Zeitschrift: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK = Mensuration, photogrammétrie, génie rural

Herausgeber: Schweizerischer Verein für Vermessung und Kulturtechnik (SVVK) = Société suisse des mensurations et améliorations foncières (SSMAF)

Band: 77 (1979)

Heft: 6

Artikel: La géodésie et les satellites

Autor: Dupraz, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-229696

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 03.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

La géodésie et les satellites

H. Dupraz

Le secret d'ennuyer est de tout dire.
Voltaire

Die Satellitengeodäsie ist eine logische Folge der in den letzten Jahrhunderten benützten Methoden für die Bestimmung der Form, der Dimensionen und des Schwerefeldes der Erde. Sie bringt sehr elegante Lösungen und einen hohen Genauigkeitsgewinn gegenüber den Beschränkungen der klassischen terrestrischen Methoden (Meridianbogenmessungen, astronomische Beobachtungen, Gravimetrie). Die Grundgedanken der Ortsbestimmungsmethoden (Satellitentriangulation und -trilateration, Dopplermessungen) und des Einsatzes der Satelliten für die Bestimmung des Erdschwerefeldes werden erklärt.

Die Anwendungen der Satellitengeodäsie sind zahlreich. Es seien nur die folgenden erwähnt:

Eine genaue Bestimmung des Geoides und des Erdschwerefeldes sind sehr wichtig für die Kontrolle der Bahnen der künstlichen Nutzsatelliten. Die Realisierung eines homogenen Weltsystems von Fixpunkten macht die Analyse der relativen Lage und Orientierung der nationalen Netze möglich. Die Kenntnisse über die Polwanderung und die Erdkrustenbewegungen sind von grösster Bedeutung für die Geophysik.

Avertissement

L'auteur n'est pas un spécialiste de la géodésie spatiale. Il a eu l'occasion d'approcher cette science lors d'un séjour d'étude à l'Université de Hanovre et souhaite offrir à ses collègues aînés et aux étudiants, notamment à ceux de langue française, une introduction aux principes et aux buts de cette nouvelle technique.

1. Un peu d'histoire...

La géodésie décrit la forme et les dimensions de la Terre. Cette phrase très simple cache en réalité des problèmes dont la complexité s'est accrue, au cours des siècles, en même temps que le progrès des sciences et des connaissances. Il a fallu trouver sans cesse de nouvelles solutions, et la géodésie spatiale s'inscrit logiquement dans cette évolution.

Depuis Erathostène et jusqu'au 17e siècle, la Terre était considérée comme *sphérique*. Le problème était d'en déterminer le *rayon*, en mesurant la *longueur* d'un arc de méridien par des travaux géodésiques, et son *amplitude* (angle au centre) par des observations astronomiques. Le rayon terrestre est le quotient de ces deux grandeurs.

Erathostène, 200 ans avant J. C., en avait déjà obtenu une estimation remarquable par ce principe nommé *«méthode géométrique»*. Les seuls progrès par la suite sont constitués par l'amélioration des instruments et l'introduction du procédé de la triangulation.

Il faut attendre la fin du 17e siècle pour voir apparaître l'idée que la Terre est un *ellipsoïde de révolution*. La forme de cette surface ne dépend plus d'un seul, mais de *deux paramètres:* les deux demi-axes de l'ellipse méridienne, ou bien le grand-axe et l'aplatissement. A cette époque, éclate la fameuse querelle des Cassiniens et des Newtoniens: la Terre a-t-elle la forme d'un citron ou celle d'un pamplemousse (voir fig. 1)? Les physiciens, avec Newton et Huygens, poursuivant leurs recherches sur l'attraction des corps, affirment que la Terre est un ellipsoïde de révolution aplati aux pôles. Les géodésiens, derrière Cassini, s'appuient sur leurs mesures d'arcs pour affirmer que la Terre est au contraire allongée le long de la ligne des pôles. Pour en avoir le cœur net, l'Académie royale des Sciences de Paris organise deux expéditions chargées de mesurer deux nouveaux arcs de méridien, l'un au voisinage du pôle (expédition de Laponie), l'autre au voisinage de l'équateur (expédition du Pérou). Si la Terre est aplatie aux pôles, pour une même amplitude, l'arc mesuré au voisinage du pôle sera plus long que celui situé près de l'équateur.

Après de nombreuses péripéties, les expéditions confirmèrent la théorie de Newton.

En 1743, Clairaut établit, avec sa *«Théorie de la Figure de la Terre»*, la relation entre les *axes de l'ellipsoïde, la latitude* d'un lieu et *l'intensité de la pesanteur* en ce lieu. Associée à l'emploi du pendule – qui permet de mesurer l'intensité de la pesanteur – cette théorie donne l'aplatissement de l'ellipsoïde si on en connaît le grand-axe. C'est la *méthode dynamique*.

Au cours du 18e siècle, d'Alembert et

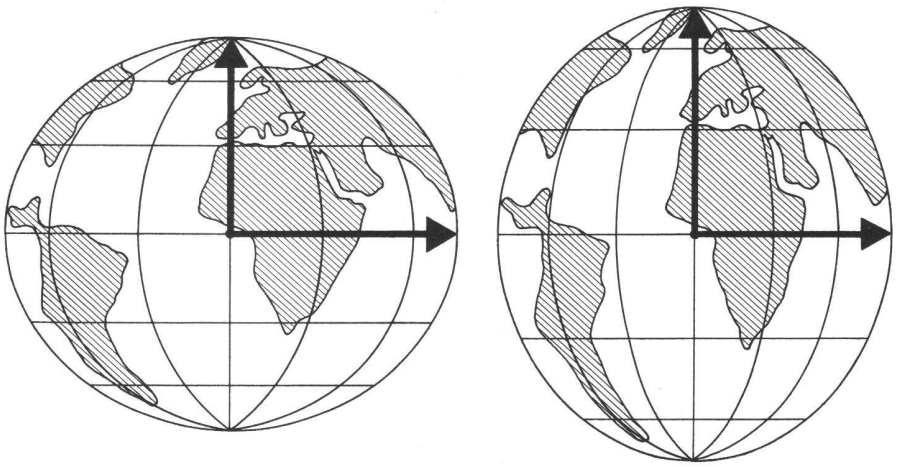

Fig. 1 La querelle des Newtoniens et des Cassiniens (1670–1730). La Terre est-elle un pamplemousse ou un citron?

Laplace développent des *méthodes astronomiques* pour déterminer l'aplatissement de la Terre. D'Alembert détermine les actions exercées par le Soleil et la Lune sur la Terre, considérée comme une sphère renflée à l'équateur. Il montre que la précession et la nutation (en vertu desquelles les pôles célestes décrivent un cercle autour des pôles de l'écliptique) sont des conséquences de ces actions; inversément, des constantes de la précession et de la nutation, déterminées par l'observation, on peut déduire l'aplatissement. Laplace démontre que le terme périodique affectant la longitude de la Lune – fait connu depuis longtemps mais encore jamais expliqué – est dû à l'action du renflement équatorial terrestre. Il découvre un effet analogue sur la latitude. Puis, renversant la question, il déduit de ces termes – mesurés par l'observation – l'aplatissement de notre globe.

Au cours du 19e siècle, les méthodes géométrique, dynamique et astronomique donnent des résultats de plus en plus précis. Les divergences entre les mesures rapportées au système gravimétrique et celles rapportées à l'ellipsoïde de référence ne peuvent plus être négligées. Il faut en rechercher l'origine dans les *anomalies de la pesanteur* et les *déviations de la verticale,* qui proviennent de la répartition irrégulière des masses et de leur densité à la surface et à l'intérieur de l'écorce terrestre. Ces circonstances font que la loi théorique de répartition des masses dans l'ellipsoïde de référence ne rend qu'imparfaitement compte de la répartition effective de la pesanteur. Elles rendent nécessaire l'introduction d'un nouveau modèle pour la forme de la Terre, *le géoïde:* Ce terme désigne – en simplifiant – la forme générale de la Terre représentée par la surface moyenne des océans, qu'on suppose se prolonger sous les continents. Physiquement, le géoïde est une surface de niveau du champ de pesanteur; il est donc perpendiculaire en tout point à la verticale. Cette nouvelle notion soulève cependant un certain nombre de complications: le géoïde n'a pas d'expression mathématique simple, sa définition physique rigoureuse est très délicate et sa forme géométrique est irrégulière. En outre, paradoxalement, les observations géodésiques destinées à connaître le géoïde se déroulent dans la quasi-totalité des cas sur la terre ferme, c'est-à-dire précisément là où le géoïde est inaccessible. A cause de ces difficultés, les géodésiens ont coutume, pour simplifier leurs travaux, de séparer les déterminations de *position,* qu'ils traitent sur un ellipsoïde de référence, des déterminations *d'altitude,* en déterminant par nivellements et mesures gravimétriques les différences de hauteur par rapport au géoïde.

2. Le rôle des satellites

L'utilisation des satellites artificiels constitue une solution remarquable à beaucoup des difficultés affectant les méthodes géodésiques décrites ci-dessus.

Les *méthodes astronomiques* exigent, pour l'étude de la forme de la Terre, que l'on observe des corps célestes proches, par exemple la Lune. Ce n'est une cible favorable ni par ses dimensions ni par sa forme quelque peu irrégulière. Son éloignement la rend relativement peu sensible à l'attraction terrestre, et les caractéristiques de son orbite offrent à l'observateur des passages peu nombreux et mal répartis dans l'espace. Les satellites artificiels, eux, constituent des cibles ponctuelles, gravitant plus près de la Terre, donc beaucoup plus sensibles au champ d'attraction terrestre et à ses irrégularités, ce qui est un avantage pour l'étude de ce champ. En outre, leurs orbites peuvent être choisies de manière à offrir une répartition optimale des observations. Ces avantages sont tels qu'ils ont permis un accroissement de précision remarquable: avec les meilleures observations de la Lune dont il disposait, Helmert avait calculé un aplatissement de la Terre de 1/297.8±2.2. La même méthode appliquée aux satellites conduit aujourd'hui à la valeur 1/298.255±0.005.

La *méthode gravimétrique,* qui consiste à mesurer l'intensité de la pesanteur en divers points du globe, exige des mesures longues et délicates. Leur répartition présente encore de nos jours de grandes lacunes, surtout dans les zones océaniques. Bien que cette méthode garde toute sa valeur en constituant un réseau de points de référence, l'observation de l'orbite des satellites en tant que trajectoires influencées par le champ de pesanteur permet d'affiner considérablement le modèle mathématique décrivant le géoïde, qui est une surface d'égale pesanteur. Il est désormais possible – grâce aux satellites – d'introduire dans le calcul d'un modèle de la Terre une valeur de l'anomalie de la pesanteur pour chaque compartiment de la surface du globe constitué par 1° latitude – 1° longitude.

La *méthode géométrique,* pour la mesure d'arcs comme pour la réalisation des triangulations nationales, se heurte également à des difficultés, car les mesures sont limitées par la visibilité optique. Cette contrainte, imposant un développement progressif des réseaux ou des chaînes de triangulation, conduit à une propagation des erreurs peu favorable. D'autre part, elle exclut l'extension des réseaux sur de très grands pays et à plus forte raison par-dessus les océans. De cette situation résulte un très grand nombre de réseaux locaux dont les positions relatives contiennent une part d'arbitraire dans le choix de l'ellipsoïde de référence et dans l'incertitude sur l'orientation, due à la connaissance imparfaite de la déviation de la verticale. Les tentatives faites pour intégrer tous ces réseaux dans un système géométrique et gravimétrique unique n'ont que partiellement réussi. Pour toutes ces raisons, le besoin d'un système tridimensionnel mondial, dont l'origine se situerait au centre de gravité de la Terre, se faisait de plus en plus sentir, autant pour la description globale de la forme de notre planète que comme réseau-cadre pour l'insertion des réseaux locaux, ou encore pour d'autres tâches de la géophysique (étude des dérives continentales), de l'astronomie et de la navigation spatiale (contrôle des orbites des satellites utilitaires). Là encore, les satellites, utilisés comme cibles ou réflecteurs très éloignés, ont permis d'étendre à l'échelle du globe le principe de la triangulation. Outre leur rôle passif de cible ou d'objet soumis à l'effet de l'attraction terrestre, les satellites artificiels peuvent aussi jouer un rôle actif: lancer des éclairs, réfléchir des ondes laser, émettre des données ou des fréquences-étalons. Les satellites actuels sont de complexité très variable: STARLETT, lancé en 1975, est une simple sphère de 24 cm. de diamètre pesant 47 kg, véritable boulet couvert de réflecteurs pour les ondes laser (voir fig. 2). GEOS-C, par contre, lancé également en 1975 et chargé de multiples missions, possède un appareillage important permettant des mesures altimétriques, l'émission de données, la réflection d'ondes laser et l'émission de fréquences-étalons pour les mesures Doppler.

3. Les orbites

Si la Terre était une sphère parfaite, avec une densité répartie symétriquement, l'orbite d'un satellite artificiel serait décrite parfaitement par les *trois lois de Képler.* La première loi définit l'orbite comme étant une *ellipse* dont la Terre occupe un des foyers. La deuxième loi – dite «loi des aires» – décrit la variation de la vitesse du satellite sur l'orbite. La troisième loi établit que la durée d'une révolution complète du satellite sur son orbite ne dépend que du grand-axe de celle-ci.

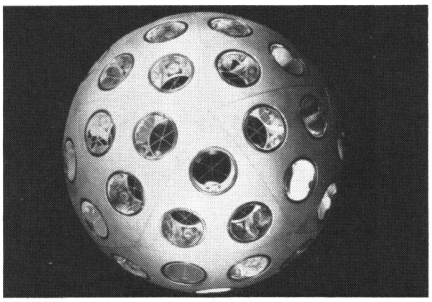

Fig. 2 Le satellite STARLETT, lancé en 1975 (diam. 24 cm.)

La position, la forme, la dimension de l'orbite et son orientation dans l'espace sont fixées par cinq paramètres théoriquement constants. Un paramètre supplémentaire permet de situer le satellite sur son orbite.

En réalité, un certain nombre de facteurs perturbent ce comportement théorique décrit par les lois de Képler. Ces facteurs sont principalement le renflement équatorial, l'attraction de la Lune et du Soleil, la résistance atmosphérique et la pression de radiation solaire (bombardement du satellite par les photons issus du Soleil). A cause de toutes ces perturbations, l'orbite effective d'un satellite n'est pas fixe. Ses paramètres varient dans le temps, et leur description exige l'emploi de modèles mathématiques complexes. La connaissance de ces paramètres et de leur évolution est cependant nécessaire pour plusieurs raisons: calcul des éphémérides du satellite pour pouvoir le photographier ou le viser avec un rayon laser à un instant donné, détermination de la position de la station d'observation à partir de celle du satellite. L'évolution des paramètres de l'orbite livre aussi des renseignements précieux sur une des principales sources de perturbations, le champ de gravitation, et permet ainsi l'étude de la forme du géoïde.

4. Les mesures et les méthodes

En géodésie spatiale, on mesure toujours des grandeurs qui dépendent de la position relative de l'observateur et du satellite. Ces grandeurs sont des directions, des distances, ou des différences de distances.

4.1 Les mesures de directions: Principe de la triangulation spatiale

La méthode la plus répandue pour la mesure de directions est la méthode optique. Elle consiste à photographier le satellite sur un fond d'étoiles. Ces dernières, qui déterminent des directions de l'espace connues grâce aux catalogues d'étoiles, servent de directions d'ajustage et permettent de calculer par interpolation les directions nouvelles correspondant aux positions successives du satellite. Une fois que ces directions nouvelles sont connues, on peut leur appliquer le principe de la triangulation spatiale, comme le montre la figure 3.

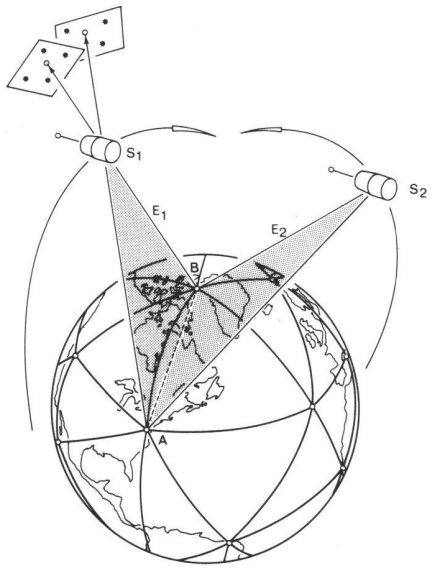

Fig. 3 Principe de la triangulation spatiale

L'observation simultanée du satellite S1 depuis les stations A et B fournit deux directions qui déterminent le plan E1. L'observation du satellite S2 depuis les mêmes stations fournit le plan E2. La direction AB est l'intersection des plans E1 et E2. L'extension de ce procédé à un ensemble de stations réparties sur le globe permet de déterminer un polyèdre formé par les directions joignant les stations A, B, C, D, E... On détermine l'échelle de ce polyèdre par des mesures de distances au sol ou de distances stations-satellites. Le satellite, objet à photographier, doit être éclairé. Il s'agit soit d'un satellite passif – ballon sphérique d'un diamètre de 30 à 40 m., qui réfléchit simplement la lumière du Soleil, soit d'un satellite actif, capable d'émettre des éclairs à des instants choisis. Son altitude est généralement comprise entre 1000 et 5000 km, altitude assez basse pour assurer une bonne précision des observations, et assez élevée pour une observation simultanée depuis des stations éloignées. Pour les prises de vues, qui se déroulent la nuit et exigent des conditions atmosphériques favorables, il existe plusieurs types de caméras, dérivées des chambres balistiques ou des instruments astronomiques.

Le satellite joue simplement le rôle de cible instantanée. Sa position n'a pas besoin d'être connue dans le système de coordonnées des stations d'observation. Un des problèmes les plus délicats à résoudre est le problème du temps. Les stations d'observation se déplacent avec la rotation de la Terre, alors que les étoiles sont fixes. D'autre part, le satellite a une vitesse propre d'environ 8 km/sec. et son observation depuis plusieurs stations doit être rigoureusement synchronisée. L'ordre de grandeur de

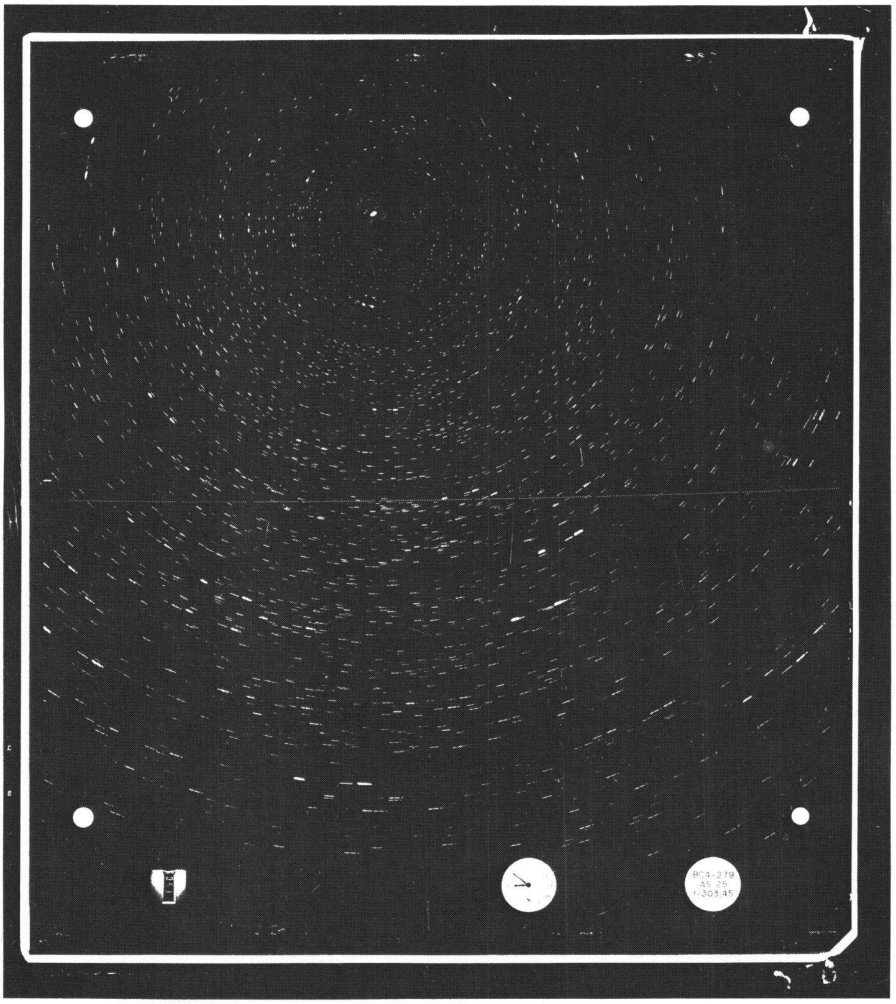

Fig. 4 Cliché d'une camera Wild BC-4, avec la trace circulaire des étoiles et celle rectiligne du satellite, observées pendant quelques minutes grâce à une commande programmée du mécanisme d'obturation

cette synchronisation est de $1 \cdot 10^{-4}$ secondes; elle exige l'emploi d'horloges de haute précision et de très fréquents étalonnages. D'autres problèmes doivent également être résolus: identification et mesure des étoiles sur les clichés, correction des effets de la réfraction atmosphérique et de la distorsion des objectifs sur la direction mesurée des étoiles et du satellite. Les Etats-Unis ont réalisé par cette méthode un réseau mondial de 45 stations bien réparties sur le globe terrestre, avec le satellite PAGEOS et des caméras Wild BC4 (voir fig. 4 et 5). L'erreur moyenne sur les coordonnées des stations, parfois éloignées de plus de 4500 km, est de ± 4,5 m. D'autres travaux, en Europe, ont conduit à une précision équivalente.

Une autre méthode pour la mesure des directions, moins répandue que la méthode optique, est basée sur le principe de l'interférométrie. Son principal avantage sur la méthode optique est l'indépendance par rapport aux conditions atmosphériques et à l'alternance jour-nuit.

Son principe est le suivant (fig. 6): le satellite S émet une onde électromagnétique de longueur constante λ. Cette onde est reçue simultanément par deux antennes A et B, éloignées d'une distance b très précisément connue. Le déphasage θ des deux signaux reçus est proportionnel à la distance AQ; on a ainsi la relation

$$\cos \alpha = \frac{AQ}{b} = \frac{\theta \cdot \lambda}{b}$$

qui donne la direction du satellite par rapport à celle fixée par les deux antennes.

4.2 Les mesures de distances: Principe de la trilatération spatiale

La mesure de distances entre stations au sol et satellites permet de déterminer la position relative des stations, comme le montre la figure 7.

Quatre points (trois points connus A, B, C; un point nouveau N) forment un groupe. Ces quatre stations mesurent simultanément leur distance au satellite S1, puis S2 et S3. Les positions des satellites se mesurent comme recoupements de trois distances mesurées simultanément depuis les trois stations connues A, B, C. Puis la position du point nouveau N se calcule comme recoupement des trois distances mesurées successivement depuis N vers chacun des satellites. Les distances sont mesurées à l'aide d'ondes électromagnétiques ou de lasers. Dans le premier cas, le principe de mesure est semblable à celui des tachéomètres électroniques utilisés par les géomètres. La station au sol émet une onde électromagnétique en direction du satellite, qui la capte et la réémet vers la station. Le déphasage mesuré entre le signal émis et le signal en retour est proportionnel à la distance à mesurer. Le résultat n'est connu qu'à un multiple près de la longueur d'onde utilisée. L'ambiguité est levée par l'emploi de plusieurs longueurs d'ondes. Les difficultés de ce procédé sont liées au calibrage de l'émetteur et aux perturbations

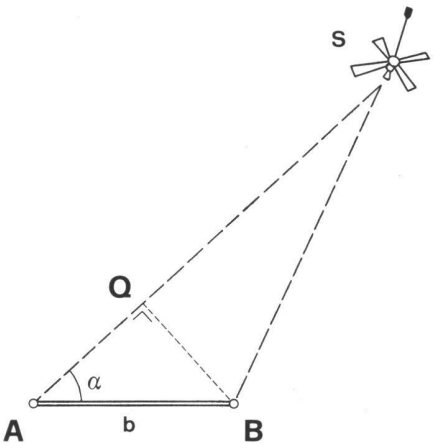

Fig. 6 Détermination électronique d'une direction par le principe de l'interférométrie

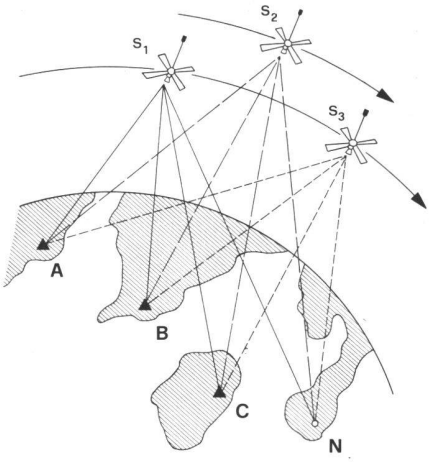

Fig. 7 Principe de la trilatération spatiale

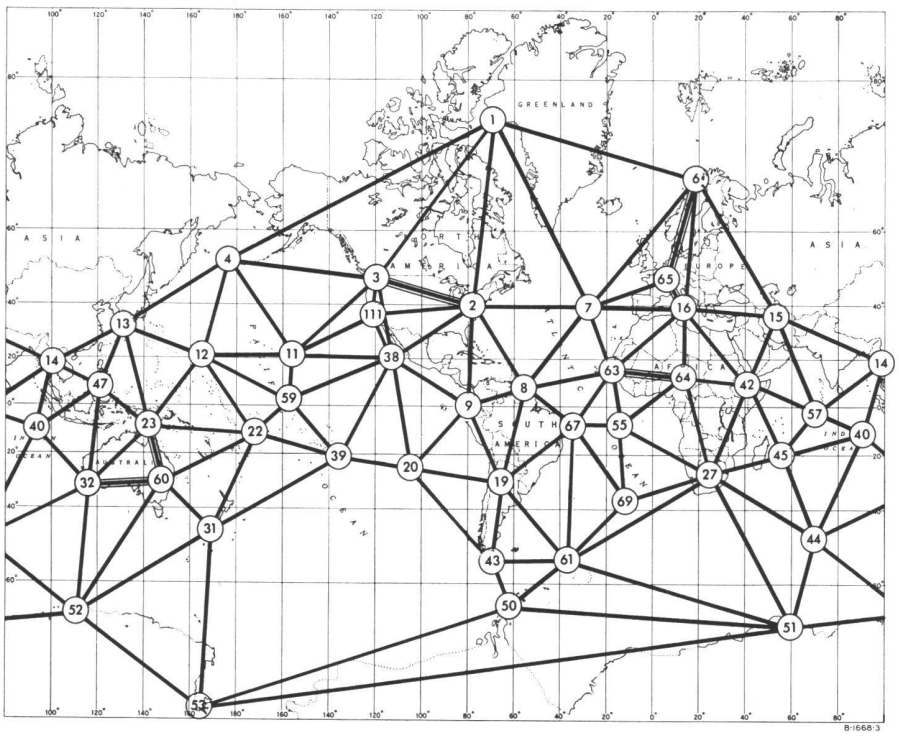

Fig. 5 Réseau mondial de points fixes, réalisé par triangulation spatiale (publiée avec l'aimable autorisation du Prof. H. Schmid, voir bibliographie)

provoquées par le passage de l'onde dans les couches atmosphérique et ionosphérique. Des modèles mathématiques permettent de corriger dans une large mesure ces perturbations. La comparaison de cette méthode avec d'autres a montré une précision de l'ordre de 5 m. sur les distances, 10 m. sur les coordonnées. Dans le deuxième procédé pour la mesure des distances, la station au sol émet une impulsion laser en direction du satellite et déclenche simultanément un compteur électronique. Le satellite, muni de prismes réflecteurs, renvoie le signal vers la station au sol. La vitesse de l'impulsion est celle de la lumière, 300 000 km/sec. ou 30 cm/nanoseconde (10^{-9} sec.). La distance se déduit du temps de parcours aller-retour de l'impulsion. La difficulté principale consiste à envoyer des impulsions extrêmement brèves, et à mesurer le temps de parcours avec une précision suffisante. Les premiers équipements atteignaient une précision de 2-6 mètres. Les nombreux perfectionnements des équipements les plus récents (notamment les lasers Neodymium - YAG), en plein développement, fourniront une pré-

cision de l'ordre de quelques centimètres. Etant donné la très faible dispersion du rayon laser, cette technique exige des orbites très bien connues, permettant le calcul d'éphémérides précises nécessaires au pointage du «canon laser» lançant les impulsions en direction du satellite.

Les difficultés provenant de mauvaises conditions atmosphériques (quatre stations doivent viser et atteindre simultanément le même satellite) n'ont jamais permis de mesurer un réseau géométrique complet exclusivement par cette méthode. Par contre, la combinaison de ces mesures avec des mesures optiques de directions a abouti, aux Etats-Unis et en Europe, à des déterminations de position avec une précision de ±5 m. Cette technique joue également un grand rôle dans les projets en cours pour la détermination des déplacements du pôle, des mouvements de l'écorce terrestre et les contrôles d'orbites.

4.3 Les mesures de différences de distances:
Principe du positionnement géodésique par mesures Doppler

Parmi toutes les méthodes de positionnement géodésique par satellite, la méthode Doppler présente des avantages déterminants: l'indépendance par rapport aux conditions météorologiques grâce à l'emploi d'ondes-radio, la précision des résultats, la simplicité des travaux de terrain.

Le principe de cette méthode est le suivant: lorsqu'une onde de fréquence constante est émise par une source se déplaçant par rapport au récepteur, la fréquence de l'onde captée est affectée par la vitesse relative source-récepteur. C'est l'effet Doppler-Fizeau dont l'illustration la plus courante est la tonalité changeante du moteur ou du klaxon d'un véhicule qui passe. Un satellite, dont la position est connue à chaque instant, émet une fréquence constante; cette fréquence, captée en un point au sol, est modifiée par l'effet Doppler dû au mouvement du satellite. Elle varie avec la vitesse relative (ou variation de distance) satellite-observateur; elle augmente si le satellite se rapproche, diminue s'il s'éloigne, et n'est pas altérée s'il passe au point de l'orbite le plus proche de l'observateur. Le lieu des points de l'espace où l'on mesurerait à un instant donné la même altération de fréquence – c'est-à-dire la même variation de distance par rapport au satellite – est un hyperboloïde de révolution. La ligne d'intersection de cet hyperboloïde avec la surface terrestre est un lieu géométrique pour l'emplacement du récepteur. Un deuxième lieu géométrique est obtenu par une mesure analogue un instant plus tard. La position du récepteur est

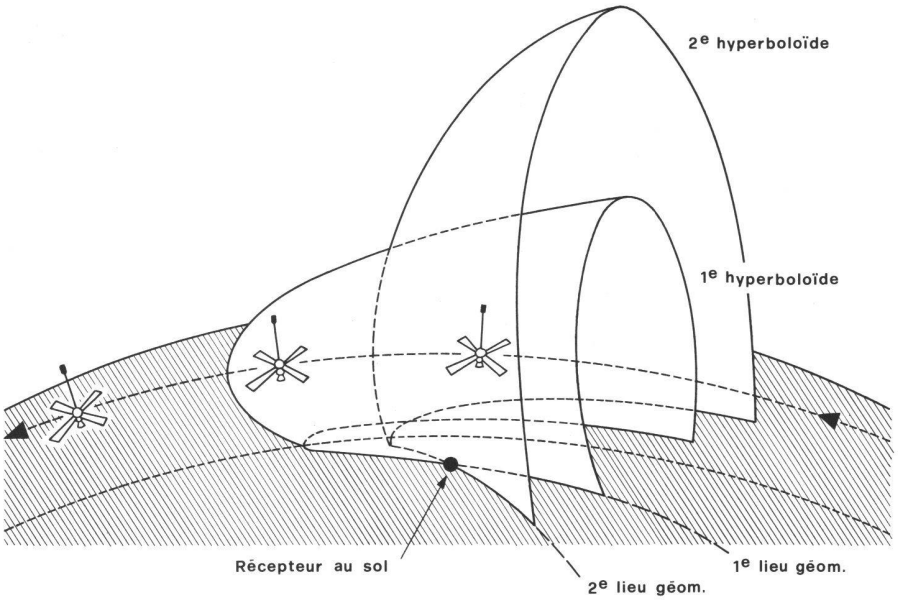

Fig. 8 Principe du positionnement géodésique par mesures Doppler

l'intersection de ces deux lieux géométriques (fig. 8). En pratique, cette position est calculée par le principe des moindres carrés à partir d'un beaucoup plus grand nombre d'hyperboloïdes.

Cette méthode est connue depuis plusieurs dizaines d'années, mais elle est restée d'abord limitée aux projets expérimentaux et aux besoins militaires, notamment comme système de navigation (positionnement de navires et sous-marins) pour la marine américaine. Créé en 1964, le système TRANSIT de l'US-Navy est accessible depuis 1967 aux utilisateurs civils. Sa précision est telle qu'il intéresse non seulement les navigateurs, mais aussi les géodésiens. Il s'agit d'un ensemble de six satellites gravitant à une altitude d'environ 1100 km sur des orbites polaires quasi-circulaires bien réparties en longitude, avec une période de révolution de 108 minutes (fig. 9).

Cette disposition permet à un récepteur situé n'importe où sur le globe d'observer au moins 10 passages par jour. Quatre stations de contrôle au sol observent en permanence ces orbites, en calculent plusieurs fois par jour les paramètres exacts, et contrôlent la marche des horloges et des oscillateurs installés à bord des satellites. Chaque 12 heures, elles «injectent» dans chaque satellite les paramètres récemment calculés de son orbite. Ces données, retransmises à un utilisateur en même temps que la fréquence stable, lui permettent de connaître la position du satellite au moment de la mesure avec une précision de 20 m., suffisante pour les besoins de la navigation. Pour les besoins géodésiques, exigeant une précision accrue, l'orbite d'un des 6 satellites est observée et calculée après coup avec une plus grande précision, et ses paramètres exacts, nécessaires pour l'exploitation des mesures, sont fournis sur demande par l'administration américaine responsable de l'exploitation du système

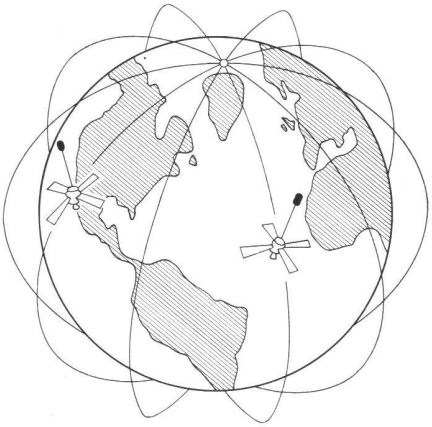

Fig. 9 La répartition en longitude des orbites polaires des satellites du système TRANSIT assure une couverture optimale de l'ensemble de la Terre

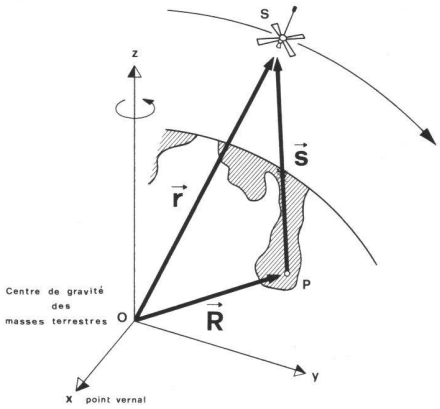

Fig. 10 La relation vectorielle fondamentale liant le centre de gravité des masses terrestres, la station P et le satellite S

TRANSIT. Le récepteur au sol peut varier de type et de précision; il possède dans tous les cas un oscillateur ultra-stable et une horloge locale nécessaires à la mesure de l'effet Doppler. Il doit également enregistrer, voire décoder, l'information contenant la date, l'identification et la position du satellite.

Il existe actuellement des récepteurs de précision géodésique, très compacts (moins de 20 kg) et entièrement automatisés, enregistrant toute l'information nécessaire sur bande magnétique; le traitement définitif des données, exigeant un volume important de calculs, se fait ultérieurement dans un centre informatique, sur la base des mesures effectuées par le récepteur et des paramètres définitifs de l'orbite.

La précision du résultat dépend principalement des erreurs instrumentales, des perturbations troposphérique et ionosphérique, de la durée des observations et des erreurs contenues dans les paramètres de l'orbite. La précision globale actuelle de cette méthode, vérifiée par de nombreuses réalisations, est de ± 3 m. pour la position absolue d'un point et de ± 1 m. pour la position relative. Cette précision remarquable, qui nécessite une durée de stationnement de trois à cinq jours par point, est indépendante de la configuration du réseau, et en particulier de la distance séparant les points au sol. La méthode Doppler constitue donc une solution rapide et précise pour de nombreuses tâches comme

- la création, l'extension, le contrôle de réseaux géodésiques
- le rattachement de réseaux existants
- le rattachement de points isolés (îles, plateformes en mer)
- l'étude du géoïde, des déformations de l'écorce terrestre et des mouvements du pôle.

4.4 La méthode dynamique

Les méthodes présentées dans les paragraphes précédents étaient des méthodes *géométriques,* ne s'intéressant qu'à la *position* des stations les unes par rapport aux autres, dans un système de coordonnées plus ou moins arbitraire. Si l'on ne considère plus le satellite comme un point géométrique, mais comme un corps pesant soumis au champ d'attraction de la Terre, il devient possible de connaître:

- les coordonnées absolues des stations dans un système rapporté au centre de gravité des masses terrestres
- le champ d'attraction de la Terre, y compris ses irrégularités.

Le principe de la méthode est le suivant: le centre de gravité des masses terrestres, une station quelconque au sol et un satellite sont liés par la relation vectorielle suivante (voir fig. 10):

$$\vec{r}(t) = \vec{R} + \vec{s}(t) \qquad (1)$$

avec $\vec{r}(t)$: lieu géocentrique du satellite à l'instant t

$\vec{R}$: lieu géocentrique de la station terrestre P

$\vec{s}(t)$: lieu topocentrique (pour la station P) du satellite à l'instant t

Le vecteur $\vec{r}$ dépend du mouvement du satellite; ce mouvement est déterminé par l'ensemble des forces agissant sur ce corps: conditions initiales de lancement, forces d'attraction, résistance atmosphérique, pression de radiation solaire. Parmi toutes ces forces figure précisément comme principale composante – inconnue – le champ d'attraction terrestre. Ainsi, l'équation (1) qui exprime ce vecteur $\vec{r}$ comme relation entre la position de la station P et celle observée en ce point du satellite S, apparaît comme *équation de base* pour l'étude simultanée de la forme de la Terre et pour celle de son champ de gravitation. Cette équation est une solution de l'équation fondamentale de Newton

$$m \cdot \ddot{r}(t) = K(r, \dot{r}, t) \qquad (2)$$

avec m: masse du satellite
K: force agissante globale
$r, \dot{r}, \ddot{r}$: lieu géocentrique, vitesse et accélération du satellite
t: paramètre du temps

dont la solution formelle peut s'écrire

$$\vec{r}(t) = r(t; \alpha_1 \ldots \alpha_6; P_1 \ldots P_n) \qquad (3)$$

les $\alpha_1 \ldots \alpha_6$ sont les constantes d'intégration, dépendant des conditions initiales de lancement du satellite, et les $P_1 \ldots P_n$ sont les paramètres du champ de force global. En introduisant (3) dans (1) on obtient

$$\vec{R} + \vec{s}(t) = \vec{r}(t; \alpha_1 \ldots \alpha_6; P_1 \ldots P_n) \qquad (4)$$

Les inconnues du champ terrestre sont introduites dans les P_i, les coordonnées, inconnues ou non, d'une station au sol figurent dans le vecteur $\vec{R}$ et toute observation du satellite depuis une station au sol peut figurer dans le vecteur $\vec{s}$.

Avec un grand nombre d'observations réalisées en des stations bien réparties sur la surface terrestre, on peut établir ainsi un système d'équations du type (4) dont la résolution fournit

- les paramètres du champ de gravitation
- les coordonnées géocentriques des stations d'observations.

L'intégration de l'équation (2) fait naturellement intervenir les lois de la mécanique céleste et des modèles pour les diverses sources de perturbation de l'orbite. Il est notamment nécessaire d'introduire une expression mathématique du champ de gravitation; pour exprimer les écarts de ce champ par rapport à un champ rigoureusement sphérique, on utilise le plus souvent un développement en série de *fonctions sphériques* de la forme

$$V = \frac{K^2 M}{r} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{a}{r}\right)^n P_n^m(\cos\theta) \cdot [C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda] \qquad (5)$$

avec K^2: constante de la gravitation universelle
M: masse terrestre
a: rayon équatorial de la Terre
r, λ, θ: coordonnées polaires géocentriques du satellite à l'instant T
P_n^m: fonctions sphériques de degré n et d'ordre m
C_{nm}, S_{nm}: coefficients du potentiel V

L'équation (5) a la signification suivante: de la même manière que des courbes planes compliquées peuvent être représentées par une somme pondérée de fonctions trigonométriques simples (séries de Fourier), des surfaces compliquées – comme par exemple le géoïde –, peuvent l'être par une somme de fonctions sphériques P_n^m (polynômes de Legendre) pondérées par les coefficients C_{nm} et S_{nm}. La figure 11 représente par exemple la fonction sphérique correspondant au terme P_9^6 de l'équation (5).

Du point de vue de la résolution du système d'équations de type (4), ce sont ces coefficients C_{nm} et S_{nm} qui sont les véritables inconnues du problème, et c'est le but de la *géodésie spatiale dynamique* de les déterminer.

La marche à suivre est la suivante:

- exprimer les perturbations des éléments de l'orbite comme fonctions des coefficients C_{nm} et S_{nm}

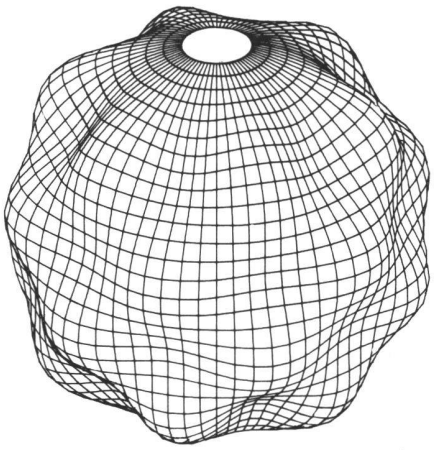

Fig. 11 Représentation de la fonction sphérique correspondant au terme P_9^6 de l'équation (5)

- observer ces perturbations par les méthodes géométriques et introduire les observations dans les équations de type (4)
- déterminer les coefficients par résolution de ce système d'équations.

Pour que la méthode soit efficace, il faut que ces perturbations ne proviennent que du champ de gravitation qu'on cherche à décrire; les modèles doivent donc être suffisamment bons pour séparer les autres sources de perturbation, notamment la résistance atmosphérique et la pression de radiation solaire.

Le nombre de fonctions sphériques, et par conséquent de termes inconnus C_{nm} et S_{nm} est théoriquement illimité. Le nombre d'observations disponibles, la finesse du modèle et le volume admissible des calculs imposent naturellement des limites à ce nombre. On négligera donc les termes dont la contribution est peu nécessaire à une bonne présentation du champ de gravitation. On classe les termes du développement (5) en termes *zonaux, tesseraux* et *sectoriels* (fig. 12).

Les termes zonaux ne dépendent que de la latitude. Ils permettent de représenter le champ de gravitation par une symétrie de révolution et jouent le plus grand rôle dans la description globale de ce champ. Si on ne retient que ces termes zonaux dans l'équation (5), celle-ci se simplifie et devient, avec m = 0

$$V = \frac{K^2M}{r} \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{a}{r}\right)^n C_n \cdot P_n(\cos\theta) \qquad (6)$$

Le coefficient C_2 est le plus important; il fournit l'aplatissement

$\alpha = 1/298.25$

Le coefficient C_3 a joué un rôle historique dans les années soixante, car il rendait compte de la «forme de poire» de la Terre (voir fig. 13). Cette appellation est aujourd'hui dépassée. La connaissance actuelle du géoïde et de ses innombrables irrégularités ne permet plus de la comparer à une forme aussi simple.

Les termes tesseraux dépendent de la longitude et de la latitude; les termes sectoriels ne dépendent que de la longitude. Ces deux catégories de fonctions correspondent à des perturbations de courte période et de faible amplitude; pour les saisir, il faut disposer d'observations si nombreuses et d'une telle précision qu'on a longtemps jugé cette tâche irréalisable. A cela s'ajoute parfois une difficulté: lorsque le rapport entre la vitesse de la Terre et la période de révolution du satellite est proche d'un nombre entier, peuvent survenir des *effets de résonance* se traduisant par des perturbations de longue période et

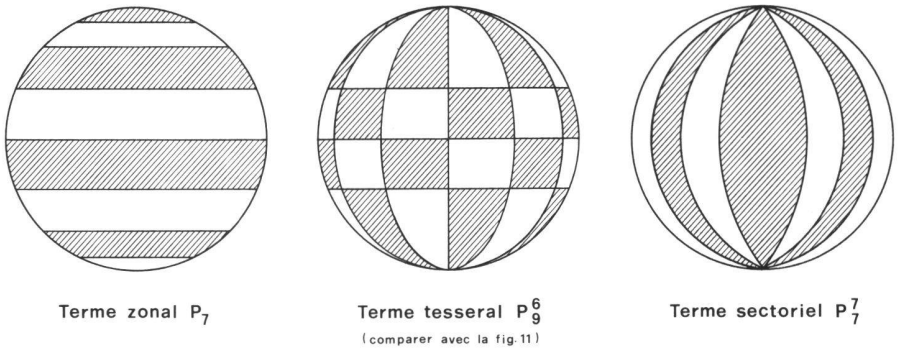

Fig. 12 Illustration des termes zonaux, tesseraux et sectoriels intervenant dans l'expression du champ de pesanteur terrestre

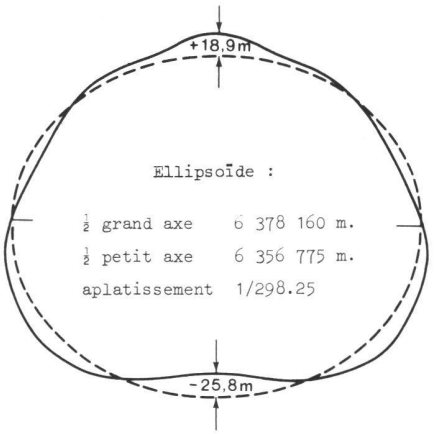

Fig. 13 La «forme de poire» de la Terre. (Coupe méridienne de l'ellipsoïde moyen et du géoïde global)

d'amplitude supérieure à 100 m., de telle sorte que des termes d'un ordre élevé du développement en série jouent encore un rôle important. Ces problèmes sont maintenant bien maîtrisés. De nombreuses équipes ont présenté des résultats largement concordants sous la forme de «modèles standard de la Terre».

L'un des plus récents, appelé GRIM 2, est le fruit d'une collaboration entre chercheurs allemands et français. Calculé sur la base de 200 000 observations de directions et de distances, se rapportant à 21 satellites, et utilisant des valeurs de l'anomalie de la pesanteur pour chaque compartiment de 1° lat. - 1° longitude résultant de travaux antérieurs (mesures gravimétriques au sol), il fournit simultanément

- les coordonnées géocentriques des 38 stations d'observation
- les termes zonaux jusqu'au degré 23; les termes tesseraux complets jusqu'à m = n = 30 (soit au total 485 termes)
- une valeur pour le grand axe de l'ellipsoïde moyen, 100 fois plus précise que celle résultant d'une détermination classique.

La figure 14 donne une représentation du géoïde calculé sur la base de ces résultats. Elle montre les courbes de niveau, d'équidistance 10 m., par rapport à un ellipsoïde de référence. La quantité et la finesse des détails est remarquable, leur exactitude est confirmée par d'autres travaux.

5. En guise de conclusion

L'énumération des possibilités offertes par la géodésie spatiale peut laisser croire que ces nouvelles techniques

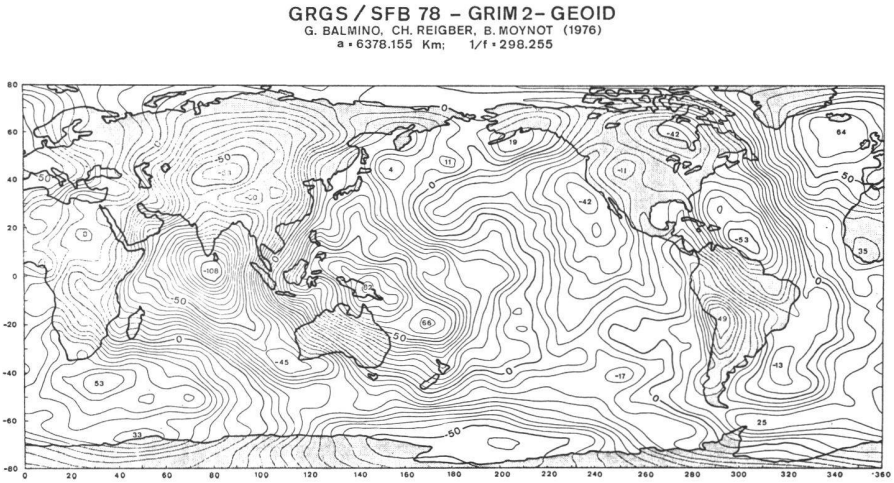

Fig. 14 Le modèle standard de la Terre GRIM-2 réalisé par une équipe de chercheurs franco-allemande

s'imposaient avec évidence. Il n'en est rien. Lorsque pour la première fois, en 1957, des géodésiens proposèrent l'utilisation de satellites, ils furent accueillis avec un immense scepticisme. Par chance, un mois plus tard, Spoutnik I, le premier satellite artificiel, était lancé avec succès. Au cours des vingt années écoulées, grâce au travail long et remarquable d'une foule de chercheurs, ce scepticisme s'est peu à peu effacé devant la moisson extraordinaire des résultats acquis grâce à ces méthodes. A ce jour, environ 8000 satellites de toutes disciplines ont été lancés, et la géodésie spatiale est entrée dans sa phase adulte. Certaines des techniques mentionnées sont peu à peu abandonnées, après avoir joué un grand rôle. D'autres, plus souples et surtout plus précises, comme la méthode de positionnement Doppler, ou la mesure de distances par des lasers de la dernière génération, sont en plein essor.

Qu'a apporté l'ère spatiale au géodésien? Un gain considérable d'informations au cœur même de son métier: une connaissance incomparablement meilleure de la forme de la Terre et de son champ de pesanteur. Il faut d'ailleurs insister sur l'aspect itératif et progressif de l'amélioration des connaissances: de meilleures coordonnées pour les stations d'observation conduisent à une meilleure description des orbites; celles-ci permettent l'élaboration de meilleurs modèles pour la description du champ de pesanteur; un géoïde mieux connu conduit à des coordonnées géocentriques plus précises. Comme on le voit, il s'agit d'une vaste construction où chaque étage s'appuie sur la base solide du précédent. Actuellement, le degré de précision acquis est tel qu'il permet d'envisager la création de modèles pour la description d'une Terre non plus statique, mais dynamique, dont les paramètres évolueraient avec le temps. De tels modèles permettront la prise en considération de phénomènes temporels longtemps négligés, comme le mouvement de l'axe des pôles, les marées terrestres ou les irrégularités de la rotation du globe; ces modèles décrivent encore mieux que les modèles actuels la forme, les dimensions de la Terre et son champ de pesanteur: c'est précisément la tâche du géodésien.

Devant des techniques aussi complexes et, il faut bien le dire, aussi coûteuses, le lecteur ne manquera pas de se demander: A quoi bon? Cette question, propre à tous les domaines de la recherche, n'est plus de nature technique mais politique; quoique difficile et passionnante, elle n'est pas nouvelle. Qui sait si Erathostène ne se la posait pas déjà, 200 ans avant J. C., en déterminant le rayon de la Terre?

Les figures 2, 3, 11, 13 et 14 sont publiées avec l'aimable autorisation du Prof. R. Sigl, Technische Universität München.

Principaux ouvrages et articles consultés

K. Arnold: Methoden der Satellitengeodäsie. Akademie-Verlag, Berlin 1970.
H. Dupraz: Les satellites artificiels et leurs applications. Bulletin technique de la Suisse romande, Nos 4, 8, 11, 13, 26/1978.
J. R. Moyer: The Satellite Doppler Survey System. Seminar on the Doppler System, Buenos Aires 1977, Magnavox Company
H. H. Schmid: Konzeptionelle und fehlertheoretische Betrachtungen zur Erstellung eines geodätischen Weltsystems mit Hilfe der Satellitengeodäsie. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik 4–72.
R. Sigl: Aktuelle Aufgaben der Satellitengeodäsie. Zeitschrift für Vermessung 1/1977.

Adresse de l'auteur:
H. Dupraz, Institut de Géodésie et Mensuration EPFL, CH-1007 Lausanne

Entstehung einer Satellitenbildkarte

K. Seidel, F. Tomamichel, J. Lichtenegger

On décrit un procès technique pour construire avec huit images LANDSAT une carte de la Suisse vue par le satellite. Nous avons à disposition des images venant de quatre jours successifs d'une période de temps très favorable en mars 1976. Des données en forme digitale sur bandes magnétiques on a d'abord reconstruit des images noir et blanc des différentes bandes spectrales. Après les avoir ajuster dans un procès photomécanique, ils sont été masqués et convertis en un seule image de couleur. L'apparence des couleurs a été choisi de telle manière qu'une séparation des catégories agricoles devient optimale. La possibilité de déligner la couverture de neige sur l'ensemble de la Suisse est évidente. On reconnait aussi bien les grandes unités géomorphologiques que des éléments tectoniques (failles); on distingue les forêts, les prés et les pâturage, les régions agricoles et les zones urbaines. Mais l'influence de la topographie et de l'atmosphère rend l'interprétation visuelle plus difficile.

Die Aufnahme vom Raumschiff APOLLO VI aus, welche die Erde als Kugel im dunklen Weltraum deutlich erkennen lässt, ist berühmt und aufregend zugleich. Aufregend wohl deshalb, weil es dem Erlebnis gleichkommt, das der Mensch empfindet, wenn er sich zum ersten Mal bewusst im Spiegel betrachtet.

Des Überblicks wegen ist das Interesse an Luft- und Satellitenbildern ständig im Steigen. Man erwartet, Dinge zu sehen, welche die Zusammenhänge besser verdeutlichen und damit das Verständnis für unsere Umwelt besser ermöglichen.

Luftbilder werden normalerweise aus einem bemannten Flugzeug oder Raumschiff mit einer Kamera auf einen lichtempfindlichen Film «fotografiert». Satellitenbilder hingegen werden aus höheren Distanzen (200 bis 36 000 km) von der Erdoberfläche gewonnen: Mit sehr unterschiedlichen Sensorsystemen wird die von der Erdoberfläche reflektierte und emitierte Strahlung registriert, in elektrische Signale umgewandelt und drahtlos zu einer Bodenempfangsstation übermittelt. Hier wird die übermittelte Information synchron zum Abtastsystem wieder bildmässig rekonstruiert und zur weiteren Interpretation dem Betrachter überlassen.

Bezüglich des Überblicks sind Satellitenbilder normalen Luftbildern überlegen.

Auch dadurch, dass man Satelliten nahezu kontinuierlich «abfragen» kann, sind solche Datenquellen für systematische Untersuchungen sehr gut geeignet.

Für Wetterforschung und -vorhersage verwendet man schon seit 1960 Bilder aus dem Weltraum routinemässig. Nach den Erfahrungen mit den Satelliten der TIROS- und NIMBUS-Reihe werden heute für den täglichen Wetterdienst Bilder von NOAA und METEOSAT herangezogen.

Ziel der Satellitenbildforschung ist die Entwicklung und der Einsatz eines operationellen Überwachungssystems, das