s}{c} (\rho_2 - \rho_1) + DN$$

c vitesse de propagation, DN une correction de propagation dans l'ionosphère et la troposphère, ρ_2 et ρ_1 les distances satellite station à t_2 et t_1 (temps satellite), les coordonnées de la station interviennent dans la quantité $(\rho_2 - \rho_1)$.

On montre que la correction de propagation peut s'éliminer à condition de combiner la réception de 2 fréquences, en l'occurrence pour les satellites Transit 400 et 150 mégahertz qui correspondent à deux fréquences f_{r1} , f_{r2} du récepteur dans le même rapport.

Le satellite émet également des messages codés qui permettent, à la réception, de calculer une valeur très correcte de sa position : ils contiennent en particulier les 6 éléments d'orbite a , e , i , Ω , ω , t_0 , ainsi que leurs variations dans le temps d'où l'on déduit sa position par calcul des éléments osculateurs à l'instant voulu et calcul des coordonnées rectangulaires correspondantes.

Ces éléments sont déterminés par les observations quotidiennes d'un certain nombre de stations de poursuite puis centralisés en un centre unique de calcul et injectés dans la mémoire du satellite à la place des anciens.

Ce système idéal pour la navigation et la localisation, est universellement utilisé ; des logiciels spéciaux sont à la disposition des acquéreurs du matériel de réception.

Les satellites Transit au nombre minimum de quatre gravitent selon des orbites polaires de très faible excentricité à une altitude de l'ordre de 1 000

kilomètres. Le système est placé sous la responsabilité de l'US Navy, qui évidemment pourrait en cas d'urgence en rendre l'emploi inintelligible.

Telle quelle, c'est la méthode de navigation ou de localisation par excellence, si l'on se contente d'une précision moyenne de l'ordre d'une vingtaine de mètres par l'observation de 4 ou 5 passages ; les résultats s'expriment évidemment dans un système mondial de coordonnées de référence dont les éléments ont pu légèrement varier au cours des temps, par exemple :

$$a = 6\,378\,155 \text{ m} \quad \alpha = 1/298.2600 \text{ (vers 1970)}$$

$$a = 6\,378\,145 \text{ m} \quad \alpha = -d^\circ \text{ (vers 1980)}$$

Au point de vue de la géodésie on peut aller plus loin, à condition d'utiliser des éphémérides plus précises pour lesquelles il faut s'adresser à des organismes spécialisés.

En dehors de ses applications à localisation, le satellite Transit peut être un excellent détecteur d'harmoniques zonaux et tesseraux.

TRAVAUX FRANÇAIS

1 — Géodésie géométrique

Travaux de l'Institut Géographique National

Dès les premiers lancements, le directeur de l'IGN créait un petit groupe d'études, chargé d'explorer les perspectives qu'ouvraient les satellites artificiels à l'exécution des travaux de vocation de l'établissement.

Ce groupe proposa la détermination de liaisons géodésiques lointaines par triangulation spatiale, sur le satellite Echo 1, récemment lancé. Les premiers essais (1961) entrepris à l'aide de chambres de fortune, furent assez médiocres, ils eurent du

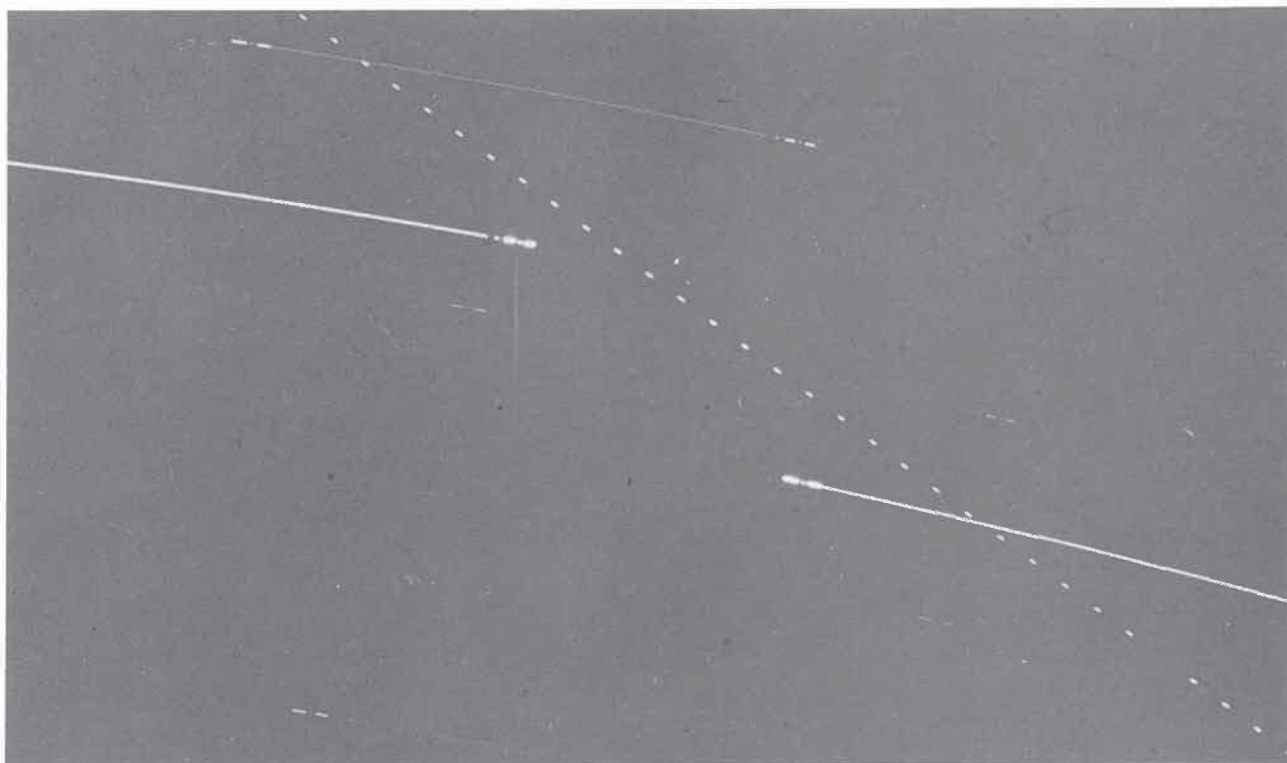


Fig. 107

moins le mérite de permettre la mise au point des procédures d'observation et de montrer les points faibles du matériel et des méthodes de calcul.

On fit construire de nouvelles chambres balistiques et on acquit un comparateur spécial (Zeiss Jena) donnant à peu près la précision du micron.

Une campagne d'observations correspondait à un projet précis : les stations d'observation étant déterminées, le service des calculs de l'IGN entretenait avec les opérateurs des contacts étroits par courrier ou télégramme :

— pendant toute la durée de la campagne, il calculait et communiquait à chaque station, en fonction d'un plan de travail assez souple évoluant suivant les résultats précédents, les éléments de calage des observations : heures T.U., azimut, hauteur de l'axe de visée ; inversement, les stations rendaient compte quotidiennement du succès de l'exécution ; ceci assurait au projet une structure géométrique satisfaisante, que le service des calculs pouvait en connaissance de cause modeler selon les besoins. La campagne était terminée lorsque l'ensemble des déterminations définissait correctement la géométrie du polyèdre.

L'observation complète d'un passage durait une dizaine de minutes au plus ; la caméra était solidement établie sur son pilier et mise en équilibre thermique bien avant l'apparition du satellite, on encadrait le passage proprement dit de celui-ci par deux photographies du même fond stellaire, prises à un instant parfaitement précis (signaux horaires) soigneusement noté : ceci définissait les directions spatiales (p, q, r) du champ d'étoiles photographiées par la caméra (fig. 107) ;

— la synchronisation des stations était assurée par les signaux horaires, de manière à assurer la simultanéité des pointés, l'important étant de définir des directions spatiales cohérentes sur tout le réseau à 10^{-3} seconde de temps.

Au retour de mission, les plaques (il y en avait des centaines) étaient passées au comparateur, étoiles et traits satellites ; un traitement numérique permettait de passer des coordonnées plaque aux directions spatiales dans le référentiel terrestre des stations : le lecteur en trouverait les détails dans (21, IV).

Après les mises au point du début, un certain nombre d'opérations purent ainsi être entreprises par l'IGN :

— à titre de vérification une liaison France-Algérie (subventionnée par le CNES), (1963)

— à titre d'extension, en liaison avec le Service Géographique du Portugal, une liaison directe continent-archipel des Açores (satellite Echo), (1965)

— une participation à une expérience à longue portée, montée par le CNRS (RCP 133) où l'IGN assurait une liaison entre l'Europe et l'Afrique aux stations de Dakar et Fort-Lamy (N'Djamena) par observation du satellite Pageos, et où d'autres méthodes entraient en jeu (1967).

Les méthodes géométriques spatiales opèrent dans l'espace à trois dimensions : le polyèdre défini est celui des sommets terrestres ; on peut donc,

en retranchant l'altitude du point, obtenir les coordonnées d'un point du géoïde. Inversement les éléments de départ d'une triangulation spatiale doivent être ramenés à la surface terrestre, ce qui implique la connaissance du géoïde et de l'altitude en tous ces points.

Nous donnons ci-après les résultats de la jonction France-Algérie qui, appartenant au même réseau géodésique (Europe 50), permettaient une vérification assez complète bien que le géoïde n'ait pu alors y être calculé que de manière précaire faute de données suffisantes.

Les sommets intéressés étaient :

- en France : Lacanau près d'Arcachon, Agde, Oletta (Corse, région de Bastia),
- en Algérie : Hammaguir, Ouargla (fig. 108).

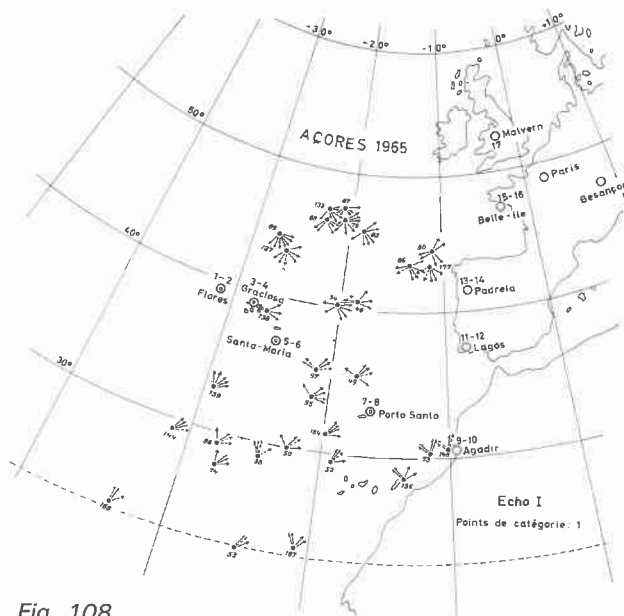


Fig. 108

	1 Oletta	2 Agde	3 Lacanau	4 Ouargla	5 Hammaguir	
Oletta	* S	312,3707,10 02,38	323,3657,20 58,19	219,6721,93 23,67	249,2169,11 68,86	Azimuts
	* S	107,9308,40 03,70	115,2334,08 34,29	17,0024,70 26,06	40,9096,04 95,71	Azimuts
		484,184,1 182,6	888,604,5 610,6	1 232,645,8 650,5	1 699,842,0 839,3	Distances
Agde	* S	331,5492,57 96,95	190,8647,20 50,20	227,6843,86 44,59		Azimuts
	* S	127,9146,67 50,16	3921680,24 82,82	23,2734,09 34,76		Azimuts
	* S	420,407,7 417,4	1 270,247,4	1 491,208,9 204,7		Distances
Lacanau			* S	173,5505,65 05,65	207,2140,75 37,06	Azimuts
			* S	378,1501,61 01,89	5,9437,27 34,19	Azimuts
			* S	1 555,721,3 728,0	1 571,977,8 977,9	Distances
Ouargla	Erreur moyenne quadratique d'une visée spatiale Emq = ± 7,5 × 10 ⁻⁶			* S	293,2618,82 21,82	Azimuts
				* S	88,3611,65 14,96	Azimuts
					811,352,5 345,2	Distances
4						

* valeur par la triangulation classique. — distances en mètres.

S valeur par la triangulation spatiale. — azimuts en grades.

	Triangulation classique	Triangulation satellite	Δ
Oletta	4 639,113,45	4 639,104,91	— 8,54
	764,588,58	764,585,61	— 1,97
	4 296,137,67	4 296,134,08	— 3,59
Agde (origine)	4 640,374,31		0
	283,672,31		0
	4 352,282,36		
Lacanau	4 516,066,69	4 516,055,18	— 11,51
	— 94,246,80	— 94,244,37	— 7,57
	4 488,177,22	4 488,175,61	— 1,61
Ouargla	5 393,662,31	5 393,651,18	— 9,13
	510,808,43	510,801,91	— 6,52
	3 355,038,70	3 355,030,31	— 8,41
Hammaguir	5 471,590,45	5 471,575,27	— 14,82
	— 290,633,99	— 290,634,06	— 0,07
	3 255,488,81	3 255,483,04	— 5,77

Mais les jours de la triangulation spatiale étaient comptés : d'autres méthodes globalement moins onéreuses, de maniement plus facile, beaucoup plus précises, faisaient leur apparition.

Si l'on considère les résultats du rattachement des Iles Açores (fig. 106), les observations photographiques des satellites Echo furent traitées par 5 méthodes différentes, en particulier en ce qui concernait le groupement des observations.

Elles donnèrent les résultats suivant (coordonnées UTM, altitude du géoïde).

	E	N	h
1	661 212,61	4 368 548,19	— 12,0
2	199,22	548,42	— 24,3
3	205,91	548,33	— 17,8
4	181,31	554,48	— 21,9
5	173,76	552,93	— 26,7

pour le pilier astronomique de Flores.

La liaison fut reprise ultérieurement par liaison "Doppler" : on trouva :

1	661 163,31	4 368 556,19	— 29,1
2	164,51	557,03	— 33,3
3	168,34	550,25	— 26,7

La solution n° 5 (A. Fontaine) la plus élaborée, était proche des résultats Doppler alors inconnus, mais les avantages des méthodes nouvelles sautaient aux yeux. D'autre part Echo 1 et Echo 2 chutèrent et ne furent pas remplacés.

La liaison France-Afrique (1967) fut la dernière application française de triangulation spatiale, quant à Pageos il continuait sa course, désormais à peu près inutile.

Télémétrie Laser

A la même époque une équipe du Laboratoire d'Aéronomie du CNRS (Prof. J. Blamont) mettait au point un télémètre à Laser permettant de mesurer la distance instantanée de la station à un satellite muni de prismes rétroreflecteurs par mesure du temps de propagation aller-retour d'un train lumineux très court (R. Bivas, J. Gaignebet). Elle était suivie quelque temps après par une équipe de l'ONERA (Taillez-Moreau).

La source lumineuse était un laser déclenché, d'une puissance de l'ordre de 1 joule émettant cette énergie en une dizaine de nanosecondes (10^{-9} seconde) dans un cône de l'ordre de $20''$ à $40''$ d'ouverture (10^{-4} radian) à la cadence d'un tir par seconde. La longueur du paquet d'ondes était donc de l'ordre de 3 mètres.

Après réflexion sur le satellite les photons étaient recueillis au retour sur le miroir d'un télescope de 40 cm de diamètre, la réponse était amplifiée par plusieurs étages de photomultiplicateurs. La mesure des temps de parcours se faisait par compteur d'impulsions.

Les difficultés de l'expérience étaient grandes : il fallait en effet s'assurer que le faisceau Laser toucherait le satellite, et par conséquent y diriger le rayon central du pinceau avec une précision de l'ordre de 10^{-4} . Pour cela l'ensemble était monté sur une tourelle type DCA améliorée et comportait une lunette guide, dont l'axe optique était parallèle à l'axe du faisceau Laser et du télescope (fig. 109).

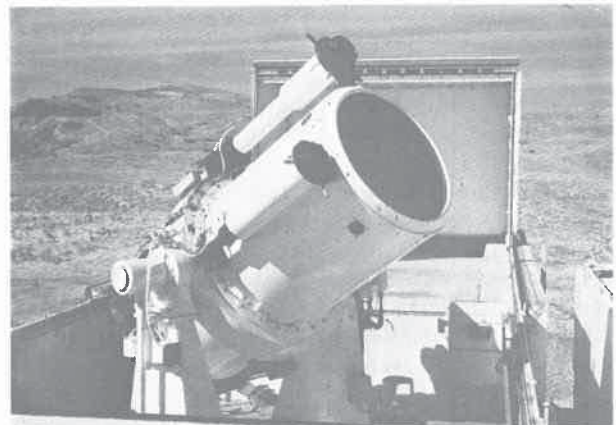


Fig. 109

Elle servait à l'acquisition du satellite que l'on maintenait alors à la croisée des fils du réticule pendant les tirs.

Le télescope est indispensable en tant que capteur des photons réfléchis : l'énergie lumineuse totale (1 joule) étant contenue dans un cône de 10^{-4} d'ouverture, la surface du satellite n'en recueille qu'une très petite partie qui est réémise à son tour dans un angle de 10^{-4} . La fraction possible d'énergie lumineuse reçue varie donc comme l'inverse de la 4^e puissance de la distance, il faut donc un miroir assez grand pour la déceler.

Les premiers retours significatifs, furent enregistrés en début de l'année 1965. Postérieurement, on vérifia (1969) que deux télémètres implantés au même site donnaient le même résultat sur les mêmes cibles et que d'autre part, l'accord avec la triangulation était correct. On procéda pour cela à un rattachement géodésique Corse-continent en observant le triangle Mont-Chauve (au nord de Nice), Coudon (au Nord de Toulon), Cinto (culminant de la Corse).

Une équipe de l'IGN (mesures angulaires) et une équipe de CNRS (télémétrie) assurèrent les observations dont nous résumons ci-dessous les résultats.

VISEE	TELEMETRE	EUROPE 50
MT CHAUVE COUDON	121 525,45	121 525,86
MT CHAUVE CINTO	206 983,52	206 982,94

Ces mesures télémétriques ont bien entendu été introduites dans la compensation définitive du rattachement de la Corse au réseau national.

La télémétrie Laser apportait à la géodésie un élément nouveau : la triangulation spatiale appuyait son échelle sur une distance connue par la géodésie classique ; la mesure des distances station satellite introduisait l'élément distance indépendamment de tout réseau géodésique terrestre et allait bien au-delà de la triangulation ; elle fixait une échelle spatiale indépendante, car la définition de la seconde par la fréquence étalon du Cesium était déjà fixée, et la vitesse de la lumière avait été déterminée par les géodésiens anglais avec le géodimètre à 299 792,5 km/sec sur différentes bases terrestres.

Travaux de la RCP 133

La Recherche Coopérative sur Programme RCP n° 133 était une opération créée par décision du 20 février 1967 du Directeur du Centre National de la Recherche Scientifique. Elle proposait d'opérer une jonction géodésique Europe, Afrique, Amérique du Sud, en employant concurremment la télémétrie Laser, la triangulation spatiale à l'aide des matériels récemment mis au point en France, les satellites adéquats et le concours d'un certain nombre de matériels et d'observateurs étrangers.

On y trouve un bon exemple d'application des méthodes géométriques spatiales : il s'agissait initialement :

- d'établir une base de départ solide, indépendante du système Europe 1950, en observant le triangle.

- Observatoire de San Fernando (près de Cadix, Espagne).

- Observatoire de Haute-Provence (près de Forcalquier, France).

- Observatoire de Dyonisos (près d'Athènes, Grèce).

Ce triangle serait ensuite développé par observation du satellite Pageos sur la base africaine de Dakar (Sénégal), Fort-Lamy (N'Djamena - Tchad).

On disposait pour cela :

- 1) A San Fernando

- de la chambre Baker-Nunn que la Smithsonian Astrophysical Observatory opérerait pour le compte de la RCP,

- d'un télémètre Laser du CNRS-CNES.

- 2) A l'Observatoire de Haute-Provence

- du télescope de Schmidt de la station, doublé par la caméra Antarès de l'Observatoire de Nice.

- 3) A l'Observatoire de Dyonisos, de la chambre Baker-Nunn du SAO.

Les satellites observés aux trois sommets étaient les satellites munis de prismes rétroreflecteurs et l'un d'entre eux, GEOS B, émettait des éclairs programmés au-dessus des zones intéressantes (voir fig. 108), la télémétrie Laser devait fournir l'échelle générale du projet. Les chambres balistiques de l'IGN stationneraient tous les sommets.

Une extension du programme était prévue à un certain nombre de stations européennes en accord avec les autorités scientifiques compétentes et bien entendu le SAO.

F. Barlier assurait la coordination et la direction technique.

Quelques particularités techniques

D'une manière générale les directions spatiales p, q, r , des éclairs émis par le satellite procèdent d'un type de réduction propre à chaque chambre photographique, qui fournit l'ascension droite et la déclinaison des images des éclairs dans le système des étoiles de champ.

- 1) En ce qui concerne les distances télémétriques, on commence par un tri des résultats pour éliminer les faux échos — il y en a — en étudiant les écarts par rapport à un modèle continu de variation de la distance en fonction du temps : un passage comporte en moyenne une cinquantaine d'échos et la variation est représentée par une équation du 2^e degré en t .

- 2) Il n'y a pas simultanéité entre l'instant d'émission des éclairs du satellite et les instants de mesure des distances, d'autre part une distance mesurée est fonction des coordonnées de la station et de celles du satellite au même instant il faut donc pouvoir calculer quelle aurait été la distance mesurée à l'instant de chaque éclair ; on procède pour cela à un calcul local de trajectoire du satellite à l'aide d'un modèle approximatif de potentiel, et on ajuste sur les mesures de distance, on interpole les résidus (ils ont une allure systématique) à l'instant voulu et l'on peut mettre les relations d'observation station satellite sous forme d'une équation linéaire contenant coordonnées satellite et coordonnées de station en inconnues, à utiliser concurremment avec les relations d'orientation, p, q, r , des éclairs mises sous la même forme : par passage du satellite GEOS B il y avait ainsi 7 éclairs lumineux espacés de 4 en 4 secondes.

Suit alors un traitement par la méthode des moindres carrés de l'ensemble des relations d'observation ainsi écrites, convenablement pondérées.

Nous donnons après les résultats obtenus en 1968 sur les stations du réseau complet européen par A. Cazenave, O. Dargnies, G. Balmino, M. Lefebvre.

Les écarts dx, dy, dz sont significatifs, l'intervalle de confiance égal à 2 fois l'écart type de chaque coordonnée est de l'ordre de ± 4 m.

On note également un écart systématique avec les distances du système EUROPE 50 (cordes) ; il est de l'ordre de 7×10^{-6} , et exprime une dilatation par rapport à ce système ; on se perd en conjectures sur les causes de ce fait indéniable, ne sachant à quoi on le doit attribuer.

	x (EUR.50)	Dx	y (EUR.50)	dy	z (EUR.50)	dz
S. FERNANDO (Espagne)	5 105 680,1	0.0	- 555 102,9	0.0	3 769 799,3	0.0
H.-PROVENCE (France)	4 578 413,0	7.7	458 091,0	18.7	4 403 312,0	17.8
DYONISOS (Grèce)	4 595 251,6	5.8	203 957,3	26.0	3 912 795,0	- 6.3
DELFT* (Pays-Bas)	3 923 505,9	- 9.3	300 003,1	15.3	5 003 119,8	- 9.3
ZIMMERWALD (Suisse)	4 331 390,6	5.2	567 367,4	14.0	4 633 235,9	15.0
RIGA* (URSS)	3 183 998,8	- 31.8	1 421 638,2	- 32.0	5 322 894,4	46.0
UZHGOROD (URSS)	3 907 494,2	12.0	1 603 533,2	27.0	4 764 034,8	11.0
MALVERN (G.B.)	3 920 250,8	25.0	- 134 624,4	18.0	5 012 852,2	36.0

* Coordonnées approchées probablement erronées.

A. Fontaine (1973) a fait une discussion approfondie des résultats et a repris la compensation d'ensemble en vérifiant les données, éliminant ou réhabilitant certaines mesures, rectifiant une méthode de compensation un peu trop expéditive.

Il montre dans ses conclusions la très bonne précision des mesures.

± 1/100 000 sur les directions spatiales.

± 2 m sur les mesures de distances

± 5 m sur les coordonnées.

Il a discuté avec la même minutie la liaison Europe-Afrique par les chambres balistiques IGN et arrive à la conclusion que la précision obtenue sur Dakar et Fort-Lamy est de l'ordre d'une vingtaine de mètres, l'erreur relative restant de l'ordre de 1/100 000.

L'abandon des méthodes de triangulation spatiale, ne supprima pas l'intérêt des mesures de télémétrie laser : ces mesures furent reprises pour d'autres observations dans d'autres projets. Elles sont fondamentales puisqu'elles fixent l'unification des échelles de distances, avec d'autant plus de valeur que, comme on l'a vu c'est la vitesse de la lumière dans le vide qui constitue maintenant l'unité de longueur $C = 299\,792\,458$ mètres par seconde.

D'autre part il y a une relation évidente entre mesures Doppler et poursuite télémétrique simultanée d'un même satellite ; le Doppler donne la vitesse radiale $\frac{ds}{dt}$ alors que la télémétrie donne la

distance s c'est-à-dire en définitive la constante d'intégration — toutes corrections systématiques faites bien entendu —.

2 — GEODESIE DYNAMIQUE

Nous n'avons pas la prétention de présenter un exposé exhaustif des travaux français dans le domaine de la géodésie dynamique sur satellites.

Nous nous bornerons à parler succinctement de quelques travaux qui nous paraissent les plus caractéristiques ou les plus importants exécutés par les géodésiens français selon des projets nationaux ou en participation à des projets internationaux.

Pendant plusieurs années il avait fallu se familiariser avec la mécanique céleste, se documenter, s'exercer, préparer et vérifier les programmes de calcul, étudier des projets et commencer la mise en œuvre.

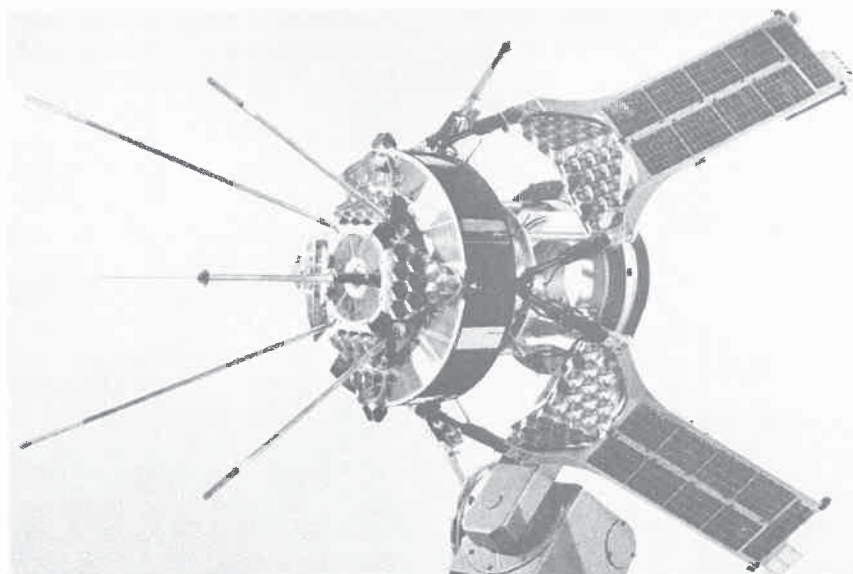


Fig. 110

Satellites géodésiques français

La géodésie eut une place d'honneur dans la programmation des premiers lancements du CNES :

- le satellite Diapason (D1A) lancé en février 1966 à Hammaguir,
- les satellites Diadème (D1C, D1D) lancés en février 1967 à Hammaguir,
- le satellite Peole lancé en décembre 1970 à Kourou.

Le satellite D1A était muni d'un émetteur stable à deux fréquences (400 mhz et 150 mhz) pour étude de l'effet Doppler.

Les satellites D1C et D1D étaient munis des mêmes types d'émetteur et revêtus de prismes cataphotes (tirs de télémétrie Laser) (fig. 110).

Le satellite Peole, plus perfectionné, présentait un intérêt spécial : il comblait une lacune dans la gamme des indications orbitales, son inclinaison étant de 14° environ.

Tous étaient des satellites légers, d'un modèle classique, tirant l'énergie nécessaire à leur fonctionnement de cellules solaires. L'attitude par rapport à la terre était assurée par stabilisation magnétique ou par gradient de pesanteur.

Lancé en 1975 par le CNES, le satellite Starlette est une sphère d'uranium, donc de très forte densité, muni de prismes rétroreflecteurs (télémétrie Laser), gravitant à haute altitude : il a pour objet l'étude du champ de gravité γ compris ses variations périodiques (marées) et la polhodie.

Méthodes semi-dynamiques

Soit un satellite dont les passages sont observés en plusieurs stations, localisées dans une étendue relativement restreinte (2 à 3 000 km), dont quelques-unes sont rattachées à un ensemble plus général. On se propose d'obtenir dans le système des stations connues les coordonnées des stations inconnues, en faisant intervenir dans la résolution les équations plus ou moins simplifiées du mouvement du satellite considéré, valables dans un espace restreint.

On est ainsi amené à considérer plusieurs types de relations d'observations suivant la nature de l'observation faite (direction spatiale, distance, enregistrement Doppler). Calculons l'observation C qui aurait dû être faite au temps t en une station donnée. Elle est fonction de la position du satellite sur son orbite donc des éléments $a, e, i, \Omega, \omega, Mo, t$ et des coordonnées de la station (x_n, y_n, z_n), connues de manière approchée

$$F(a, e, i, \Omega, \omega, Mo, t, x_n, y_n, z_n) = C$$

On va donc attribuer la discordance entre l'observation numérique \hat{O} et la valeur calculée C aux variations des éléments de la fonction F par rapport aux valeurs approchées — c'est la linéarisation classique employée en méthode des moindres carrés — et traiter précisément par cette méthode la valeur des résidus $C - \hat{O}$.

Pour les stations connues, les variations de coordonnées seront nulles alors que pour les stations inconnues existent les variations de coordonnées

de ladite station : dx_n, dy_n, dz_n qui seront obtenues en solution du système normal. Autrement dit on aura des relations pour un satellite donné.

$$\begin{aligned} \text{(station connue)} \quad & \frac{dF}{da} da + \frac{dF}{de} de + \frac{dF}{di} di + \dots \\ & + \frac{dF}{dM} dM + C - \hat{O} = v \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{(station inconnue)} \quad & \frac{dG}{da} da + \frac{dG}{de} de + \frac{dG}{di} di + \dots \\ & + \frac{dG}{dx_n} dx_n + \frac{dG}{dy_n} dy_n + \frac{dG}{dz_n} dz_n + C - \hat{O} = v' \end{aligned}$$

On peut associer des observations de type différents F, G sur plusieurs satellites, l'essentiel est de les pondérer et de bien exprimer les dérivées partielles en fonction d'éléments aussi corrects que possible, qui sont évidemment fonction du modèle terre adopté, en particulier de la correction des J_n et L_n ; en d'autres termes on rattache le ou les points nouveaux au système général adopté comme modèle, par exemple une Standard Earth.

Ce sont des expériences de ce type qui ont été tentées vers 1966, 1968 sur les satellites français en utilisant des dispositifs d'enregistrement Doppler ou de télémétrie Laser.

Expériences Diadème

La lancement des satellites D1A, D1C, D1D permis aux français de se familiariser avec les travaux de géodésie dynamique.

Les opérations essentielles intéressaient le triangle Colomb-Bechar, Observatoire de Haute-Provence, Stephanion (près d'Athènes) avec extension à Beyrouth.

On connaît par le réseau Européen 1950 des coordonnées suffisamment approchées de ces stations pour les considérer comme correctes. Elles furent ramenées au centre des masses de la terre par une translation (un système dynamique a par hypothèse son origine en ce point — voir plus loin). Aux stations principales se trouvaient :

- 1 récepteur Doppler
- 1 télémètre à laser (sauf à Beyrouth dont les coordonnées étaient d'ailleurs incertaines), éventuellement (à Nice) la caméra Antarès.

Etudes de positionnement par effet Doppler

Elle fut entreprise sur la base Nice-Beyrouth par J. Kovalevsky, F. Barlier, I. Stellmacher (Mme) sur le satellite D1A. Ce satellite n'émettait que ses deux fréquences à l'exclusion de tout autre message. Appliquant leur mise en équation et leurs propres programmes les observateurs étudièrent pendant plusieurs mois :

- la dispersion des mesures de localisation de Beyrouth,
- l'influence de la durée de l'observation, de la stabilité de l'émetteur,
- l'influence du modèle de potentiel choisi pour extrapoler vers Beyrouth les déterminations d'orbite calculées à partir des observations de Nice.

La moyenne des résultats de position obtenues diffère du point calculé par l'IGN de :

$\Delta\varnothing = + 0^{\circ}00010 \pm 0,0008$ en degrés décimaux
 $\Delta L = - 0^{\circ}00015 \pm 0,0012$ $10^{-4} \neq 11$ m
 ce qui paraît satisfaisant tant pour le modèle terrestre que pour le modèle spatial.

En fait les difficultés de l'opération étaient grandes :

1) le satellite n'étant observé au point de vue de calcul d'orbite que par la seule station de Nice ; on ne pouvait donc calculer les éléments moyens qu'en utilisant des observations portant sur des arcs de deux ou trois jours. La précision interne de ceux-ci était en apparence excellente :

1/2 grand axe $\pm 0,50$ m
 excentricité $\pm 10^{-5}$
 inclinaison $\pm 10^{-5}$ (radians)
 longitude du nœud ascendant 5×10^{-5} radians
 argument du périhélie 10^{-4} radian
 mais la discordance réelle était bien supérieure, comme le montrent d'ailleurs les écarts types des calculs de position.

Les causes en sont nombreuses (ce sont elles que l'on cherchait précisément à étudier) :

— au point de vue du calcul pur, une variation de 10^{-5} dans la valeur de l'excentricité d'orbite introduirait une erreur de l'ordre de l'hectomètre sur la position théorique du satellite, ce qui se répercute évidemment sur la position calculée de la station,

— les observations de passages pouvaient présenter des lacunes et d'autre part correspondre à des positions du satellite pour lesquelles la correction de propagation des ondes dans la troposphère est incertaine,

— le modèle de potentiel utilisé pour extrapoler l'arc Nice-Beyrouth pouvait être insuffisant et des harmoniques tesseraux alors inconnus, en particulier des harmoniques de résonance, risquaient de fausser les résultats s'il n'en n'était pas tenu compte, comme le montrent bien la corrélation existant entre la variation de certains éléments képlériens calculés et l'allure des effets théoriques que produisaient de tels harmoniques.

Cette expérience est le premier exemple en France de l'application de la méthode Doppler à la détermination des positions.

Elle permet de mettre au point les programmes de calcul indépendamment de tout logiciel Transit, de familiariser les opérateurs français avec les matériels, de montrer et expliquer les défaillances des modèles de potentiel qui ne prennent pas en compte le satellite observé, etc... bref d'ouvrir la voie à l'application d'une part, à des projets scientifiques plus généraux d'autre part, en toute indépendance (éventuelle) de tout système a priori.

Etudes semi-dynamiques

De leur côté, J.-P. Chassaing, B. Lago, M. Lefebvre entreprenaient une étude de détermination du triangle Colomb-Bechar, Haute-Provence, Stephanon par observations combinées (Doppler et Laser) du D1C et D1D. Les résultats devaient permettre

d'autre part de rechercher les coordonnées du centre de l'ellipsoïde porteur du réseau géodésique Europe 1950 par rapport au centre des masses terrestres, et de calculer certains harmoniques tesseraux qui n'étaient pas contenus dans les modèles terrestres alors connus (Standard Earth 1966) dont l'existence était précisément soulignée par l'expérience D1A.

On traitait des arcs "courts" (2 à 3 jours) pour obtenir :

— les paramètres orbitaux
 — la position des stations
 — l'étalement relatif des fréquences (émission, réception)
 par intégration numérique des équations fondamentales.

La comparaison de leurs résultats avec un système amélioré de "Standard Earth" est résumée dans le tableau ci-dessous. Les coordonnées ont pour origine le centre des masses terrestres.

Station		Standard Earth	CNES
Colomb-Bechar	x	5 426 355 m	5 426 339 m
	y	- 229 327 m	- 229 318 m
	z	3 334 588 m	3 334 587
Stephanion	x	4 654 337 m	4 654 352 m
	y	1 959 148 m	1 959 164 m
	z	3 884 390 m	3 884 381 m
Haute-Provence	x	4 578 368 m	4 578 383 m
	y	457 954 m	457 951 m
	z	4 403 156 m	4 403 144 m

On peut considérer résultats comme excellents, les discordances étant de l'ordre de grandeur de la précision du modèle de comparaison.

La position du centre de l'ellipsoïde Europe 1950 par rapport au système des satellites, également étudiée par G. Balmino, a trouvé des résultats évidemment concordants à ceux que l'on connaissait par le Standard Earth. La méthode consiste à comparer les coordonnées triangulaires d'un même point dans le système terre et dans le système géodésique, compte tenu des changements d'ellipsoïde. De nombreuses valeurs ont été proposées en générale très voisines.

Composantes du vecteur centre de masse - centre de l'ellipsoïde Europe 50							
	Semi-dynam. Doppler	Semi-dynam. Mélange	Semi-dynam. Chassaing	Veis	Dynamique	Lev./loi dufour	Lev./loi (1988)
Δx	-75	-76	-67	-90	-68	-30	-57
Δy	-131	-131	-128	-133	-126	-100	-114
Δz	-102	-131	-135	-140	-124	-150	-130

Celles qui sont obtenues par Levallois, Dufour (1967) et Levallois (1978) sont tirées de la comparaison du géoïde gravimétrique (formule de Stokes) et du géoïde astrogéodésique (Europe 1950). La discordance entre les valeurs 1967 et celles de 1978 provient de l'abondance des données terrestres disponibles (très incomplètes en 1967) sur lesquelles portaient les calculs. Il y a concordance très raisonnable entre méthode spatiale et méthode terrestre ce qui montre un accord correct entre le champ spatial et le champ superficiel tiré des mesures de pesanteur.

En 1984 on admettait (France)

$\Delta x = -84$ $\Delta y = -109$ $\Delta z = -123$
mais aucun de ces nombres n'est fixé à mieux que quatre ou cinq mètres.

Quoi qu'il en soit une telle méthode permet d'adapter les systèmes géodésiques continentaux (Europe, USA, etc...) à un système mondial cohérent, par simple transformation numérique.

Le programme Isagex

Dès l'automne 1969, le Centre National d'Etudes Spatiales prenait l'initiative d'une expérience internationale.

Constatant que le lancement de Peole permettait de combler une lacune dans la gamme des inclinaisons des satellites, il présentait une "Proposition pour une campagne internationale d'observation photographique et télémétrique sur satellites équipés de prismes rétro-rélecteurs". Au cours d'une réunion préliminaire dans les premiers jours de l'année 1970, les grandes lignes du projet se dégagèrent :

- organiser sur les sept satellites possibles, une campagne d'observation bien coordonnée, susceptible d'apporter à la connaissance du champ terrestre et des autres paramètres géodésiques une contribution significative,
- rassembler les observations des organismes participants et les mettre à la disposition de la communauté scientifique,
- développer les recherches instrumentales de précision.

Le CNES fut chargé de préparer pour mars 1970, un plan provisoire d'expériences qui serait examiné par un comité scientifique, présidé par J. Kovalevsky.

Ce projet, soutenu par le Cospar, au cours de la XIII^e Assemblée Générale (Leningrad - juin 1970) reçut l'adhésion des nations suivantes : RDA, RFA, Australie, Etats-Unis, Finlande, France, Grèce, Japon, Pays-Bas, Pologne, Royaume-Uni, Suède, Suisse, Tchécoslovaquie, URSS.

Le Comité scientifique examina le programme préliminaire d'expériences, l'approuva dans ses grandes lignes, y apporta quelques amendements et désigna son auteur, G. Brachet — CNES — comme Directeur exécutif ; redoutable honneur.

La mise en œuvre d'un tel projet exige en effet une organisation minutieuse, implacable quoique souple. On décida de répartir la coordination gé-

rale du programme entre un centre principal (CNES Brétigny) et cinq sous-centres auxiliaires.

Le centre principal devait :

- programmer les périodes favorables à la poursuite et aux intervisibilités mutuelles, distribuer les éphémérides,
- rassembler les informations géodésiques et techniques relatives aux stations de poursuite,
- tenir à jour la liste des observations, les mettre en fichier et en banque de données,
- les diffuser aux demandeurs, etc.

Les cinq centres auxiliaires :

Cambridge (USA. Mass) Smithsonian Astrophysical Observatory (SAO)
Greenbelt (USA Maryland) - Nasa et Goddard Space Flight Center
Moscou (URSS) Conseil Astronomique de l'URSS
Ondrejov (Tchécoslovaquie) Centre Europe de l'Est Brétigny (CNES)

étaient chargés de piloter un groupe local de stations de poursuite et de :

- transmettre les ordres d'opération définis dans le plan général
- rassembler les rapports d'observation des stations
- transmettre au centre principal un rapport hebdomadaire
- rassembler les résultats bruts pour le calcul des éléments orbitaux et toutes les observations de leur réseau.

Parmi ces centres auxiliaires, celui de Cambridge (USA) se chargeait pour tous les autres du calcul préalable des prédictions orbitales de tous les satellites concernés ; celui de Nasa, devait, sur demande du centre principal, préparer la télécommande d'éclairs lumineux du satellite GEOS-C en conformité avec les nécessités du programme scientifique et lui en faire connaître la programmation.

Les observations étaient prévues pour durer six mois environ à partir du début de janvier 1971. Elles devaient être précédées par un premier test en septembre 1970. Le lancement réussi de Peole libéra de toutes les incertitudes et les observations débutèrent le 5 janvier 1971 pour s'achever en août de la même année.

La figure 111 donne la répartition des moyens d'observation pendant la campagne.

La France prit évidemment une part très importante à la campagne ; elle équipait les stations suivantes et y procédait aux observations.

Stations de Haute-Provence : télémètre Laser de l'ONERA et télescope de Schmidt.

Station de Dakar : télémètre Laser, caméra Baker-Nunn (du SAO).

Station de San Fernando (Cadix) : télémètre laser.

Station de Nice : caméra Antarès.

Le Bureau International de l'Heure assurait la synchronisation d'ensemble.

En outre, le centre auxiliaire de Brétigny coordon-

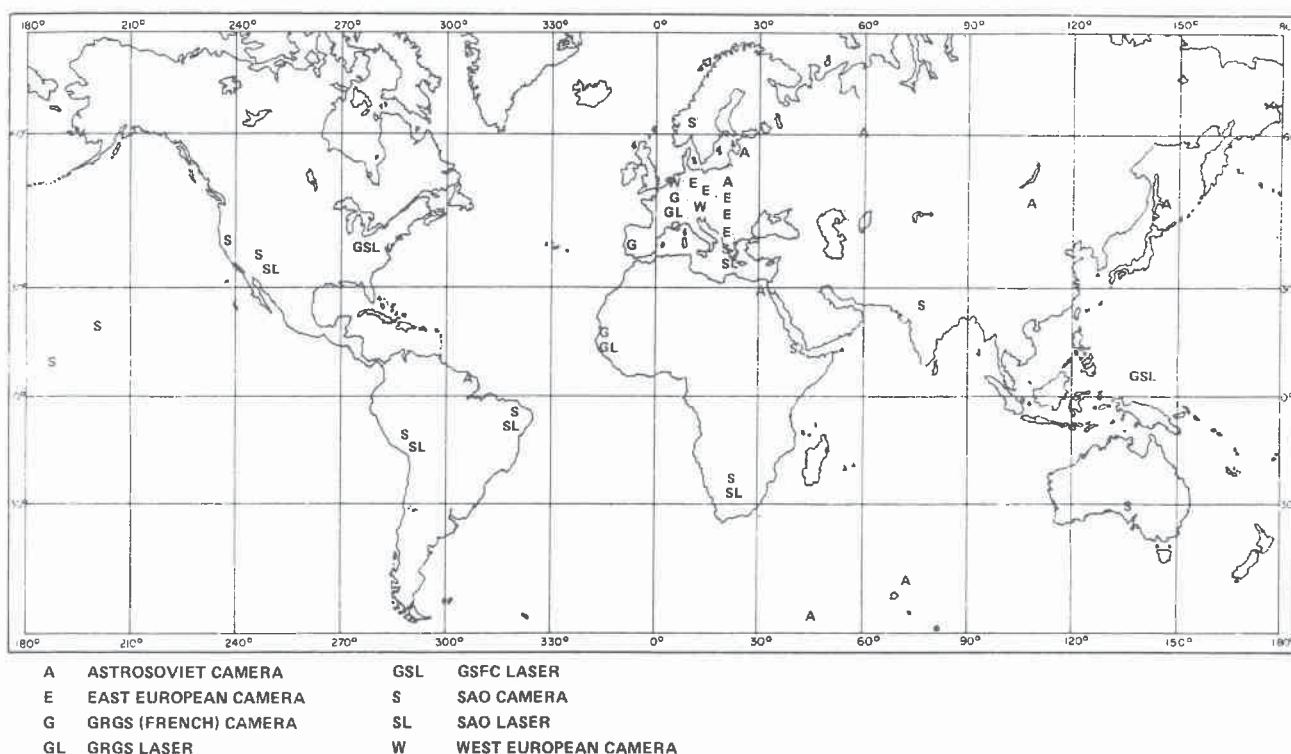


Fig. 111 Locations of Stations Which Collected Data During the International Satellite Geodesy Experiment

nait les stations de Bruxelles, Debrezeit (Ethiopie), Edimburg, Kerguelen, Kourou, Malvern (G.B.), Naukallio (Finlande), Ypburg (Pays-Bas), Zimmerwald (Suisse).

Le programme Isagex est, peut-on dire sans chauvinisme, l'exemple type d'un très beau travail international, bien conçu, parfaitement exécuté, tout à l'honneur de notre pays, du directeur technique et des exécutants.

Les observations ont été recueillies et diffusées sous forme de catalogues (G. Brachet) qui ont été largement exploités.

Le groupe de recherches de géodésie spatiale (GRGS)

Il apparut enfin assez rapidement, au cours des réunions scientifiques nationales ou internationales, que les travaux de géodésie spatiales des divers petits groupes de chercheurs français, centrés sur les thèmes particuliers propres à chaque établissement, auraient tout à gagner d'une coordination générale et de la mise en commun de certains moyens.

On pouvait en espérer :

- une efficacité plus grande dans la réalisation des projets
- une gestion plus économique des crédits d'ensemble
- la désignation d'un interlocuteur unique, qualifié pour prendre des engagements internationaux
- un choix rationnel des thèmes de recherches
- l'admission au rang de laboratoire associé par le CNES

— une liaison avec le CNRS, etc...

L'organisation devait être assez souple pour conserver aux établissements des divers ministères leur vocation propre et leur identité ainsi que les statuts respectifs des personnels.

Après réflexions et contacts divers on proposa l'organisation suivante (J. Kovalevsky, J.-J. Levallois) :

- le Bureau des Longitudes
- le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES)
- l'Institut Géographique National (IGN)
- l'Observatoire de Paris.

représenté par leurs directeurs, échangeraient par lettre leur intention de créer sous le nom de Groupe de Recherches de Géodésie Spatiale (GRGS) une organisation officieuse à laquelle chacun apporterait sa contribution en crédit ou personnels pour participation à un certain nombre de projets débattus et approuvés.

L'entente était renouvelable par tacite reconduction annuelle.

L'autorité et la décision appartiendraient au Comité Directeur composé des directeurs ou présidents des quatre établissements fondateurs.

Les projets lui seraient soumis sur proposition émanant d'un Comité Scientifique.

Un Directeur exécutif serait responsable devant le Comité Directeur de la mise en œuvre des projets adoptés. Il serait désigné par périodes de trois ans, renouvelables ; il était qualifié par le Comité Directeur pour maintenir tous contacts avec les organismes étrangers, ou avec le CNES.

L'échange des lettres d'accord eut lieu en février 1971 (Voir annexe).

Cette organisation si simple fonctionne depuis sans accroc, et chacun y trouve son compte. Depuis la création, J. Kovalevsky et B. Lago en ont exercé les fonctions de directeur technique.

Grâce à cet accord, la France pouvait participer aux projets internationaux, se faire entendre dans les réunions scientifiques et y parlant d'une seule

voix et, pour l'exécution, compter sur l'appui sans réticences des fondateurs et des personnels volontaires de chacun des établissements.

Les recherches et les résultats de ses géodésiens lui permettaient d'autre part d'entrer de plain-pied dans le concert international et d'y jouer un des tous premiers rôles.

Bibliographie

(1) *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences - Tome VII - 1666-1695.*

(2) J.-B. Delambre : *Grandeur et figure de la Terre* publié par les soins de G. Bigourdan.

(3) J.-B. Delambre : *Histoire de l'Astronomie, Astronomie moderne - Tome 1.*

(4) L. Gallois : *l'Académie des Sciences et les origines de la carte de Cassini - Annales de Géographie - 1909 n° 99.*

(5) R. Taton : J. Picard et la mesure de l'arc du Méridien Paris-Amiens - *Colloques internationaux du CNRS n° 590.*

La découverte de la France au XVII^e siècle.

(6) Colonel Berthaut : *La carte de France 1750-1898*

Services Géographiques de l'Armée - 1818.

(7) J.-J. Levallois : *La détermination du rayon terrestre par J. Picard en 1669-1671 - Bulletin géodésique - Volume 57 - 1983.*

(8) *Annuaire du Bureau des Longitudes : 1974.*

(9) A. Danjon et A. Couder : *Lunettes et télescopes.*

A. Blanchard - Paris

(10) La Hire : *Traité du nivellement* par M. Picard de l'académie des Sciences, avec une relation que quelques nivellements faits par ordre du Roy... mis en lumière par les soins de M. de La Hire.

(11 N) *Mémoires ou Histoire de l'Académie Royale des Sciences (Année N).*

(12) J. Cassini : *Traité de la grandeur et de la Figure de la Terre (1723).*

(13) Cassini de Thury : *La méridienne de l'observatoire Royal de Paris vérifiée dans toute l'étendue du Royaume (1744).*

(14) Cassini de Thury : *Description géométrique de la France (1780).*

(15) Maupertuis : *Oeuvres de M. de Maupertuis (4 tomes).*

a) *Discours sur les différentes figures des astres.*

b) *Mesure de la terre au cercle polaire.*

c) *Relation du voyage fait par ordre du Roi au cercle polaire, pour déterminer la figure de la Terre.*

(16) Authier : *Journal d'un voyage au Nord en 1736 et 1737.*

(17) P. Bonguer : *La figure de la terre, déterminée par les observations de MM. Bonguer et La Condamine.*

(18,a) Ch. de La Condamine : *Journal d'un voyage fait par ordre du Roy à l'Equateur.*

(18,b) Ch. de La Condamine : *Mesure des trois premiers degrés du Méridien dans l'hémisphère austral.*

(19) Florence Trystam : *Le procès des étoiles - Shers - 1979.*

(20) C. Clairant : *Théorie de la Figure de la Terre tirée de l'hydrostatique.*

(21) J.-J. Levallois : *Géodésie (tome III).*

(22) J. Svanberg : *Exposition des opérations faites en Laponie pour la détermination d'un axe du méridien en 1801, 1802 et 1803.*

(23) J. Leinberg : *Über die Ergebnisse der Manpartnischen Gradmessung in Lappland (CR de la quatrième séance de la Commission géodésique Baltique 1929).*

(24,n) J. Delambre : *Les bases du système métrique décima (3 tomes).*

(25) G. Bigourdan : *Le système métrique des Poids et Mesures.*

(26,n) F. Tisserand : *Traité de Mécanique Céleste (tome n).*

(27) Todhunter : *History of the theories of attraction and of the figure of the Earth.*

(28,n) Laplace : *Traité de mécanique céleste (livre n).*

(29) G. Perrier : *Petite histoire de la géodésie.*

(30,n) *Mémorial du Dépôt de Guerre (tome n).*

(31) *CR des séances du Bureau des Longitudes (1803-1809).*

(32) Biot et Arago : *Recueil d'observations géodésiques et astronomiques exécutées par ordre du Bureau des Longitudes.*

(33) Ch. Berthaut : *Les ingénieurs géographes militaires.*

(34) L. Puissant : *Traité de géodésie - 3^e édition 1842.*

(35) Breton de Champ : *Traité de nivellement.*

(36) L. Puissant : *Traité de topographie, d'arpentage et de nivellement.*

(37) B. Pascal : *Oeuvres complètes - Edition de la Pléiade.*

(38) G. Darboux : *Eloge historique de François Perrier (Ads).*

(39) G. Bigourdan : *Le Bureau des Longitudes (Annuaire de 1928-1929-1939-1931-1932-1933).*

(40) Bassot : *La géodésie française - Annales de géographie (1891).*

(41) *Le Service Géographique de l'Armée - son histoire - son organisation - ses travaux - Imprimerie du SGA (1978).*

(42) *Le nivellement général de la France de 1878 à 1926 - Ch. Lallemand - E. Prévot.*

(43) P. Tardi et G. Laclavère : *Traité de Géodésie (1955) tome II - Astronomie géodésique de précision.*

(44,n) *Bureau des longitudes. Encyclopédie scientifique de l'Univers - Volume n, N° 1 : La terre, les eaux, l'atmosphère.*

(45,n) *Bulletin astronomique, année n.*

(46) R. P. Pierre Lejay : *Développements modernes de la gravimétrie.*

(47,n) *Comptes rendus annuels des travaux du Service géographique de l'Armée.*

(48) *Service géographique de l'Armée - La carte de l'Empire colonial français (1931).*

(49) A. Lambert : *La révision des longitudes mondiales (oct. nov. 1926) (1929).*

(50) N. Stoyko : *La 2^e opération des longitudes mondiales - Résultats... Conclusion.*

(51,n) *Comptes rendus des Travaux de l'IGN au Comité central des Travaux géographiques, Année n.*

(52) *The Earth and its gravity field.*
F. Vening - Munioz - W. Heiskanen (Mc. Graw-Hill - 1958).

(53) *Etude gravimétrique de l'Algérie - Tunisie.*
J. Lala : *Bulletin du Service de la Carte d'Algérie 1951.*

(54) *Nouvelles études gravimétriques* - J. Lagrula.

(55) *Mémoire explicatif de la carte gravimétrique du Maroc.* - J. N. H. Van Den Bosch - (Service géologique du Maroc).

(56) *Base gravimétrique Paris-Toulouse* - J. Martin - *Exp. polaires françaises.*

(57) *Etablissement d'un réseau général de sta-*

tions gravimétriques en Afrique, à Madagascar, à La Réunion, et à l'Île Maurice - F. Duclaux, J. Martin, G. Blot, R. Remiot - ORSTOM.

(58) *The International gravity Standardization Net 1971* Association Internationale de Géodésie - Paris.

(59) *Implantation d'un réseau géodésique pour la mesure directe de l'expansion d'un rift océanique* IGN Paris.

(60) *Nombreux articles de MM. Ruegg, Tarantola, Lépine, Kasser, Lévêque, etc. dans diverses revues.* Institut de Physique du Globe de Paris.

(61) *Geodesic measurements across the English Channel 1963* Ordnance Survey - Southampton 1971.

(62) *Mécanique céleste : tome IV de (21) entièrement rédigé par J. Kovalevsky pour la Mécanique Céleste.*

(63) *Mouvement d'un satellite artificiel de la terre.* B. Morando - Gordon and Breach.

(64) *Le système international d'unités (S.I.)* Offilib, 48, rue Gay-Lussac, 75005 Paris.

(65) *Les fondements de la mécanique céleste.* Y. Thiry - Gordon and Breach.

ABONNEMENT 1988 A LA REVUE XYZ

de l'Association Française de Topographie

Pour s'abonner à cette revue, vous adressez votre demande, accompagnée du chèque de règlement à l'adresse suivante :

ASSOCIATION FRANÇAISE
DE TOPOGRAPHIE

"Abonnements"

140, rue de Grenelle
75700 PARIS

Abonnement 1 AN (4 numéros) : 390 F

Tous les membres de l'A.F.T. sont automatiquement abonnés à la revue xyz.

Les abonnements sont en principe souscrits par année civile.

Achat d'un seul numéro - même adresse que ci-dessus (sous réserve de disponibilité) : 100 F

Tél. : (1) 45.50.34.95 pte 660 mardi et vendredi de 10 à 12 h

En cas de changement d'adresse, nous invitons nos abonnés à bien vouloir communiquer à l'adresse ci-dessus la dernière bande accompagnée de la somme de 4,00 F en timbres-poste.