

Trois cents ans de géodésie française (suite)

par J.J. LEVALLOIS
Ingénieur Général Géographe

XIV — De 1940 à l'ère spatiale

Création de l'Institut Géographique National Les travaux de vocation

Vers le 20 août 1939, les brigades de terrain du Service Géographique de l'Armée commencèrent à recevoir de la portion centrale les télégrammes leur enjoignant d'appliquer les premières "mesures" de mise en alerte.

Elles étaient énumérées et décrites dans un petit document "secret" remis au Chef de Brigade, lors du départ sur le terrain. Rappelées à Paris, les brigades furent dissoutes, la mobilisation générale, suivie de la déclaration de guerre, prononça les affectations du personnel :

- aux Armées : groupes de canevas de tir d'Armée (GCTA), sections topographiques de corps d'Armée (STCA), section topographique de division (STD)
- aux fractions maintenues à Paris ou détachées de province (impression de cartes, travaux de calculs, contrôles de fabrication (optique, etc...))

Pendant "la drôle de guerre" l'ensemble fonctionnera très correctement, les unités de terrain complétant éventuellement le canevas géodésique des zones frontières, étudiaient les systèmes de coordonnées des pays étrangers (Belgique, en particulier), approvisionnaient les unités combattantes en cartes, en carnets de coordonnées. Tout cela fut balayé par la défaite de Mai-Juin 1940.

Lorsque survint l'armistice (25 juin 1940) la situation du SGA était à peu près la suivante :

- les locaux de Paris étaient occupés par les allemands qui considéraient le patrimoine (locaux, matériels) comme prise de guerre
- à Bordeaux, où avait fonctionné dès la mobilisation un établissement du SGA, étaient repliés le commandement du SGA, une partie des effectifs des unités en retraite, un gros matériel, Bordeaux n'était pas encore occupée
- les personnels des unités combattantes étaient soit prisonniers, soit repliés directement dans les "zones libres", par le reflux de leur unité.

La situation du SGA était donc désespérée : effectifs dispersés, prisonniers ou menacés de le devenir, patrimoine saisi ou en voie de l'être.

Par un extraordinaire tour de passe-passe, le Général Louis Hurault, un artilleur Directeur du SGA

depuis 1937, rétablit la situation et sauva l'essentiel, tout en mettant sur pied une organisation que, semble-t-il, il méditait depuis longtemps.

Il avait servi au SGA comme Chef de la Section d'Optique, chargé de tous les instruments d'optique de l'Armée de Terre (jumelles, goniomètres, boussoles, théodolites, télémètres). Homme d'une rare puissance de travail, tenace, autoritaire, bon administrateur, sachant ce qu'il voulait et comment l'obtenir, par ailleurs excellent opticien, pionnier avec Georges Poivilliers de la photogrammétrie, il comprit d'un coup d'œil l'étendue du désastre du SGA et en pleine déroute, en pleine pagaille, arrachait à un "gouvernement désemparé" (51, 1942) le décret-loi du 27 juin 1940 portant suppression du Service Géographique de l'Armée et instituant l'Institut Géographique National organisme civil. Il en fut nommé directeur peu après ; il le restera jusqu'en 1956.

Dès la signature du décret il prit sur lui :

- de faire passer d'urgence en zone libre, avant l'arrivée de l'envahisseur, tout le personnel militaire affecté ou reflué à Bordeaux, qui échappa ainsi à la captivité
- d'y convoier le matériel le plus précieux
- de créer à Montauban une annexe de l'IGN en zone libre
- de négocier le retour de la direction générale à Paris, dans les bâtiments du SGA jusque-là occupés par l'allemand, et de récupérer la majorité des machines et du matériel du SGA que l'occupant s'était approprié. Il y réussit.

Des lois successives et des décrets d'application publiés entre 1940 et 1962 fixèrent l'organisation de l'établissement, le recrutement, et les statuts de ses personnels, lui rattachèrent le Service du Nivellement Général de la France, une Ecole Nationale des Sciences Géographiques, des annexes issues de la reconversion des bureaux d'Outre-Mer, et plus tard après la guerre une escadrille spécialisée dans la prise de vues aériennes pour la cartographie, en France et Outre-Mer. Un décret du 8 avril 1941 fixait ainsi les attributions de l'IGN :

"L'Institut Géographique National créé pour exécuter, dans le domaine géodésique, topographique et cartographique tous les travaux d'intérêt général, poursuit en première urgence la triangulation du territoire, l'exécution de la nouvelle carte de France au 1/50 000 ainsi que les levés au 1/20 000 et au 1/10 000. Il poursuit en même temps les travaux de triangulation et d'exécution des cartes topographiques..."

Dès le début de 1941, l'IGN pouvait reprendre des travaux en zone libre. L'organigramme des travaux de terrain était en gros celui du Service Géographique de l'Armée mais dès 1943 avec des moyens accrus par le recrutement des jeunes ingénieurs ou opérateurs formés à l'Ecole des Sciences Géographiques qui venaient s'ajouter aux anciens du SGA devenus civils.

LA GEODESIE A L'IGN

A la section de géodésie du SGA succédait la Direction de la Géodésie (2^e Direction) à laquelle fut rattachée le Service du Nivellement Général. La tâche à accomplir était d'importance :

1) au point de vue des travaux de terrain, il était nécessaire

- de continuer et achever le réseau de triangulation primordiale dont le SGA n'avait pratiquement pu observer qu'une petite moitié,

- d'observer sur tout le territoire ou presque, la triangulation de détail qui, à la déclaration de guerre, ne couvrait guère que le 1/8 de la surface du pays,

- d'observer les stations astronomiques (dites de Laplace) assurant la réorientation du réseau, et les bases nécessaires au maintien de l'échelle (les procédés électro-optiques ou électromagnétiques de mesure des distances n'étaient pas encore nés),
- de poursuivre l'observation du réseau de Nivellement.

2) Le régime civil de l'IGN impliquait la publicité et la publication des résultats de la description géométrique du territoire, comme l'officialisa plus tard un arrêté interministériel (20 mai 1948) "fixant les conditions d'exécution et de publication des levés de plans entrepris par les Services publics" qui stipulait... "tous ces travaux seront obligatoirement basés sur la nouvelle triangulation de la France et le nivellement Général de la France en cours d'exécution par l'Institut Géographique National... Tous les travaux visés à l'article premier seront obligatoirement exécutés dans les systèmes de projection Lambert en usage à l'Institut Géographique National et recevront le quadrillage correspondant..."

Il fallait donc maintenir à Paris un service sédentaire solide, chargé de :

- tenir les archives à jour et mettre au point un mode adéquat de publication

- réviser les méthodes de calculs et les mettre au point pour la pratique.

L'organisation de la 2^e Direction prévoyait donc :

Travaux de terrain

1) un département de triangulation

2) une section de nivellement

Travaux sédentaires : le "Bureau Technique" comprenant essentiellement

1) un Bureau des Archives et des Publications

2) un Bureau des Calculs

3) un Bureau des Etudes

Ces deux derniers seront d'ailleurs rapidement fusionnés.

LES SECTIONS DE TERRAIN

La tâche dévolue à la Géodésie (observation d'au moins la moitié des réseaux de 1^{er} ordre, observation des 7/8 de la triangulation de détail) amena le Chef de la Géodésie (P. Jacquinet) à répartir les travaux de triangulation entre deux sections

- une section de géodésie primordiale qui prendrait en compte la triangulation du 1^{er} au 2^e ordre (J. Rainoird)

- une section de géodésie complémentaire (G. Descossy, J. Segons, N. Savoyant...)

- la section du Nivellement (Maillard-Salin, L. Cahierre, G. Descossy, J. Maillard) continuait l'œuvre du NGF sur le terrain et procédait elle-même à ses calculs et à ses publications.

Difficultés de l'époque 1940-1945 :

On sait que jusqu'en novembre 1942 la France fut partagée en deux zones, la zone "libre" limitée au nord sensiblement par le parallèle 52 grades et à l'ouest par le méridien 3 grades ouest de Paris, le reste du pays était sous occupation allemande, la ligne de démarcation, véritable frontière, ne se franchissait qu'avec un "Ausweis". Les régions côtières de la Manche et de l'Océan étaient presque interdites ainsi que les zones frontalières de la Belgique ; l'Alsace était pratiquement annexée. L'occupation devint complète fin 1942.

Les travaux géographiques en zone libre ne rencontraient pas de difficultés administratives spéciales. En zone occupée, ils étaient soumis aux autorisations et contrôles militaires exercés par les troupes d'occupation, les personnels devaient être munis de papiers délivrés par le contrôleur militaire de l'IGN (Paris) précisant leur mission. Quelques officiers allemands de liaison étaient détachés pour assurer un contrôle technique de l'avancement des travaux auxquels la Wehrmacht s'intéressait ; c'étaient en général des géomètres réservistes, ayant une certaine connaissance du travail avec qui les relations étaient correctes ou tendues suivant les caractères des antagonistes ; le renversement du sort de la guerre eut parfois des retours bien ironiques.

Dans les deux zones régnait la pénurie : les véhicules automobiles étaient montés sur gazogène - ticket de charbon de bois - l'essence était rarissime - ticket d'essence - remplir les accumulateurs des projecteurs pour le travail de nuit, un problème quotidien à la campagne, sans parler des difficultés du ravitaillement - tickets de pain, etc..., mais on pouvait sur ce point trouver des accommodements (fig. 64).

L'année 1944 vit le débarquement des alliés et la libération ; les brigades parties sur le terrain avaient reçu de la direction de l'IGN l'instruction d'agir "au mieux des circonstances" et de préserver le matériel ; les opérations géodésiques, suspectes à la fois aux occupants, aux maquis et aux représentants de l'autorité, furent pratiquement suspendues ; on peut encore se demander comment s'administraient ces unités, dont certaines participaient avec efficacité aux combats.

Ce n'est guère qu'en 1946 que la situation fut pleinement éclaircie, et que les brigades de terrain purent exécuter leurs missions sans contraintes.

TICKET DE CHARBON DE BOIS



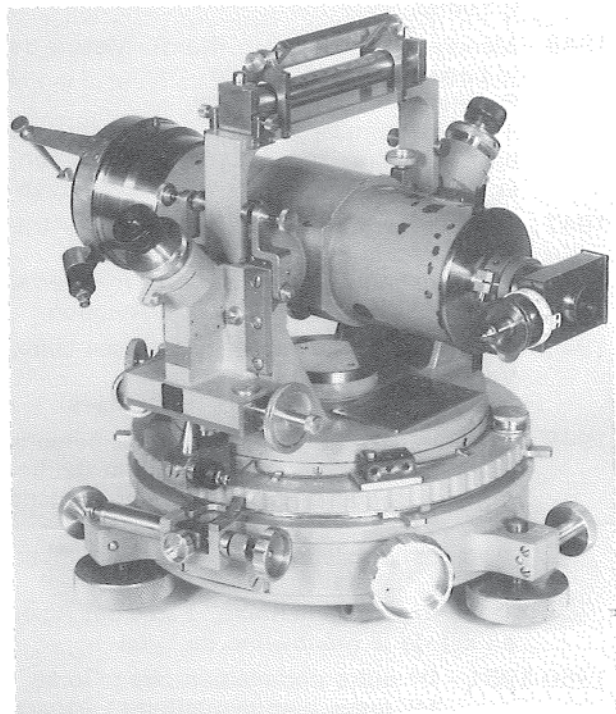
Fig. 64 (Collection J. Forien de Rochesnard)

Matériel d'observation :

C'était le matériel classique du géodésien d'avant-guerre amélioré par quelques innovations :

- les cercles azimutaux réitérateurs à 4 microscopes dont le limbe avait 32 ou 42 cm de diamètre, vieux instruments vénérables sûrs et précis mais lents. La mesure d'un couple sur référence durait 10 à 15 minutes. Un angle de 1^{er} ordre devait en principe être mesuré à 20 couples, par réitérations réparties sur plusieurs jours.

- les nouveaux cercles répéteurs, conçus par P. Tardi et construits par Chasselon entrèrent en service au début de 1942 (fig. 65). Ils donnaient de bons résultats, pas nettement supérieurs à ceux des vieux cercles répéteurs. Une série se composait de 6 répétitions et l'on observait 4 ou 8 séries, à



Cercle répéteur.

Fig. 65

origine réitérée - durée d'une série 20 à 25 minutes - ils avaient deux inconvénients :

a) malgré les soins d'usinage le plateau du mouvement général et celui du mouvement particulier portés par des roulements à billes coaxiaux, n'étaient pas rigoureusement parallèles et l'appareil nivelé sur le mouvement général par exemple, ne l'était pas rigoureusement sur le mouvement particulier.

b) pour éviter les erreurs systématiques dues aux mouvements d'entraînement du signal, il fallait mesurer la torsion à l'aide d'une lunette auxiliaire fixée sur le même support que le cercle (support de torsion), un premier opérateur pointait au fil mobile un signal fixe pendant que l'autre pointait le signal géodésique à viser... c'était encombrant et parfois mal commode, mais efficace.

— enfin le théodolite de Wild T3, qui semble-t-il s'essouffle aux grandes distances parce que le diamètre de l'objectif est un peu juste.

Pour les stations de Laplace, on utilisa l'instrument des passages de Prin, et à partir de 1947 le théodolite de Wild T4. Ces deux instruments étaient munis du micromètre impersonnel et d'un niveau "Talcott". Le garde-temps était soit une horloge à quartz, soit, ultérieurement un bon chronomètre de marine, dont l'état et la marche étaient étudiés par réception radio des signaux horaires rythmés, et plus tard des signaux horaires continus.

Les résultats de réception des signaux horaires et des passages d'étoiles étaient enregistrés soit sur bande imprimante, dispositif précis mais long et fastidieux à dépouiller, soit sur des chronographes imprimants qui furent construits vers 1947 et qui étaient éminemment pratiques.

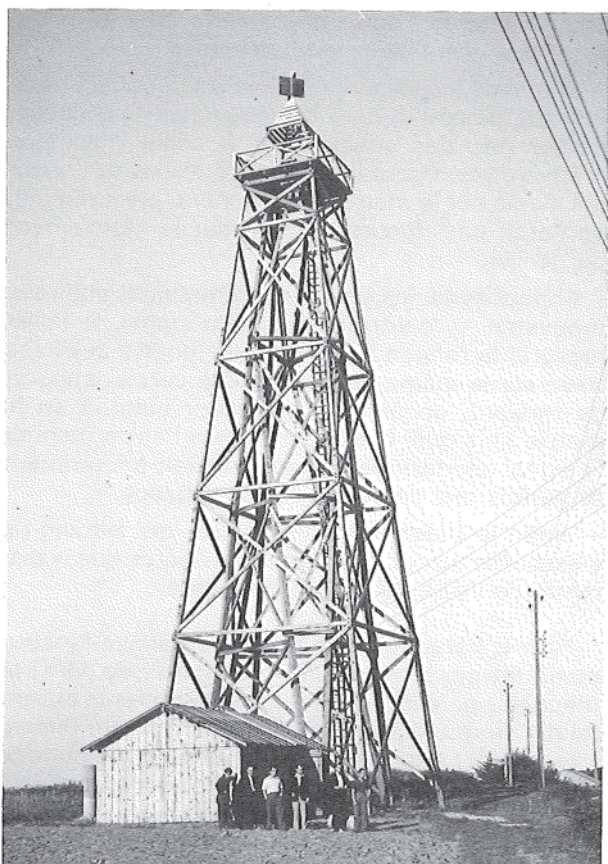
La mesure des distances a fait les progrès que l'on sait. De nos jours on mesure des distances de plusieurs dizaines de kilomètres à la précision du 1/500 000 avec les appareils à réflexion d'ondes. Le réseau géodésique de 1^{er} ordre français sur lequel tout repose fut terminé en 1957-1958 : il n'a pas pu profiter de ces nouveaux appareils dont la commercialisation date des années 1960.

On mesura donc des bases au fil invar et ce n'est guère que dans les travaux de 1^{er} ordre entrepris au profit des pays étrangers que l'IGN put utiliser systématiquement géodimètres et telluromètres.

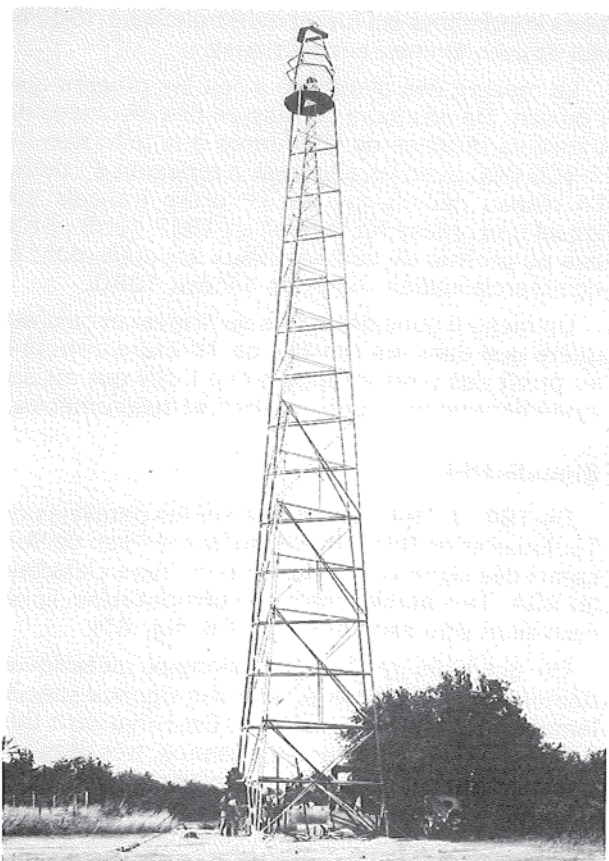
Signalisation :

De 1941 à 1944, on monta sur les parallèles de Toulouse et de Rochefort et sur le méridien de Bordeaux des signaux en charpente du type classique au SGA. Très stables mais non démontables, ils ne pouvaient être réutilisés (fig. 66, fig. 67).

On eut alors recours aux signaux métalliques démontables - Entrepose - et à des signaux spécialement conçus - Paris, Bilby -. On construisit une échelle métallique de reconnaissance, très pratique (échelle Delooz), de montage immédiat, légère, souvent préférée à l'échelle Durand du SGA. Ces signaux furent largement utilisés par la suite par les brigades de détail, qui en conçurent de nouveaux, parfois acrobatiques.



Signal en charpente de 24 m (station astronomique de Belus).
Fig. 66



Signal type Bibby.

Fig. 67

Les projecteurs pour visées de nuit étaient des phares d'automobiles, munis d'une graduation grossière sur vis calantes et d'une lunette de pointage solidaire. Bien visibles de loin, ils permettaient de bons pointés, mais, à mon avis, bien que munis d'un dispositif de centrage de l'ampoule, la qualité du miroir réflecteur n'était pas suffisante et des excentrement optiques indécélables étaient certainement possibles. Ils fonctionnaient sur 6 volts ; allumage et extinction pouvaient être commandés par une horloge interrupteur parfois fantaisiste.

Des miroirs solaires d'un modèle récent étaient employés concurremment aux héliotropes Durand.

Le réseau de 1^{er} ordre :

Les travaux commencèrent en 1941. Nous indiquons ci-dessous les programmes réalisés, que l'on trouvera exposés dans (51, n).

- 1941 - Fin des observations du parallèle de Paris (région du Perche)
1^{er} ordre complémentaire dans le Charolais
1^{er} ordre complémentaire en région Parisienne (Chartres, Mantes, Creil)
Parallèle de Toulouse (moitié Est)
- 1942 - Parallèle de Rochefort
Parallèle de Toulouse (Ouest). Mesure de la base de Dax
1^{er} ordre complémentaire dans l'Allier Mâconnais
- 1943 - Méridienne de Bordeaux (partie sud)
Bretelle de la Garonne
- 1944 - Mesure de la base d'Angers. Arrêt des travaux après le débarquement allié
- 1945 - 1^{er} ordre complémentaire : espace entre le parallèle de Paris, la méridienne de France et la région de Dieppe. Mesure de la base d'Yvetot.
- 1946 - Méridienne de Bordeaux (Nord) - Mesure de la base de La Rochelle
Parallèle d'Amiens (Ouest)
1^{er} ordre complémentaire. Espace compris entre les parallèles de Lyon et d'Avignon, la méridienne de France et celle de Lyon
- 1947 - 1^{er} ordre complémentaire : suite des travaux dans les Cévennes
1^{er} ordre complémentaire : côte méditerranéenne au Sud du parallèle d'Avignon
- 1948 - 1^{er} ordre complémentaire : Basse-Loire, Vendée
1^{er} ordre complémentaire : Pyrénées
- 1949 - 1^{er} ordre complémentaire : espace compris entre les parallèles de Toulouse et Rochefort, les méridiennes de Bordeaux et de Paris
1^{er} ordre complémentaire : Cotentin, Picardie
1^{er} ordre complémentaire : Partie des Alpes à l'Est de la méridienne de Lyon
- 1950-1951 - 1^{er} ordre complémentaire : Corse
1^{er} ordre complémentaire : espace Gironde - Landes

FRANCE

TRIANGULATION DE 1^{er} ORDRE



Fig. 68

Le réseau géodésique français de 1^{er} ordre.

1^{er} ordre complémentaire : espace compris entre les parallèles de Paris et de Rochefort - les méridiennes de Paris et de Bordeaux
jonction franco-anglaise à travers le Pas-de-Calais
jonction franco-suisse

1952-1953 - Reconnaissance du bloc 1^{er} ordre complémentaire de Bretagne
Mesure de la base de Crozon

Le réseau sera terminé en 1956-1957.

A l'issue de ces travaux, le réseau français comprenait 860 sommets de 1^{er} ordre, 15 bases, 9 stations de Laplace (voir fig. 68).

Le Bureau des Etudes et des Calculs du Bureau technique ayant mis au point les méthodes de calcul de compensation et pris à son compte la compensation des chaînes de l'Ouest (voir plus loin) la plupart des calculs du 1^{er} ordre complémentaire furent effectuées par les ingénieurs de la géodésie primordiale, et leurs adjoints, si bien que vers 1959 le réseau complet était observé et calculé, laissant aux travaux de la géodésie complémentaire un cadre correct et "définitif" pour le calcul des feuilles de triangulation.

La précision du réseau est correcte, l'écart type d'une direction est de l'ordre de $\pm 1,1$ seconde centésimale après la compensation pour les chaînes de l'Ouest. La fermeture des triangles atteint rarement 6 secondes centésimales, mais ce critère est trompeur comme on l'a déjà dit : la fermeture des équations aux côtés est plus significative.

De 1938 à 1957, les ingénieurs suivants participèrent aux observations et calculs : MM. Batteux, Decae, Delhomme, Delooz, Duhamel, Helo, Janicot, Jardou, Laclavère, Lacoste, Lallemand, Larose, Levallois, Mayet, Rebouet, Savoyant, Segons, Traizet, Tual, Van de Castele, Weber... beaucoup ont poursuivi leur carrière à l'IGN.

Le réseau de détail :

C'est un très gros morceau si l'on admet qu'un point de premier ordre en engendre 4 de 2^e ordre et que cette "raison" s'applique au 3^e et au 4^e ordre, on arrive à une évaluation totale de $860 \times 4 \times 4 \times 4 = 55\,040$ points, soit environ 50 points par feuille de la carte au 1/50 000, ce qui est précisément la densité moyenne préconisée par les délibérations du Comité Central des Travaux Géo-

graphiques. Couvrir le territoire national d'une triangulation ayant cette densité était une tâche énorme et à longue échéance car si l'expérience montre qu'un opérateur très exercé pourra dans l'intervalle de la belle saison (mettons six mois) reconnaître, équiper et observer la surface d'une feuille au 1/50 000, soit environ 600 kilomètres carrés, un opérateur débutant ne saurait obtenir un tel rendement. Un coefficient moyen de 0,75 paraît plus raisonnable et l'on voit que 50 opérateurs auraient mis environ une trentaine d'années pour réobserver la triangulation de détail, à supposer que les crédits correspondants aient été attribués à la Géodésie. Lorsque la triangulation de 1^{er} ordre fut terminée en 1958, la section de Géodésie complémentaire (J. Segons) était loin d'être au bout de sa tâche.

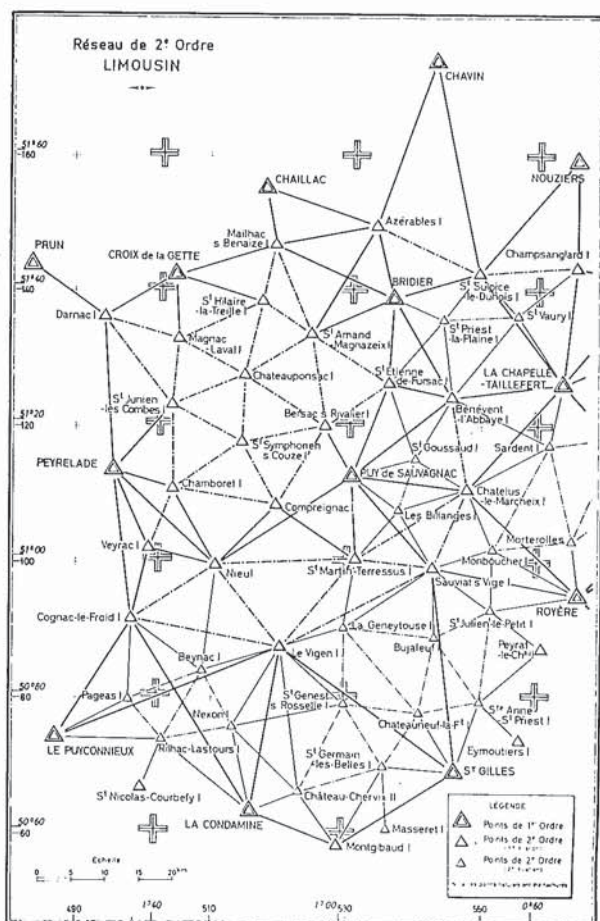


Fig. 69

Le travail était réparti entre 3 ou 4 groupes de brigades, chacun chargé de l'observation de 8 à 10 feuilles : le chef de groupe assurait la coordination générale, répartition des travaux entre les brigades, reconnaissance, schéma, liaison entre les brigades, plan de construction, d'occupation et de démontage des signaux, administration, la tâche des brigades étant essentiellement l'observation.

L'observation du 2^e ordre et du 3^e ordre se faisait à 8 ou 10 séries au T 3, celle du 4^e ordre à 8 séries au T 2. La précision relative du réseau est de l'ordre de ± 5 cm et l'erreur de l'échelle assurée par le 1^{er} ordre, est au pire de l'ordre de 1/60 000 (fig. 69).

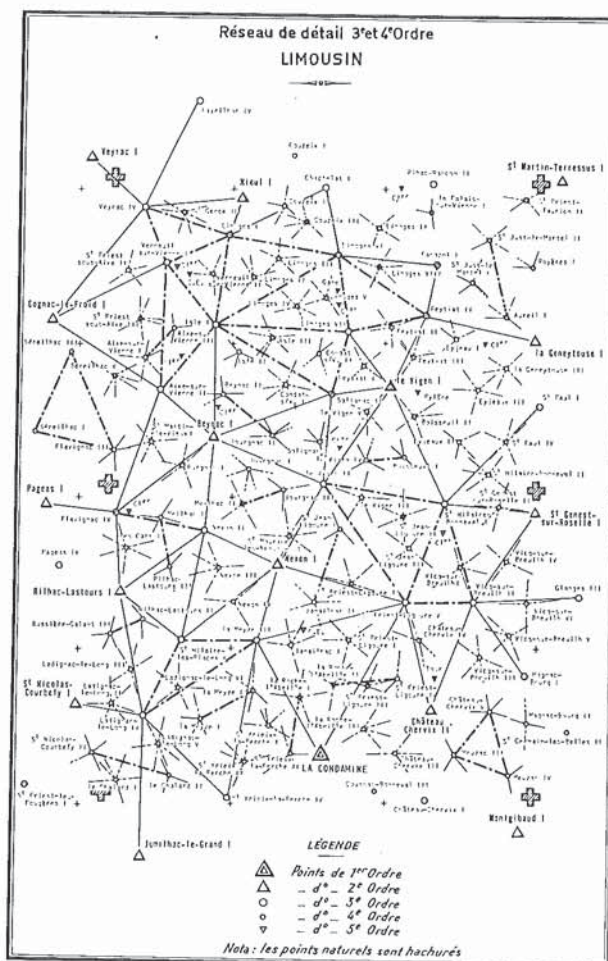


Fig. 70

A l'observation de la planimétrie s'ajoute celle du nivellement géodésique des points de triangulation ; le nivellement géométrique de précision, ne peut en effet coter tous les points de la carte utiles au topographe ou au photogrammètre ; clochers, bornes géodésiques, sommets de châteaux d'eau sont l'objet d'un nivellement géodésique dont la précision est de l'ordre de ± 15 cm ou mieux, mais dont le schéma d'observation - à côtés courts - est différent de celui de la triangulation. Il se raccroche bien entendu aux altitudes du nivellement géométriques de précision.

Chaque point géodésique est décrit par une fiche signalétique et matérialisé par une borne.

Au retour des groupes les observations étaient mises au net et la section procédait aux calculs par blocs (moindres carrés) ou, depuis 1962, confiait ce travail aux ordinateurs de la section des Calculs.

La production annuelle était de l'ordre de 1 200 à 1 500 points, suivant programme.

La triangulation du pays est à l'heure actuelle pratiquement terminée (1986) y compris la reprise des feuilles observées par le SGA avant la guerre, soit quarante ans après la libération.

La France est donc couverte d'un réseau de triangulation homogène, déterminé de manière univoque, fiché et publié (fig. 70).

Section du nivellement :

L'intégration du service du Nivellement Général de la France à l'IGN et son rattachement à la direction de la Géodésie ne provoquèrent que peu de modifications dans l'organisation de ce service.

Il fallu revoir certaines méthodes de calcul du réseau qui étaient un peu trop empiriques et établir une collaboration serrée entre le service du Nivellement et section de Triangulation de détail, afin d'améliorer le réseau de nivellement géodésique des brigades de terrain en le liant plus étroitement au nivellement de précision par le concours de niveleurs dans les groupes de triangulation.

La tâche fixée fut poursuivie avec continuité avec des moyens renforcés et des attributions élargies

aux travaux outre-mer, ce qui était un gros morceau. On se rappelle que les travaux de nivellement de précision hors du territoire métropolitain étaient exécutés par le SGA : ils devenaient désormais du ressort de la section du Nivellement de l'IGN.

Les programmes annuels prévoyaient donc :

- des travaux en France (reprises locales du 1^{er} ou 2^e ordre et surtout développement du réseau de 4^e ordre).
- des travaux outre-mer (Algérie) en particulier l'établissement d'un 1^{er} ordre en Afrique.

Le tableau ci-dessous reproduit quelques relevés statistiques (1946-1955) de la longueur totale en kilomètres des lignes de nivellement observées par année ; tel était à peu près le programme normal.

	1946	1947	1948	1949	1950	1951	1952	1953	1954	1955
FRANCE	6 478	6 878	6 893	6 377	6 489	6 070	5 550	5 477	5 089	5 955
AFRIQUE DU NORD	792	377	625	572	865	697	547	803	808	517
OUTRE-MER								7 400	8 580	9 580

Au point de vue des publications, on dut renoncer à poursuivre la série des Répertoires de Nivellement du NGF, collection luxueuse très soignée dont le défaut principal était de figer dans un recueil typographié, la situation essentiellement mouvante d'un réseau en mutation perpétuelle par suite des disparitions, des réobservations, des déclassements, etc... d'où des ratures, des surcharges et l'impossibilité de tenir le stock à jour et de soumettre à la clientèle un document correct.

Les méthodes d'observation du NGF restaient en vigueur et le matériel d'observation profitait des perfectionnements à l'ordre du jour.

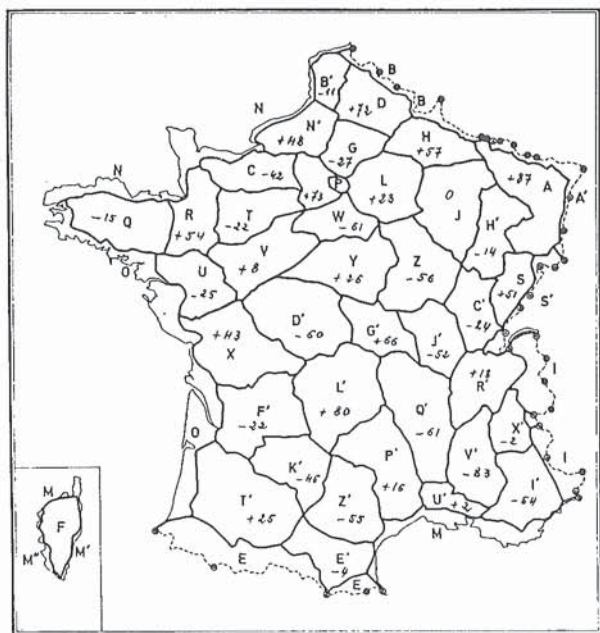
Le nivellement IGN 1969 :

Mais il s'avéra peu à peu que le réseau du NGF (1^{er} ordre et 2^e ordre) commençait à se fatiguer (fig. 71).

- une partie des repères de nivellement avait disparu, la proportion pouvant atteindre 25 % (déplacements intempestifs, malveillance, faits de guerre, etc...)
- dans certaines régions minières (Nord de la France, Lorraine...) les effondrements avaient bouleversé les altitudes de repères
- les opérateurs unanimes signalaient une discordance systématique entre leurs observations et les observations anciennes, de la région de Paris au Nord de la France
- la réfection simultanée des nivellements de tous les ordres dans les régions où opéraient les groupes de triangulation, commode et logique, du point de vue organisation, avait l'inconvénient de raccorder le nivellement révisé aux altitudes anciennes d'un contour qui souvent ne l'était pas lui-même, donc de détruire en partie les bénéfices de la révision
- enfin, du point de vue théorique, le premier ordre NGF malgré la correction orthométrique ne correspondait plus aux normes modernes (absence de toute mesure de pesanteur).

En 1962, sur le rapport du Chef de la Géodésie, le directeur de l'IGN décidait la reprise complète du nivellement de 1^{er} ordre du territoire. Poursuivie avec continuité elle fut achevée à l'automne 1969 et complétée par des mesures de pesanteur ayant la densité suffisante pour garantir une précision de l'ordre de quelques dixièmes de millimètre sur les dénivelées géopotentielles.

Ce nouveau réseau observé sous les ordres de J. Maillard, se développe sur 13 700 kilomètres environ de lignes de nivellement, il suit aussi fidèlement que possible les lignes du NGF, en formant



France. - Réseau de premier ordre de nivellement. Erreurs de fermeture en millimètres. Fig. 71

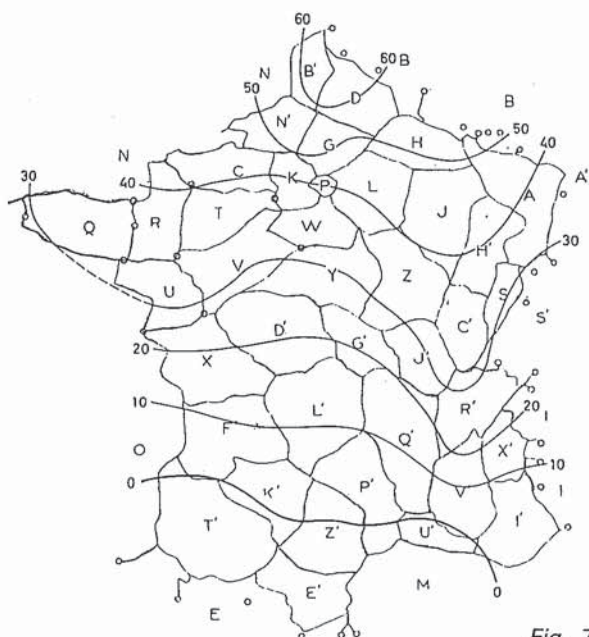


Fig. 72

Nivellement primordial IGN. Discordances entre les altitudes (IGN orthométrique et Lallemant origine). (Cotes exprimées en centimètres).

un certain nombre de mailles que ce dernier avait laissé ouvertes, sur la frontière des Alpes notamment. Sa précision moyenne kilométrique ressort à $\pm 1 \text{ mm}^3$ (NGF $\pm 1 \text{ mm}^7$) par la fermeture des mailles. Le contour extérieur ferme à 8 mm. Les cotes du nouveau réseau sont exprimées en "altitudes normales" ($\Sigma g \cdot dh / \gamma_m$ où γ_m est la valeur moyenne de la pesanteur théorique le long de la verticale du point considéré, supposé à l'air libre).

Les altitudes du nouveau réseau sont évidemment différentes des altitudes des points correspondants de l'ancien réseau, d'une part parce que les nouvelles observations diffèrent forcément de celles du réseau NGF, d'autre part parce que l'altitude normale et l'altitude orthométrique d'un même point sont deux nombres différents (quoique voisins) pour un réseau donné, calculé dans les deux hypothèses.

Le nivellement IGN 1969 a été comparé au nivellement Bourdaloue, convenablement recalculé en un seul bloc par la méthode des moindres carrés, après révision sur les originaux ; on l'a également comparé au NGF. Pour que la comparaison soit plus convaincante, on a calculé un IGN 1969 orthométrique.

Il y a effectivement des différences systématiques très appréciables (cf. fig. 72). Elles ont été étudiées, il semble que NGF aussi bien qu'IGN 1969 sont affectés d'un systématisme - de sens contraire - dont les causes sont difficiles à cerner. Une traversée Nord-Sud très récente, mais qui n'est peut-être pas elle-même exempte de toute erreur systématique, a donné le résultat moyen ! Mais le nivellement IGN 1969 se raccorde beaucoup mieux que le NGF avec les nivellements étrangers et avec les travaux des océanographes.

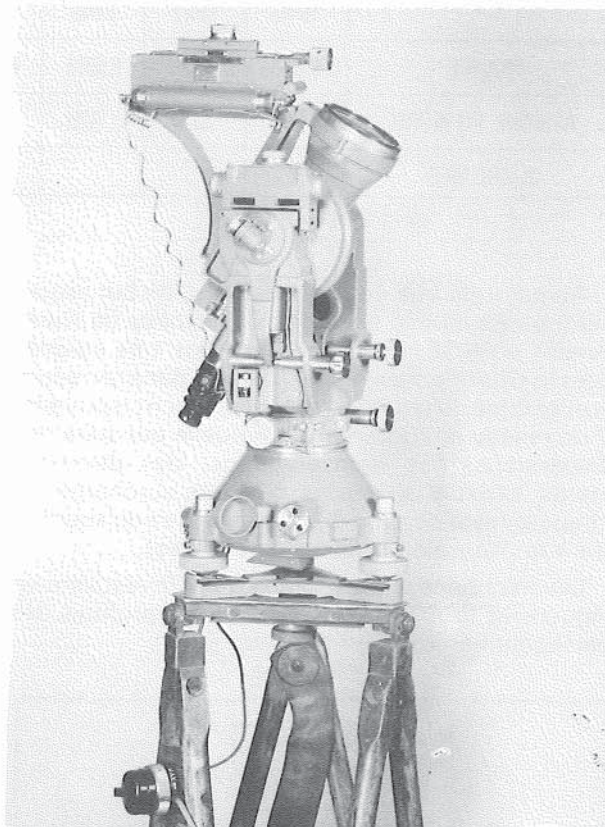
De toute façon la question des erreurs systématiques à longue portée est loin d'être claire et reste

posée encore actuellement, et non seulement en France.

La substitution du réseau nouveau au réseau ancien s'est faite aussi progressivement que possible, en tâchant de limiter au maximum la gêne et les incertitudes de l'utilisateur. Le réseau général actuel est maintenant tout entier exprimé dans le nouveau système.

Pas plus que le NGF ce réseau ne sera définitif ; tout comme un réseau géodésique un réseau de nivellement vieillit et se détériore dans le temps. C'est une constatation amère pour les gouvernants, mais l'entretien d'un réseau correct est à ce prix, les rafistolages font illusion un temps, mais tôt ou tard une reprise générale s'impose.

Astronomie géodésique :



Théodolite Wild. T 3 avec son niveau Talcott.

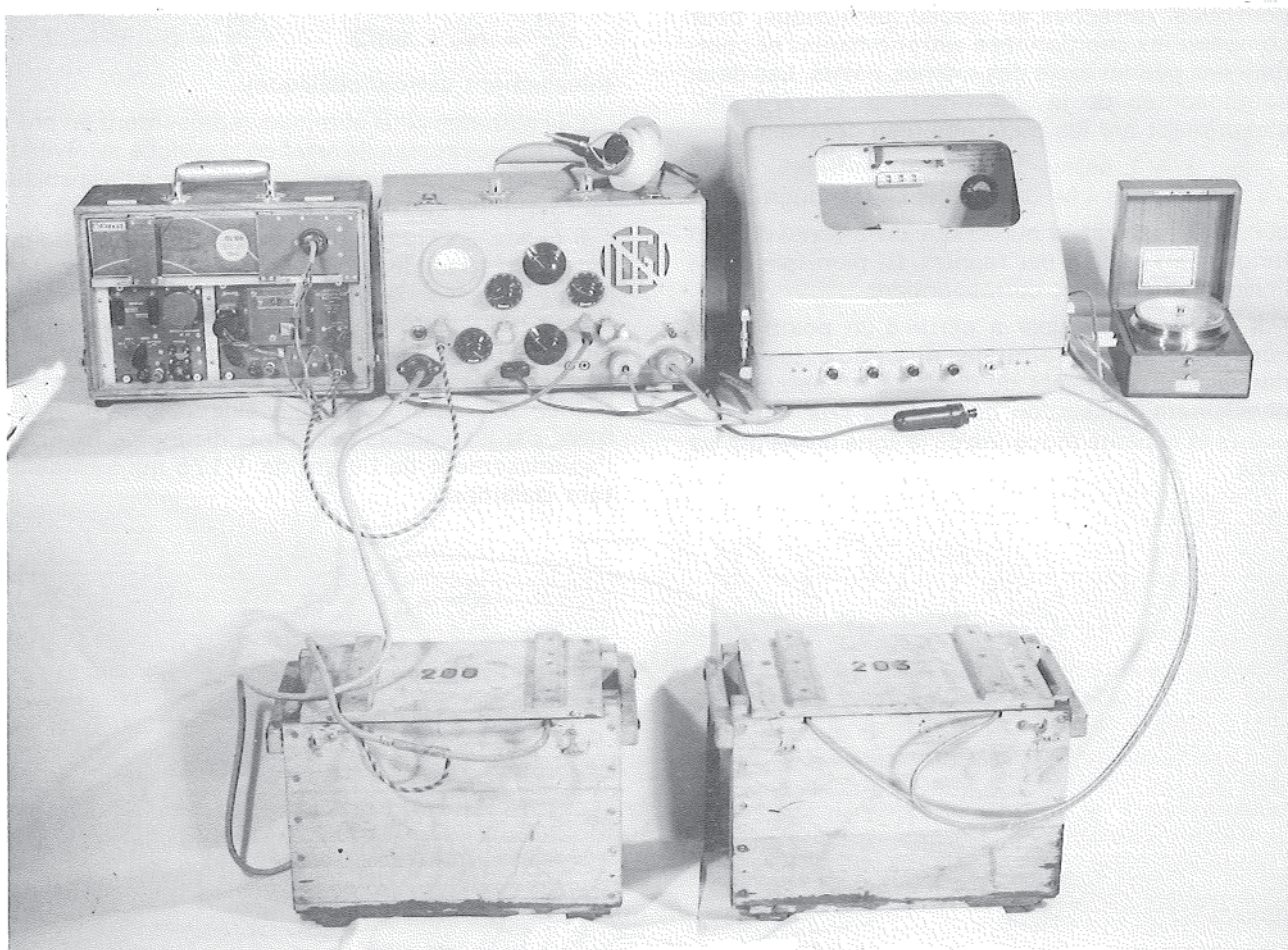
Fig. 73

Les stations de Laplace qui réorientent le réseau primordial ont été observées à partir de 1939.

- la station de Chausey (G. Laclavère 1939)
- la station de Belus et celle de Chadenac (G. Laclavère 1943)

furent déterminées par des mesures méridiennes à l'instrument des passages de Prin, la latitude par la méthode de Talcott (passage de paires d'étoiles symétriques par rapport au zénith), l'azimut par passage méridien d'étoiles lentes, voisines du pôle ou par observation de la polaire à la digression maxima (fig. 73).

- les autres stations à partir de 1947 au théodolite Wild T4, par la méthode des hauteurs égales - voir ci-dessous - pour mesurer la latitude et la longitude à la polaire à la digression pour l'azimut.



Récepteur de signaux horaires, amplificateur et alimentation,
Chronomètre de marine.

Fig. 74



Canevas astronomique
Géode astrogéodésique

Fig. 75

Le service géographique de l'armée utilisait déjà dans les territoires désertiques de l'Afrique, un canevas astronomique pour jalonner les itinéraires aux petites échelles (fig. 74 et 75).

Considérant, à très juste titre, que l'observation d'un canevas géodésique régulier en Afrique pour les besoins d'une carte de reconnaissance au 1/100 000 ne pouvait être envisagée, le Général Hurault décida de se contenter d'une infrastructure légère obtenue en basant sur un canevas de points astronomiques une triangulation photogrammétrique dite TPFR (Triangulation par Plaques à Fentes Radiales) issue directement des prises de vues de la région à cartographier. Il est bien évident qu'aujourd'hui on ferait beaucoup mieux et aussi rapidement par observations des satellites artificiels spécialisés.

Sous la direction de P. Tardi, l'Ecole Nationale des Sciences Géographiques, au cours de ses travaux sur le terrain avait étudié et mis au point la détermination de la latitude et la longitude astronomiques par la méthode des droites de hauteur ou des hauteurs égales sous distance zénithale de 60°. L'expérience prouva qu'avec un entraînement rapide, un opérateur correct pouvait en deux ou trois séries d'observations d'environ 20 étoiles, obtenir le point à $\pm 1''$ près soit environ 30 mètres. Le théodolite de précision (Wild T3) muni d'un niveau spécial et d'un réticule à 11 fils horizontaux était bien adapté à ce type d'observations. Les brigades géodésiques observèrent ainsi des milliers de points en Afrique (environ 300 par saison).

Sur le territoire français, on décida au cours des années 1985, d'observer un réseau de points astro-

nomiques, rattachés au réseau géodésique, pour comparer les coordonnées astronomiques et coordonnées géodésiques des mêmes points. Les deux composantes de la "déviations de la verticale" s'expriment par les quantités bien connues :

$$\xi = L_{\text{astro}} - L_{\text{Géod.}} \quad (L \text{ latitude})$$

$$\eta = (M_{\text{astro}} - M_{\text{Géod.}}) \cos L_A \quad (M \text{ longitude})$$

qui donnent la valeur numérique de la pente du plan tangent au géoïde par rapport au plan tangent à l'ellipsoïde au point correspondant.

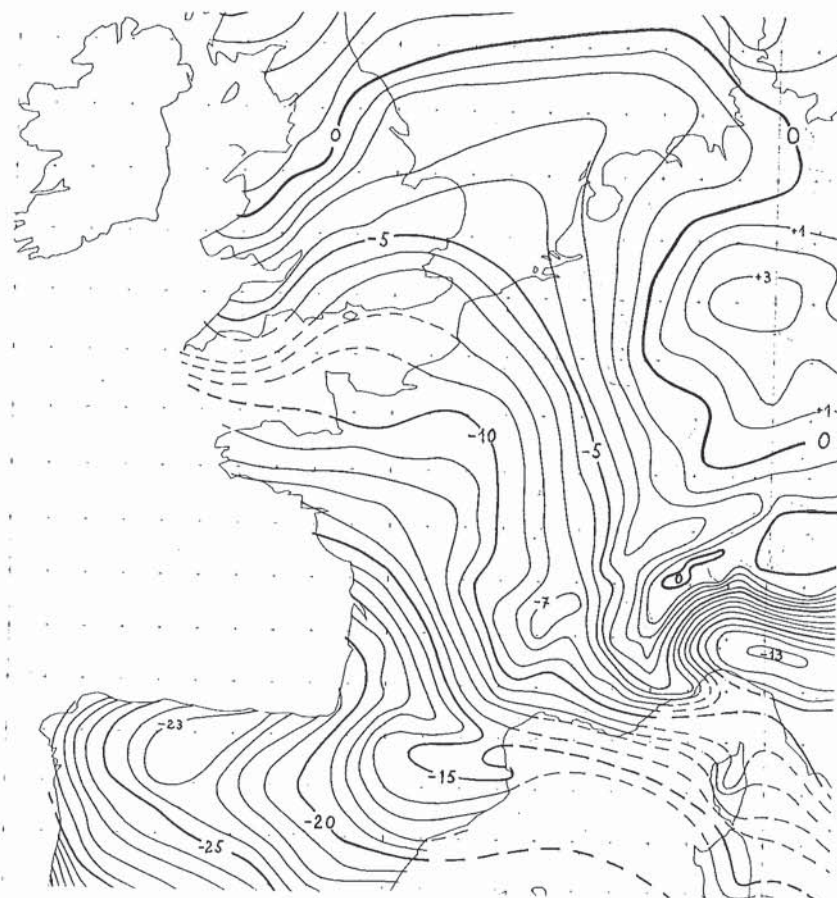
Il est donc possible à partir d'un point choisi comme origine des altitudes de calculer les altitudes des autres points du géoïde par une sorte de nivellement, puisqu'on connaît les positions des points et la pente moyenne de la ligne droite qui les joint

$$\frac{\partial H}{\partial x} = (\eta_A + \eta_B)/2 \quad \frac{\partial H}{\partial y} = (\xi_A + \xi_B)/2$$

(nivellement astrogéodésique).

Les altitudes ainsi obtenues représentent en première approximation le relief de la surface de niveau passant par le point origine, par rapport à l'ellipsoïde de référence du réseau géodésique considéré.

Il existe en France environ cinq cents stations astronomiques de déviations de la verticale. Le géoïde correspondant au réseau géodésique Europe 50 est représenté ci-contre (fig. 76). On y remarquera particulièrement en France la bosse centrale d'altitude -7 très voisine de la méridienne de France qui confère à un ellipsoïde, calculé uniquement par les valeurs sur la méridienne de France, l'aplatissement de l'ordre de 1/175 qui intriguait tant Delambre.



Le géoïde astrogéodésique en Europe occidentale - Système Europe 1950 - Origine Postdam. Fig. 76

LE BUREAU TECHNIQUE

Le bureau technique était chargé de l'archivage méthodique de tous les travaux de terrain, des calculs généraux du réseau primordial, de la diffusion des résultats (carnets de coordonnées et ultérieurement répertoires de nivellement (1959), de l'archivage des travaux géodésiques entrepris à l'Etranger et de la documentation y afférente, des démarches administratives, pour la conservation du réseau (servitudes) etc...

Sa grande tâche était évidemment l'élaboration

et la diffusion des coordonnées des points géodésiques du réseau français (cf. arrêté interministériel du 20 mai 1968). Nous avons évoqué les difficultés qu'éprouvait le SGA à mettre sur pied dans les régions frontalières un système de coordonnées à peu près homogène pour l'artillerie. Elles se représenteront à une plus grande échelle pour le réseau national qui devait être homogène sur tout le territoire.

Précisons : l'existence d'un réseau primordial assure dans toute la zone qu'il couvre, l'appui des triangulations de détail (2^e ordre, 3^e ordre, 4^e ordre)

et c'est sur ce canevas que se basent les levés locaux.

On est pris entre deux exigences contradictoires.

— d'une part, l'expérience confirmant en cela l'intuition, montre que la juxtaposition de petites compensations successives accumule les contraintes, inflige aux jonctions des corrections de compensation incompatibles avec la précision réelle des observations, en un mot déforme irrémédiablement le réseau compensé. Il faut donc travailler à grande échelle

— d'autre part, l'observation et le calcul des grands réseaux de triangulation est une opération de longue haleine, qui - avant l'époque de l'ordinateur - se comptait en semestres.

Attendre que le réseau de 1^{er} ordre soit entièrement calculé afin d'asseoir les levés locaux est impensable : les besoins sont immédiats. Force est donc de procéder à des calculs provisoires sur des données incomplètes : les listes ou répertoires de coordonnées reflètent une situation transitoire qui se stabilise peu à peu, mais il n'existe rien de tout à fait définitif parce que le réseau lui-même peut être réobservé, complètement ou localement par suite d'exigences nouvelles, des progrès des techniques d'observation ou de calcul, ou de simples remaniements.

Le plan de travail des groupes de géodésie primordiale sur le terrain poursuivi avec continuité et constance depuis 1941 permit au Bureau Technique d'élaborer progressivement son plan de calcul et de documentation, sans éviter le provisoire, on vient de voir pourquoi, et en procédant peu à peu à une refonte totale des calculs du réseau, y compris celui de la NT, du SGA à l'Est de la méridienne de France. On s'était en effet aperçu que, pour les raisons énoncées plus haut, les compensations antérieures du 1^{er} ordre coïnciaient dans certaines régions - notamment vers l'Alsace, vers les Alpes-Maritimes et quelques autres endroits - parce que les calculs anciens avaient été entrepris sur de trop petits blocs qui se raccordaient mal.

On prit donc la décision

— de considérer comme définitive la compensation de la méridienne de France qui paraissait correcte et saine, et servirait de base de départ, à l'Ouest comme à l'Est

— jusqu'à ce que d'autres calculs puissent être entrepris, de donner la priorité aux travaux à l'Ouest de la méridienne en la compensant par blocs aussi grands que possible en l'état des moyens d'alors

— de recalculer ensuite la partie Est compte tenu des reprises ou compléments d'observations nécessaires, en évitant au maximum la tentation du provisoire ; ce beau plan dut, bien entendu, subir de nombreuses entorses, qui ne facilitèrent pas l'élaboration et la tenue d'une documentation à jour, mais la leçon des difficultés rencontrées pour l'unification des coordonnées Nord de Guerre avait porté : on exigeait une homogénéité d'ensemble sur toute l'étendue du pays. Le tout était de l'obtenir sans altérer ou en n'altérant que le

moins possible la précision des observations. Cela ne se fit pas tout seul comme on va le voir, et par approximations successives.

La grande conclusion qui commençait à apparaître dès 1948 est que les réseaux géodésiques sont des organismes vivants, ils ont leur jeunesse, leur âge mûr, leur vieillesse et doivent recevoir des soins.

De nos jours, le réseau géodésique national a pris indépendamment de toute représentation cartographique et bien qu'il en soit le support essentiel, une existence propre qu'utilisent tous les services ayant de près ou de loin affaire aux opérations topométriques (photogrammétrie, urbanisme, cadastre, travaux publics, etc).

Une cohérence interne de l'ordre de $\pm 0,05$ m entre les coordonnées des points géodésiques est actuellement une précision courante, elle sera probablement désuète demain. Quant à sa densité (1 point tous les 10 kilomètres carrés) elle pourrait être diminuée - certains parlent d'une densité de 1 point pour 25 ou 30 kilomètres carrés - si l'on veut ne considérer que les besoins strictement cartographiques, mais le canevas numérique se développe sans cesse, instruments actuels de mesure, ordinateurs de bureau participent à une évolution irréversible, la densité actuelle convient aux utilisateurs, il semblerait imprudent de l'éclaircir, d'autant plus que le développement d'un réseau de détail à partir de telles bases serait entrepris à titre privé, pour des besoins locaux, donc introuvable voire perdu pour la communauté, et mal raccordé.

Bureau des Archives et de Documentation :

Le nom de cette section fixe très exactement ses attributs essentiels, mais il masque la complexité des travaux qui lui incombèrent. Elle était chargée essentiellement de préparer et de publier les répertoires des coordonnées Lambert des points géodésiques de chacune des 1 100 feuilles de la carte au 1/50 000 de France, accessoirement, de toutes les démarches administratives éventuelles (conservation, servitudes, etc). Nous allons la voir à l'œuvre sur un exemple particulièrement complexe.

La feuille de St-Nicolas-de-la-Grave est l'exemple entre cent des difficultés rencontrées, et de l'aspect provisoire de certaines éditions : l'histoire en est difficile à exposer clairement.

Fin 1940, l'IGN est saisi d'une demande de travaux topographiques dans la vallée de la Garonne, région d'Agen, dont la feuille en question fait partie, ces travaux nécessitaient l'exécution d'une triangulation complémentaire qui ne pouvait s'appuyer sur aucune triangulation récente de 1^{er} ordre.

— **Canevas primordial** : comme on l'a vu plus haut, le parallèle de Toulouse dont les sommets les plus proches se situent à une trentaine de kilomètres vers le Sud, a été reconnu en 1938. Les observations ont débuté en 1939 ; interrompues par la guerre, elles seront poursuivies et achevées en 1941-1942. La méridienne de Bordeaux, le paral-

lèle de Rochefort ne seront observés qu'en 1942-1943, et le bloc de 1^{er} ordre complémentaire encadré par ces trois chaînes et par la méridienne ne le sera qu'en 1949.

Pour donner un appui un peu moins incertain aux travaux, une chaîne de 1^{er} ordre encadrant la vallée de la Garonne sera observée en 1943. Elle s'appuie au Nord de Toulouse sur deux points du parallèle de Toulouse et sur deux points de la méridienne de Bordeaux dans la région de Tonneins-Marmande. Son parcours emprunte des sommets de l'ancienne triangulation (observée vers 1827 dans la région), elle se sera ultérieurement englobée dans le réseau de 1^{er} ordre complémentaire de 1949, et calculée définitivement en 1950.

— **Canevas de détail de la feuille de St-Nicolas-de-la-Grave** : pour l'établir, une première mission (1940-1941) procède à la triangulation de détail de la 1/2 feuille Est. En 1944 on observe, dans la 1/2 feuille Ouest un réseau de 2^e ordre et une triangulation complémentaire (3^e et 4^e ordre).

La tâche qui incombait à la section des Archives et de Documentation était de fournir des listes et carnets de coordonnées homogènes en accord, dans le temps, avec les travaux voisins : il fallait donc commencer par fixer quelques éléments de départ aux opérateurs.

— **Travaux de préparation au bureau** : en l'absence de tout autre renseignement on décide d'utiliser les points de l'ancienne triangulation, mais comment obtenir des coordonnées vraisemblables en Lambert III, sur l'ellipsoïde de Clarke, à partir des positions de l'AT calculées sur un autre ellipsoïde, dans un système non compensé.

On aurait pu recalculer à partir des observations anciennes (1827-1843) les coordonnées de la chaîne du parallèle de Rodez qui se raccrochait à la méridienne de Delambre et Méchain sur des points communs à la NT. Il semble qu'on ait préféré - les documents sont assez confus - appliquer aux points de l'AT une correction théorique de position que Driencourt avait proposée vers 1922, qui donnait des coordonnées NT à partir de l'AT compte tenu du changement d'ellipsoïde, des variations aux éléments de départ du point fondamental des deux triangulations, et de la position du point considéré. Cette correction s'avéra par la suite sans rapports avec la réalité. Quoi qu'il en soit, on avait ainsi des "coordonnées NT" provisoires pour quelques points de l'AT, supposés conservées en place (clochers). Ils servirent de points d'appui à la triangulation de la 1/2 feuille Est.

Cette triangulation fut calculée sur place par l'opérateur et la section de Documentation établit une "minute provisoire de cahier de coordonnées" (juillet 1942) contenant coordonnées, schémas des points, etc, et procéda à l'établissement des servitudes.

En 1944, la 1/2 feuille Ouest est triangulée et calculée dans le même système. On en tire une liste de coordonnées (juillet 1948).

En octobre 1950, on publie une liste de coordonnées de toute la feuille, après adaptation (par abaque) des coordonnées provisoires aux valeurs définitives NT du calcul de la triangulation de 1949 du

bloc de 1^{er} ordre complémentaire compris entre méridienne de France, méridienne de Bordeaux, et parallèles de Rochefort et de Toulouse.

En 1951, on confectionne un répertoire dit "modèle IGN 1947" reprenant la liste d'octobre 1950 plus des points de préparation topographique. Et ce n'est pas fini !

En 1953-1954, l'observation de la feuille voisine - Beaumont-de-Lomagne - montre qu'il y a des discordances de l'ordre du mètre sur les points de jonction avec la feuille de St-Nicolas-de-la-Grave. On reprend alors le calcul complet de la 1/2 feuille Ouest dans le système définitif, ce que donne la liste de coordonnées de mai 1955, à laquelle on ajoute un certain nombre de points de préparation photogrammétriques.

En 1960 on procède à une première édition de la feuille dans le répertoire modèle 1954, y figurent les points de la 1/2 feuille Ouest recalculés en 1955, les points de la 1/2 feuille Est y sont classés en 5^e ordre.

En 1966 est observé en reprise générale le réseau de détail du Lot-et-Garonne qui recouvre la 1/2 feuille Est, dont il redétermine un certain nombre de points. Les dossiers sont exploités, confrontés avec d'autres travaux de stéréopréparation dans la vallée, les points sont récolés, reclassés et finalement le répertoire Modèle 1954 de la feuille de St-Nicolas-de-la-Grave (2^e édition) sort en 1968.

Depuis lors une 3^e édition (1981) suivie d'une 4^e édition mettront sur micro-fiches, les résultats, précédents, augmentés des résultats d'une révision géodésique de 1982.

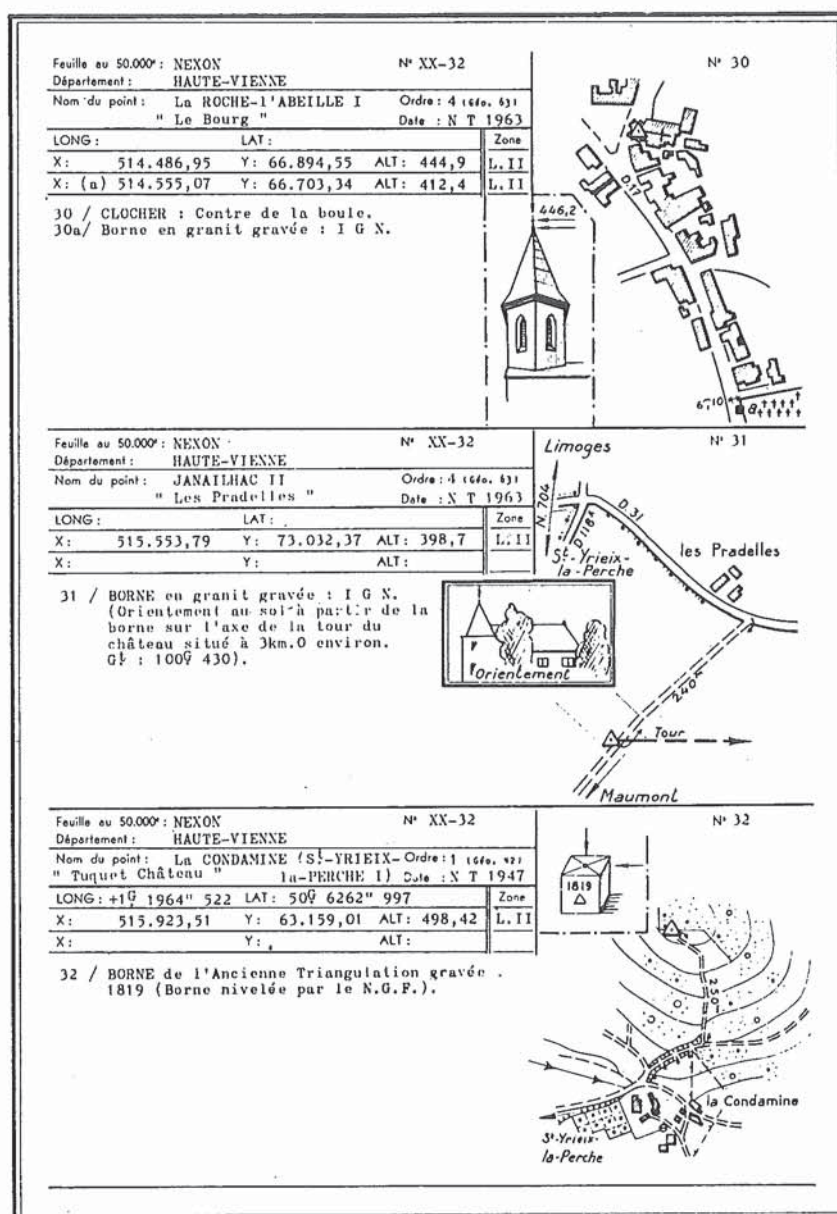
La feuille de St-Nicolas-de-la-Grave est un exemple particulièrement chargé des difficultés que rencontraient la section des Archives et de la Documentation, mais le cas n'est pas unique, en particulier toutes les feuilles observées par le SGA et calculées en Lambert non conforme firent l'objet de deux ou trois éditions. Je m'excuse d'avoir, quitte à fatiguer le public, repris son historique détaillé sur un exemple.

Répertoires des coordonnées : approuvée par une lettre ministérielle, la décision prise par l'IGN sur avis du Comité Central des Travaux Géodésiques évaluait à environ 50 le nombre des points géodésiques contenus dans une feuille de la carte au 1/50 000, ce qui fixait le densité moyenne à 1 point géodésique pour 10 kilomètres carrés. Les coordonnées étaient mises à la disposition du public sous forme de répertoires de feuilles.

Le répertoire modèle 1947 était un cahier formant un tout, peu différent en fait des carnets de coordonnées du SGA, où les points étaient groupés méthodiquement. Imprimé à plusieurs centaines d'exemplaires (imprimerie IGN), il présentait les inconvénients suivants :

— l'utilisateur qui avait besoin de quelques points devait acheter tout le recueil

— les corrections ne pouvant être faites qu'à la main, sur tous les exemplaires, une simple modification entraînait des ratures, des surcharges disgracieuses, et des risques d'omissions, etc... Il restait d'autre part un stock d'invendus.



Répertoire modèle 1954.

Fig. 77

C'est pourquoi le répertoire modèle 1954 (fig. 77) fut constitué à partir de fiches individuelles des points géodésiques, constamment tenues à jour à la Section, qui pouvaient être rassemblées ou détaillées etc... reproduites individuellement sur commande par la Section elle-même, actuellement sous forme de microfiches.

Les répertoires de nivellement, initialement confectionnés par la Section du Nivellement, présentaient les mêmes défauts que le répertoire 1947 (cf. répertoire du NGF). Vers 1960, la Section de documentation édita de nouveaux répertoires basés sur le même principe que le répertoire 1954 des points géodésiques, groupés également par feuilles au 1/50 000 au lieu du groupement par mailles de nivellement initié par Bourdaloue et suivi par Lallemand.

Organisation : pour mener la tâche à bien, le schéma d'organisation de la section était le suivant :

- l'atelier des archives (missions d'observations, calculs, notices scientifiques, etc...)
- un bureau de préparation (vérification des coordonnées, recalculs, adaptation)
- un bureau de dessin (fiches signalétiques, répertoires...)
- un atelier de reproductions (photographie, clichés des fiches, tirage des répertoires)
- un bureau de vente à la clientèle (coordonnées, répertoires, etc...)
- un bureau de conservation (servitudes, visites du réseau par le Cadastre ou la gendarmerie, demandes d'enquêtes pour destruction, etc...).

Travail de fourmi, travail ingrat et obscur, toujours à reprendre et à figoler, dont les moyens actuels ont considérablement simplifié et modifié les modalités mais où l'intervention permanente de l'homme est nécessaire comme le fut celle de l'IGC

P. Lejeune qui pendant vingt-cinq ans en fut l'âme et la cheville ouvrière.

Section des études et des calculs : elle fut créée pour rechercher, étudier les meilleures méthodes de calculs, les essayer, les mettre au point et en assurer la mise en œuvre pratique. Un ingénieur géographe et son adjoint, volontaires pour la recherche, encadraient les anciens calculateurs du SGA. Très sûrs, très soigneux dans leurs travaux, ceux-ci étaient détenteurs d'une tradition un peu guindée et statique qu'il fallait rajeunir et élargir : l'effectif fut complété par des employés instruits sur place.

Les thèmes principaux de recherches à l'ordre du jour étaient (1945) :

1) La compensation des réseaux de 1^{er} ordre : les opérations battaient leur plein, il fallait les calculer. A cette époque, la calculatrice automatique Friden, dérivée directement de l'arithmomètre de Pascal, était le fin du fin ; la compensation d'un bloc même modeste (une trentaine de points) exigeait des mois.

On réussit à activer la sortie des résultats en employant la méthode dite "des groupes" qui permettait - contrairement à une croyance alors bien ancrée - de répartir le travail entre plusieurs calculateurs tout en obtenant le même résultat que si un calculateur avait procédé à la compensation du bloc complet. Par la même occasion on put mettre au point une méthode originale qui arrivait aux mêmes résultats que les méthodes classiques avec d'autres variables (méthode aux gisements), (J.J. Levallois) ; on étudiait également les propriétés des matrices, variance, covariance des blocs de triangulation, l'adjonction de relations d'observation dans le tableau normal d'une compensation en cours (M. Dupuy, H. Dufour).

2) Les avantages du calcul direct des triangulations en projection étaient bien connus mais leur emploi se heurtait à un obstacle : les projections Lambert I, II, III, dites conformes, ne l'étaient en fait pas. Pour des raisons mystérieuses, les tables du développement de la méridienne avaient été vers 1920 arrêtées au 3^e ordre, alors que les termes du 4^e ordre n'étaient pas négligeables (ils pouvaient atteindre une trentaine de centimètres en limite de projection). C'était d'autant plus incompréhensible que les formules rigoureuses de ce développement étaient bien connues, sous forme finie, depuis Lambert (1774). C'est pourquoi les calculs du 1^{er} ordre avaient été jusqu'à la guerre, menés par l'ellipsoïde, les points de 2^e, 3^e, 4^e ordre étant calculés en projection. Il fut finalement décidé de calculer de nouvelles tables, rigoureusement conformes, et d'y ramener les valeurs des coordonnées des points géodésiques anciens, mais ce fut un gros travail, (M. Dupuy, H. Dufour) pour lequel il fallut vaincre bien des objections (1948-1950).

3) Ce problème des adaptations fit l'objet d'études systématiques, les recherches portèrent sur les méthodes purement numériques telles que l'interpolation par les polygones de Lagrange en variables complexes ($y + ix$). Après quelques essais probants, la méthode fut appliquée en grand pour la transformation des coordonnées Lambert en

coordonnées UTM, problème dont la généralisation fut l'objet de la thèse de doctorat de M. Dupuy ; quant à la transformation directe des coordonnées Lambert d'un point d'une zone aux coordonnées de ce même point dans une zone contiguë, il avait été résolu de manière rigoureuse en partant des équations différentielles de définition (J.-J. Levallois).

4) Le calcul des grandes distances géodésiques sur l'ellipsoïde avaient, pendant la drôle de guerre, sollicité l'attention des géodésiens du SGA, sans grande réussite. Il fut repris, à tête reposée, en partant de l'équation générale des lignes géodésiques de l'ellipsoïde de révolution (équation de Clairaut). On en déduisit des méthodes de calcul simples et efficaces qui reposaient sur une analogie mathématique formelle entre triangle polaire sphérique et triangle polaire sphéroïdique ; elles résolvaient le problème à la précision voulue (1 cm) sur des distances de plusieurs milliers de kilomètres (J.-J. Levallois, M. Dupuy). On n'avait pas eu connaissance des résultats de Legendre sur la question, 150 ans auparavant.

D'autres méthodes reposant sur l'emploi des sphères tangentes ou osculatrices furent également mises au point (H. Dufour, A. Reyt).

5) Méthodes numériques : interpolation, tabulations, intégration, etc...

L'arrivée des ordinateurs provoqua de grands bouleversements dans le service et dans les sujets de recherche :

— méthodes de programmation, choix d'un langage, uniformisation des sous programmes (H. Dufour, A. Fontaine)

— méthodes de résolution des grands systèmes linéaires (H. Dufour)

— recherches des solutions de problèmes de moindres carrés par traitement direct des relations d'observation - sans normalisation - par approximations successives, sur de grands ordinateurs : méthode des résidus conjugués, des gradients conjugués (H. Dufour)

— programme de calcul des réseaux de triangulation.

Rien ne mettra mieux en évidence la révolution de l'ordinateur que de le montrer sur un exemple.

Les chaînes de l'Ouest (voir plus haut) furent observées de 1941 à 1946 ; on résolut de les compenser en un seul ensemble en appliquant pour gagner du temps la méthode des groupes. Pour de multiples raisons, on décida de travailler dans le système de projection conforme, dit BT 45, utilisé uniquement pour les calculs IGN.

L'ensemble comprenait environ 100 stations nouvelles (300 inconnues), 4 bases (Mont-St-Michel, Angers, La Rochelle, Dax), 3 stations Laplace (Chausey, Chadenac, Bélus).

Dans la figure 78, considérons la chaîne parallèle de Paris décomposée en 2 blocs (PE1, PW2) ; si on trace la ligne de démarcation coupant la chaîne à la jonction de ces 2 blocs, elle distribue à chacun un certain nombre de directions bien précises. Les stations coupées par la ligne de démarcation sont

dites stations de liaison, les autres dans chaque bloc sont les stations indépendantes.

On démontre alors que l'on peut traiter chacun des deux blocs séparément à condition de classer les inconnues de liaison (V_0 , x , y) des stations de liaison) en fin de système et de procéder, dans chaque bloc, à l'élimination **partielle** de toutes les inconnues indépendantes suivant la technique usuelle des résolutions de moindres carrés. On obtient donc dans chaque bloc un système ne contenant que les inconnues de liaison ; on démontre qu'il suffit d'additionner ces deux systèmes partiels et de résoudre le système somme pour obtenir pour les inconnues de liaison les valeurs qu'on aurait calculées par une compensation d'ensemble.

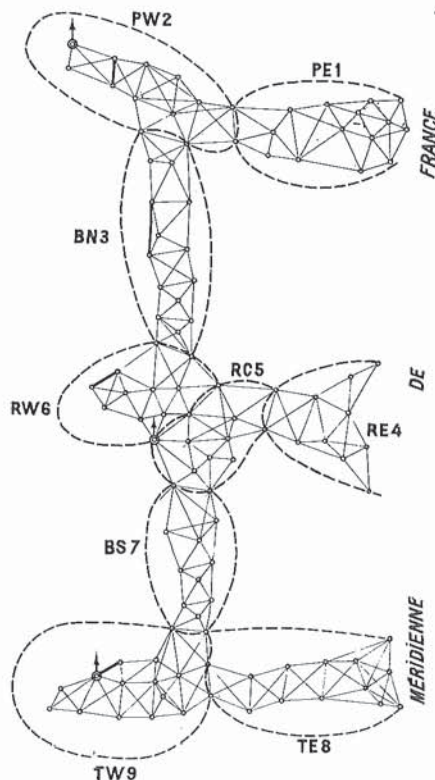


Fig. 78

En restituant à chaque bloc les valeurs de ces inconnues de liaison, on remonte aux inconnues indépendantes, et tout se passe comme si le réseau avait été compensé en un seul bloc. La même méthode peut bien entendu prévoir plusieurs étages d'inconnues de liaison et par un choix judicieux, on peut pour les chaînes de triangulation, des réseaux de cheminement etc..., découper un réseau en partie maniable par un seul calculateur. C'est ce qui fut fait. Cette compensation qui avait accaparé pendant un an l'activité de 3 calculateurs, 1 ou 2 ingénieurs fixaient le cadre dans lequel on compense par la suite tous les blocs de 1^{er} ordre complémentaires de l'Ouest. C'était l'époque héroïque.

En 1969 puis en 1974 la compensation d'ensemble du réseau primordial français fut reprise à titre expérimental à la section des Etudes et des Calculs (H. Dufour, H. Monge). L'examen critique des observations - forcément manuel - demandait évidemment autant de temps qu'auparavant, mais la normalisation et la solution du système de 2 700

inconnues simultanées furent avalées sans effort par l'ordinateur en quelques heures, alors qu'une solution à la main par les calculateurs, même après décomposition en groupes, aurait été impensable.

On a pu de ce fait confronter le réseau 1945-1960, à la nouvelle compensation, évidemment bien supérieure et comparer :

- les échelles
- les orientations
- les déformations relatives.

Les écarts relatifs contrôlés dans des mailles carrées de 100 kilomètres de côté sont **au maximum** de l'ordre de

1/70 000 en échelle

1/60 000 en orientation (soit 1 milligrade)

1/100 000 environ pour les déformations relatives.

Par rapport à une transformation linéaire de l'un des réseaux dans l'autre les résidus maxima en x, y sont de l'ordre de 0,50 m, leur moyenne quadratique étant de l'ordre de $\pm 0,10$ m.

Tel est l'ordre de grandeur des déformations de la NT par rapport au modèle de 1947.

On peut donc considérer que la précision moyenne des coordonnées NT actuellement publiées dans les répertoires de coordonnées est voisine de 1/100 000, mais ce qui en 1970 était suffisant pour la topométrie de précision, ne le sera probablement plus en l'an 2000. Il est vraisemblable que les procédés de mesure seront alors très différents et les exigences de travail à l'avenant.

Le système Europe 1950 :

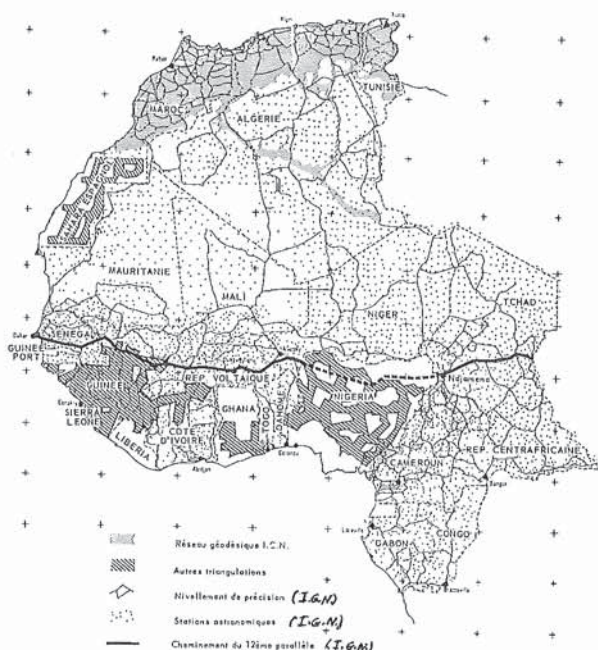
Le système géodésique dit "Europe 1950" est le résultat d'une compensation générale des réseaux de l'Europe occidentale, effectuée à l'initiative de l'Army Map Service. Le système de coordonnées qui en résulte est exprimé en Mercator transverse (UTM), représentation conforme de l'ellipsoïde selon une bande méridienne. L'avantage de cette projection est d'être identique pour tous les méridiens ; elle est distribuée en fuseaux de 6° : 3° de part et d'autre du méridien central. Elle est calculée sur l'ellipsoïde de Hayford

$$(a = 6\,378\,388 \text{ m } \alpha = 1/297)$$

Les coordonnées rectangulaires UTM sont réservées aux usages militaires et ne sauraient être utilisées en topométrie de précision. Elles ne peuvent être comparées aux coordonnées Lambert correspondantes dont elles dérivent, pour les points de détail par adaptation. D'autre part les éléments de calcul du 1^{er} ordre étant évidemment différents, les coordonnées géographiques du 1^{er} ordre sont différentes.

Travaux hors métropole :

A la suite de nombreuses discussions avec le Ministère des "Colonies" - nous sommes en 1945 - l'Institut Géographique National prit la succession du Service Géographique de l'Armée pour tout ce qui concernait la cartographie de l'Afrique noire, de l'Indochine, de Madagascar.



Travaux sur le continent africain.

Fig. 79

Fig. 80

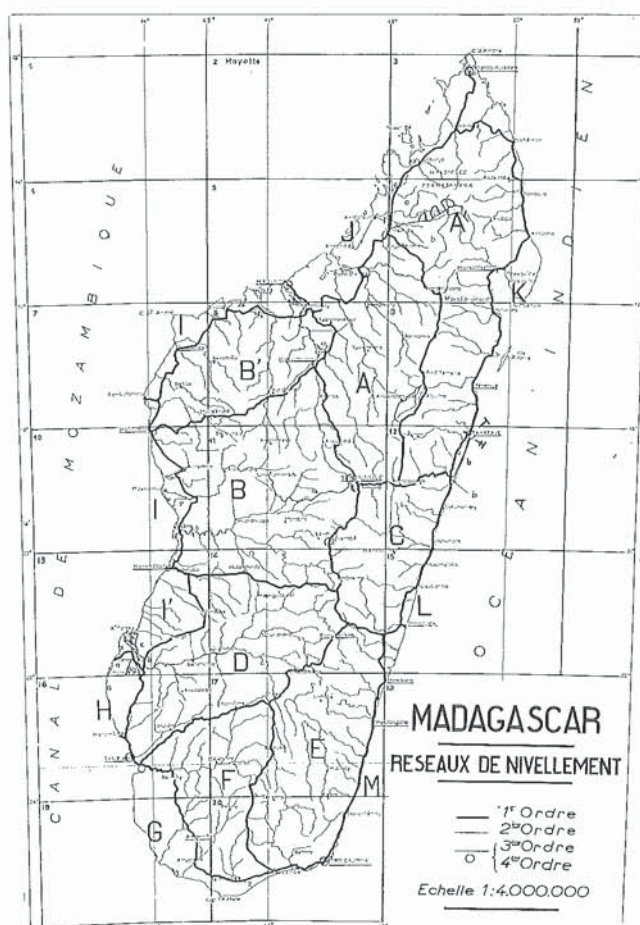
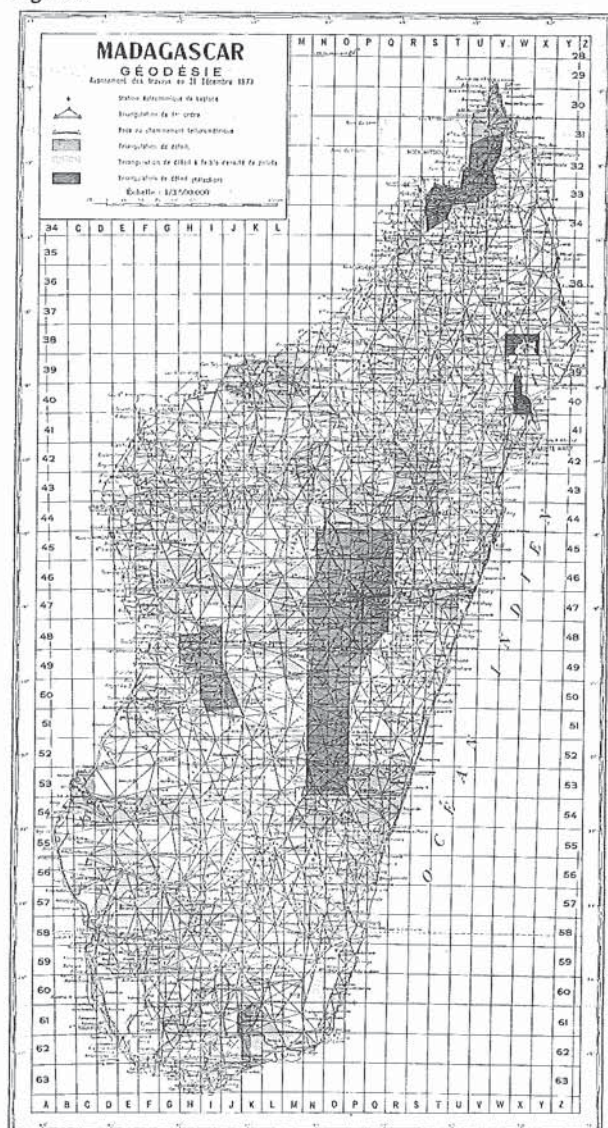


Fig. 81

Il lui fallait en outre poursuivre le levé de la carte de base de l'Afrique du Nord. Il dut donc prendre en compte les anciens services locaux dont le personnel français n'avait eu que des liaisons assez lâches avec le SGA et assumer la responsabilité technique de l'ensemble, avec du personnel IGN, en séjour sur place dans les nouveaux services géographiques d'Outre-Mer créés pour l'exécution des tâches sédentaires ou en mission temporaire pour les travaux importants sur le terrain.

Ultérieurement, au fur et à mesure de l'accession des différents territoires à l'indépendance, l'IGN conclut des accords de coopération avec les nouveaux états lorsqu'ils désiraient poursuivre leurs travaux géographiques avec son concours.

Bien entendu il fallait également pourvoir à l'équipement des départements d'Outre-Mer.

C'est ainsi que des travaux géodésiques importants furent effectués

— en Algérie (avant l'indépendance) : réobservation du parallèle Nord et du 1^{er} ordre complémentaire du littoral (1953-1954). Observation d'un certain nombre de cheminements primordiaux au telluromètre dans le Sud, avec mesure concomitante des coordonnées astronomiques des sommets, depuis Hammaguir (Colomb-Bechar) vers le Sud-Est sur 1 500 kilomètres et bretelle de raccord depuis la région d'Ouargla

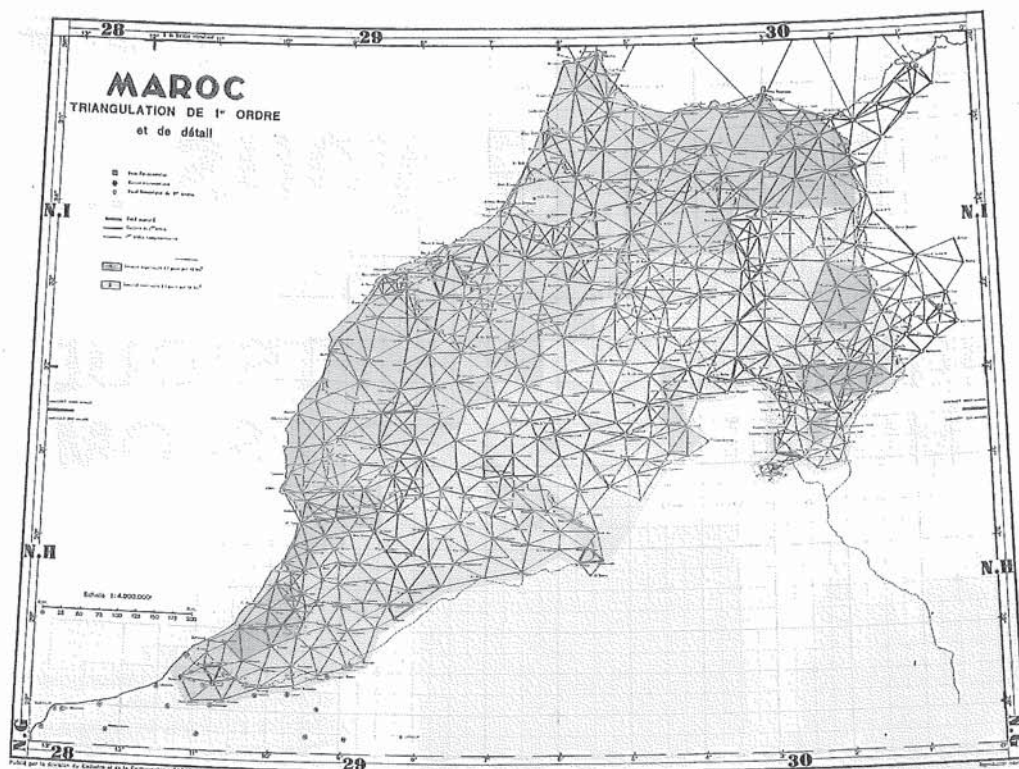


Fig. 82

— au Maroc : poursuite et achèvement de la triangulation primordiale, la triangulation complémentaire étant du domaine du Service Topographique Chérifien

— en Afrique Noire, très importants travaux de nivellement de précision s'étendant sur des milliers de kilomètres, destinés à fournir l'appui altimétrique nécessaire à la confection de la carte au 1/100 000 ou au 1/200 000 basée elle-même sur

un canevas de points astronomiques (des milliers)

— à Madagascar poursuite et achèvement de la triangulation de 1^{er} ordre

— triangulation des départements d'Outre-Mer (Antilles, Réunion, Tahiti, Nouvelle-Calédonie, Somalie...) - canevas astronomique de la Guyane.

Les cartes jointes donnent une idée de l'étendue et de l'articulation de ces travaux (fig. 79, 80, 81, 82, 83).

NOUVELLE CALÉDONIE

SITUATION AU 1^{er} JANVIER 1954

Planche XXXI

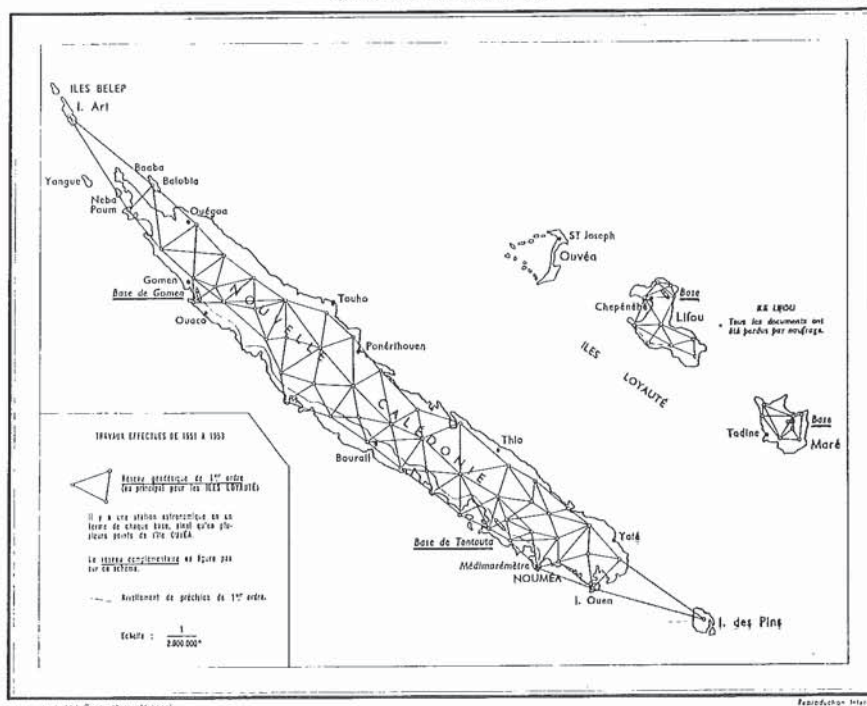


Fig. 83