

La géodésie française et mondiale : une évolution considérable en 25 ans

■ Michel KASSER

Les évolutions de la Géodésie ont été considérables durant les dernières décennies, ceci étant essentiellement dû à la possibilité d'utiliser les techniques spatiales dès les années 60. C'est grâce aux progrès de la radio-astronomie géodésique (VLBI), de la télémétrie laser sur satellites, de DORIS et du GPS que la précision de la référence géométrique mondiale a gagné plus qu'un facteur 1000 dans cette période. Et c'est ce qui a permis de définir dans beaucoup de pays, dont la France, une référence géodésique dont l'extraordinaire précision a conduit à un changement complet dans la façon d'utiliser les références, et à une ré-appropriation de ces techniques par les géomètres.

La géodésie : une évolution devenue très rapide

La Géodésie, au sens français du terme, c'est l'étude et mesure des dimensions de la Terre, de sa rotation dans l'espace, et de son champ de pesanteur. Il faut bien différencier ce terme de celui de "Geodesy" en littérature anglophone, terme qui pour beaucoup d'auteurs recouvre presque l'intégralité des techniques de lever. Nuance sérieuse...

C'est une science où la France a toujours été très active, sinon pionnière, avec par exemple la mesure du rayon de la Terre par Picard au XVII^e siècle, la mesure de l'aplatissement de la Terre par Bouguer, La Condamine, Maupertuis, ... au XVIII^e siècle, la mesure d'un arc de méridien pour la définition du mètre par Delambre et Méchain pendant la Révolution Française, etc.

Mais jamais la Géodésie n'a évolué aussi rapidement que dans le dernier quart de siècle, depuis la naissance de l'AFT (y a-t-il un lien ?). Et dans ces évolutions récentes, la France a su tenir une place tout à fait significative.

Quelles évolutions devons nous rappeler ici ? Certaines sont connues de tous, comme le GPS. Certaines devraient l'être, comme les nouvelles références de France (RGF 93), d'Europe (EUREF), et du monde (ITRF). Et certaines par contre sont très peu connues, par exemple les outils de base que sont la radio-astronomie interférométrique géodésique (VLBI), la télémétrie laser sur satellites, DORIS, et les études du champ de pesanteur par méthodes spatiales.

Nous allons donc passer en revue certaines de ces évolutions, d'abord dans certaines techniques de base, puis dans la définition des systèmes de référence. Nous pourrions ainsi en apprécier l'importance majeure.

La radio-astronomie interférométrique géodésique

Cette technique est dénommée par le sigle VLBI (pour *Very Long Baseline Interferometry*), terme d'usage peu explicite mais qui est d'emploi classique chez les géodésiens. Elle exploite la détection du bruit radio (extrêmement faible) émis par des radio-sources extra-galactiques, que l'on peut capter avec de très grandes antennes de radio-astronomie (la plus grande, à Arecibo, est une parabole de près de 300 m de diamètre, et beaucoup d'autres font plus de 50 m). Lorsqu'on corrèle les signaux (bruits électroniques complètement aléatoires) captés dans deux antennes, le retard temporel à apporter à l'un des deux pour que la corrélation cesse d'être à peu près nulle est déterminé par essais autour de la valeur attendue (valeur basée sur la connaissance approchée de la géométrie de la Terre, de sa rotation, de la position des antennes). La VLBI apporte des données essentielles pour l'analyse de nombreux phénomènes :

- Cartographie à très haute résolution des radio-sources observées, ce qui explique l'intérêt des radio-astronomes dans ces opérations,
- Longueur et orientation du vecteur reliant les centres de phase de chaque antenne, et ainsi mesure de la rotation terrestre.

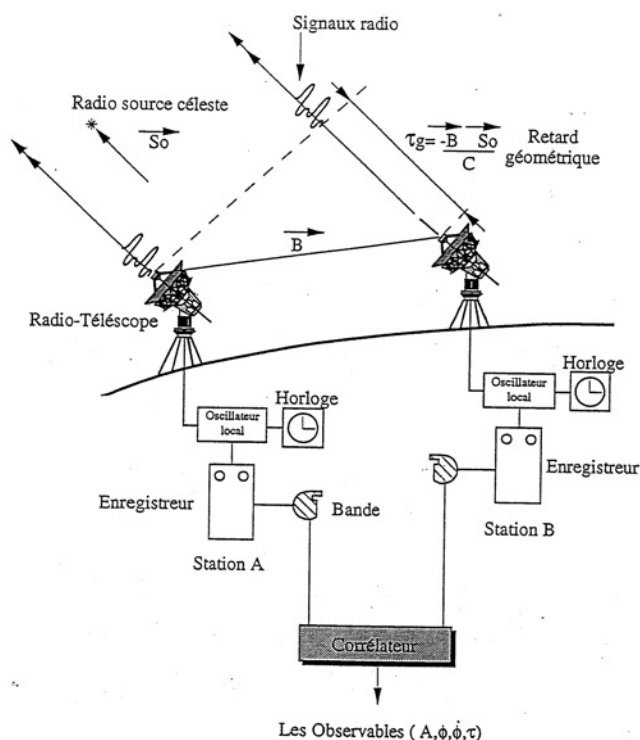
Le géodésien peut donc en tirer un moyen de positionnement, l'ensemble des centres de phase des antennes de VLBI formant un polyèdre extrêmement précis (quelques mm), parfaitement orienté dans l'espace, pour chaque session de 24 heures de mesures. Mais si les observatoires sont très distants les uns des autres (plusieurs milliers de km), ce qui est presque toujours le cas actuellement, il n'est pas question de les relier par un câble pour transférer les signaux et permettre cette corrélation. On procède alors à l'échantillonnage numérique de chaque signal et au stockage sur support magnétique. Idéalement il faudrait échantillonner avec la même horloge, ce qui est là aussi impossible, et en pratique on le fait avec des horloges différentes, mais presque parfaitement synchrones (masers à hydrogène), grâce à leurs extraordinaires stabilités (qui avoisinent 10^{-16} , soit 0.1 cycle en 24 heures à une fréquence de 10 GHz, de sorte que tout se passe comme s'il s'agissait de la même horloge).

Pour le géodésien, le positionnement obtenu ainsi est ce que l'on peut trouver de plus précis : le centimètre à l'échelle de la Terre. La VLBI permet d'obtenir un extraordinaire réseau mondial de référence, certes très onéreux, mais les moyens nécessaires sont partagés avec de nombreux autres scientifiques. De plus, les directions de certaines radio-sources ont été trouvées particulièrement stables : elles définissent le meilleur référentiel d'orientation absolue disponible (précision meilleure que 0.001").

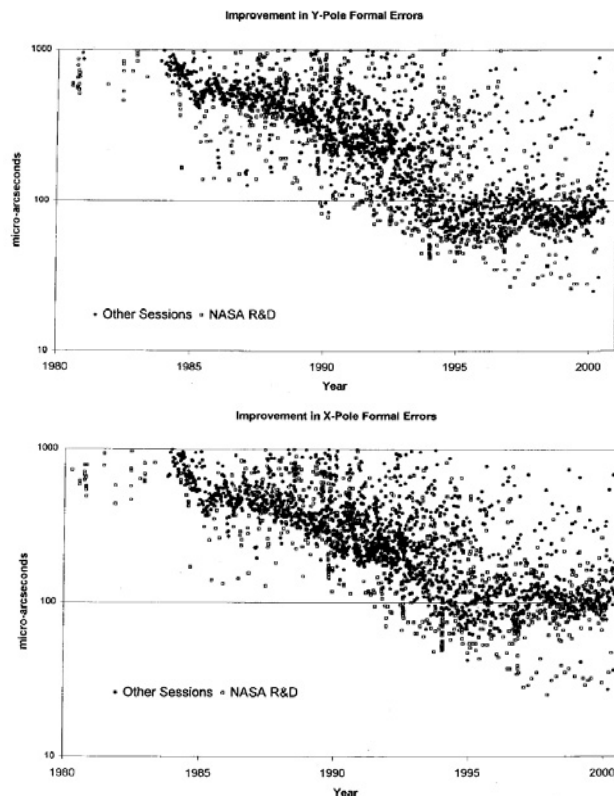
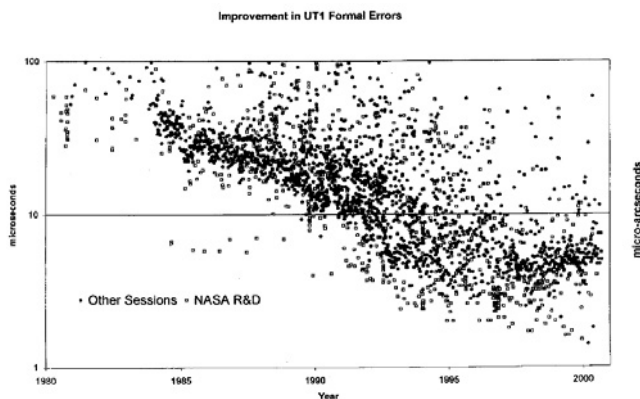


■ ■ ■ Ce développement technologique impressionnant a largement bénéficié des développements de matériels informatiques, car la VLBI exige des stockages de très grandes quantités de données: si les Giga-octets ne nous impressionnent plus maintenant, ce n'était pas le cas dans les années 80, et le plus clair de la dépense pendant longtemps était lié au transport de plusieurs quintaux de bandes magnétiques entre les observatoires et le centre de corrélation pour chaque session. Et c'est la communauté VLBI qui a eu le rôle essentiel dans le développement du GPS précis, en considérant ses signaux cryptés comme des signaux aléatoires et en les traitant comme le bruit issu des radio-sources: ainsi le GPS, système militaire de précision métrique en temps réel, est il devenu aussi un outil capable de donner une mesure différentielle millimétrique en temps différé.

Le principe de la VLBI (N. Rebai, 1990)



Les évolutions temporelles de 3 paramètres déterminés par VLBI dans les dernières années (Temps Universel, qui mesure la rotation de la Terre, X et Y du pôle): la précision de la VLBI est stationnaire depuis 1995, mais à un niveau impressionnant (100 μ s d'arc, soit 3 mm pour le point où l'axe de rotation terrestre mesuré par la surface de la Terre).



La télémétrie laser sur satellites

Ce procédé de géodésie spatiale qui a démarré dans les années 60 mais n'est monté en puissance qu'à la fin des années 70 consiste à mesurer la distance entre une station terrestre donnée et un satellite (artificiel en général, mais la Lune fait aussi partie des cibles utilisées) équipé de rétroreflecteurs, ainsi que l'instant précis où cette distance est obtenue. Les satellites artificiels spécialement lancés pour cette technique (Lageos I et II aux USA, Starlette et Stella en France, Ajisai au Japon, Etalon en Russie,...) sont des sphères très denses à la surface desquelles ont été fixés les réflecteurs, et ils sont entièrement passifs; leur grande compacité fait que leur trajectoire est liée presque uniquement aux forces gravitationnelles (il y a toujours d'autres forces comme la pression de radiation ou la traînée atmosphérique liée aux rares molécules encore présentes sur ces orbites, mais elles ont peu d'effets sur ces satellites très compacts). Donc même avec des mesures sur seulement certains arcs de trajectoire (il n'y a qu'une trentaine de stations laser dans le monde, réparties de manière très inhomogène), il est possible de calculer une orbite extrêmement précise. De ces orbites, on peut déduire des éléments importants pour le calcul du champ de pesanteur terrestre (toute irrégularité de trajectoire est un indice d'anomalie locale de la gravité), pour la mesure de la rotation terrestre, et enfin un excellent positionnement mondial des stations laser (1 à 2 cm environ), formant ainsi un autre polyèdre extrêmement précis, dont toutefois la référence n'est pas un ensemble d'étoiles fixes, mais le centre de gravité de la Terre. Si la VLBI a été pratiquée sous forme de stations mobiles, mais de manière peu courante à cause de la taille de l'antenne requise, la télémétrie laser s'est beaucoup pratiquée dans des stations relativement faciles à déplacer (2 camions). Toutefois dans ce domaine, c'est la France qui a réalisé la percée la plus audacieuse, avec la station laser "ultra-mobile" (300 kg en 10 colis),

conçue par l'OCA et l'IGN dans les années 90 avec le soutien du CNES et de l'INSU. Cette station, de loin la plus compacte jamais développée, est de ce seul fait d'un coût de fonctionnement bien plus réduit que les autres stations mobiles, ce qui a permis de l'installer dans des zones particulièrement mal accessibles (sites choisis pour étalonner les radars des satellites océanographiques Topex-Poseidon et Jason).

La technique laser, qui est très peu limitée par notre habituelle méconnaissance de l'indice de réfraction de l'atmosphère, souffre de la mauvaise répartition géographique des stations actuelles (p. ex. impossibilité de mesurer lorsqu'il y a des nuages), ainsi que de divers biais instrumentaux très difficiles à supprimer au niveau de chaque station terrestre.



Un satellite laser classique : Lageos 1.

La télémétrie laser sur la Lune est quant à elle une technique privilégiée pour améliorer notre connaissance sur la gravitation



Les trois stations laser de Grasse tirant simultanément : Laser Lune, Laser satellite fixe et laser mobile

et pour tester au mieux des théories générales comme celle de la relativité. Mais elle exige de véritables prouesses techniques, compte tenu du nombre très réduit de photons utiles récupérés à chaque tir : en ce domaine aussi la France occupe une place centrale, la station Laser Lune de l'OCA à Grasse est la station la plus performante du réseau mondial depuis plus de quinze ans.

Un autre système capital de la géodésie spatiale actuelle : DORIS

Pour mener à bien les missions de radar océanographique (Topex-Poseidon, Jason,...) qui exigeaient une mesure extrêmement précise d'orbites, le CNES a été à l'origine d'un nouveau système spatial original, baptisé DORIS, et dont le réseau au sol a été déployé à la fin des années 90, et entretenu depuis lors, par l'IGN. Une cinquantaine de points répartis aussi uniformément que possible à la surface du globe ont été équipés de balises émettant sur deux fréquences extrêmement stables (400 MHz et 2GHz). Certaines stations sont communes avec des stations de GPS, de télémétrie laser satellites ou des stations VLBI et ont ainsi des coordonnées mondiales très précises. A bord d'un satellite est embarqué un récepteur qui mesure, pour chaque balise émettrice, l'effet Doppler sous lequel le signal est reçu et donc la vitesse relative apparente (les premiers satellites équipés ont été SPOT II, puis TOPEX-POSEIDON, puis SPOT III et IV, puis Jason, Envisat, SPOTV, ...). Après les calculs effectués par le CNES, on en déduit l'orbite du satellite porteur avec une excellente précision (pour 10 cm prévus, on atteint actuellement 1 à 2 cm), et en sous-produit, on peut améliorer considérablement notre connaissance du champ de pesanteur terrestre grâce à l'extrême qualité des orbites obtenues. Second sous-produit appréciable, un positionnement absolu des balises à mieux que 2 cm est obtenu sur l'ensemble du réseau. Le polyèdre actuellement obtenu, avec ses 54 sommets répartis de façon très régulière, entre désormais dans le calcul global de la référence terrestre ITRF dont nous parlerons plus loin.



La station Laser Ultra Mobile, la plus petite du monde, sur le site d'Ajaccio en 2000.

Le GPS

C'est le système le mieux connu, et il n'est pas utile de le détailler ici une fois de plus. Mais rappelons quand même les épisodes importants de son histoire : lancements des premiers satellites, idée issue des spécialistes de VLBI de procéder à des mesures sur la phase des signaux émis (années 80). Constellation opérationnelle au début des années 90, avec un important retard dû à l'accident de la navette Challenger en 86, importants développements industriels permettant l'emploi du GPS par les géodésiens puis par les géomètres, regroupement des efforts des observatoires géodésiques entretenant des stations GPS permanentes du monde entier pour former l'IGS, en 1992. Depuis lors, efforts progressifs de mutualisation des agences géographiques nationales pour mettre à disposition des usagers des

stations GPS permanentes, efforts plus ou moins rapides suivant les pays. Des tentatives pour intégrer le système russe Glonass ont été menées, mais elles ont été freinées par le faible développement de l'ensemble de satellites (10 au lieu de 24). Une avancée significative est par contre prévue pour 2008 avec le lancement de Galileo et ses 30 satellites, ce qui améliorera beaucoup de travail des topographes dans les zones urbaines. Le GPS a surtout été, pour les géodésiens puis pour les géomètres, le premier système de mesure purement géométrique (aucune référence à la verticale p. ex.), avec un modèle d'erreur à caractère mondial et non pas local. En outre, il est apparu alors comme un procédé beaucoup moins cher pour obtenir des points de référence que les méthodes de triangulation classiques, ce qui a rapidement rendu son emploi incontournable. En ce qui concerne les modèles d'erreurs, il faut surtout noter

L'ensemble des 54 stations DORIS actuelles : on notera leur répartition particulièrement régulière.

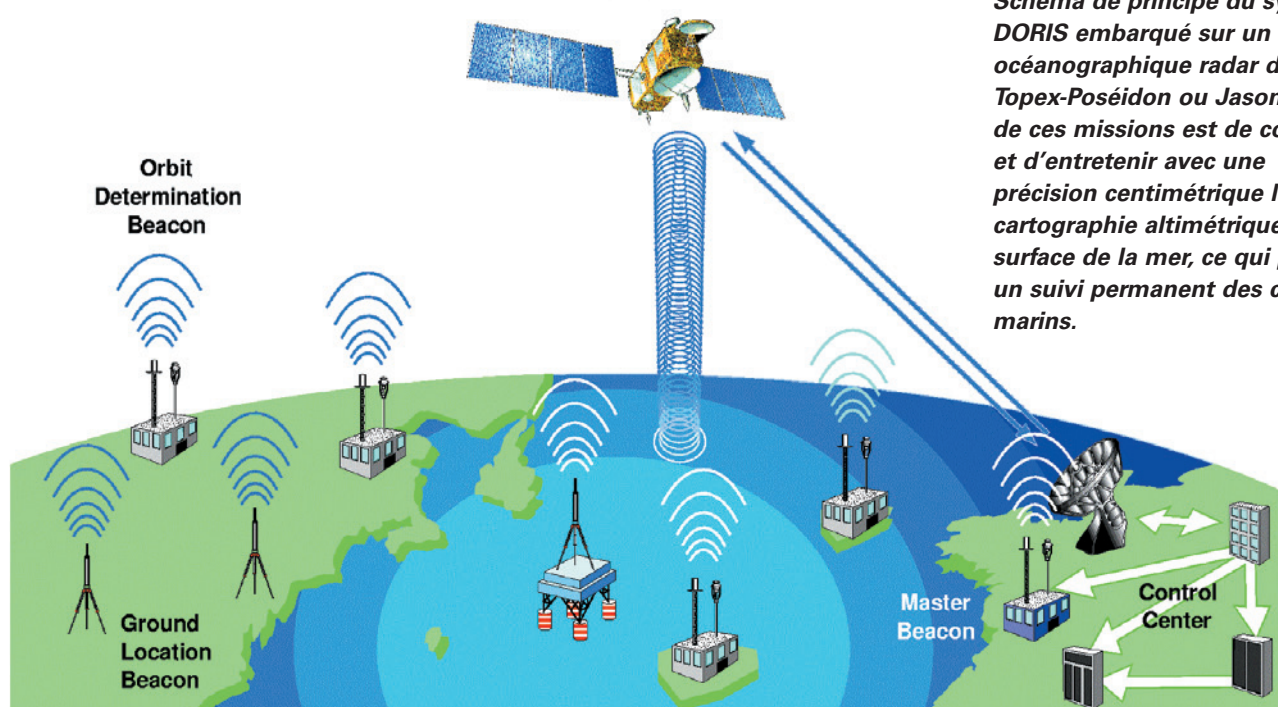
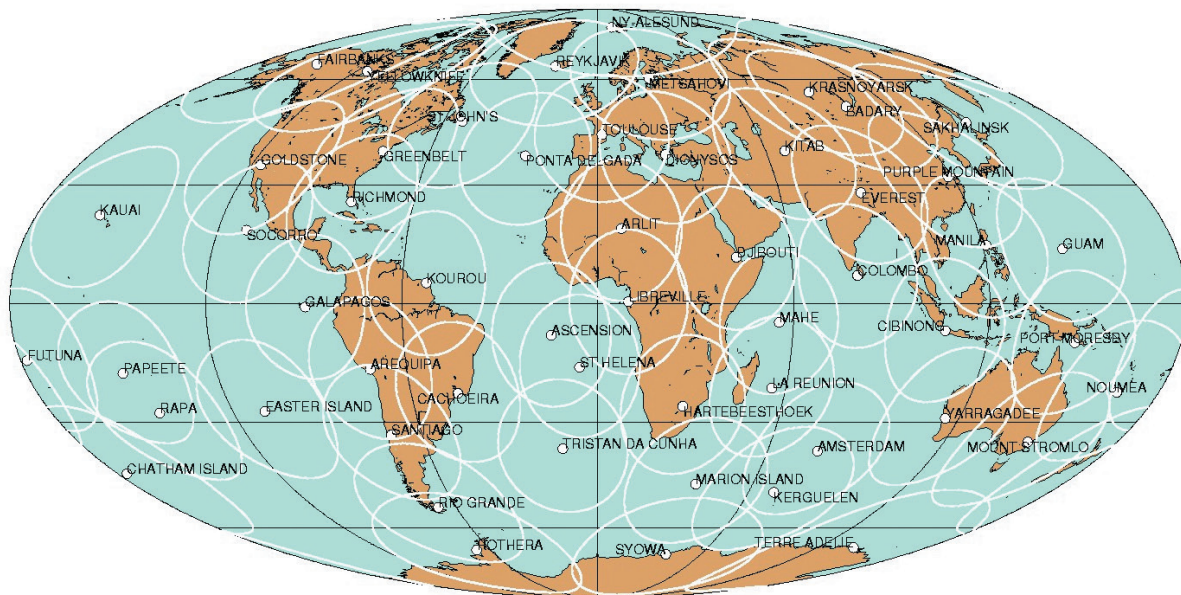
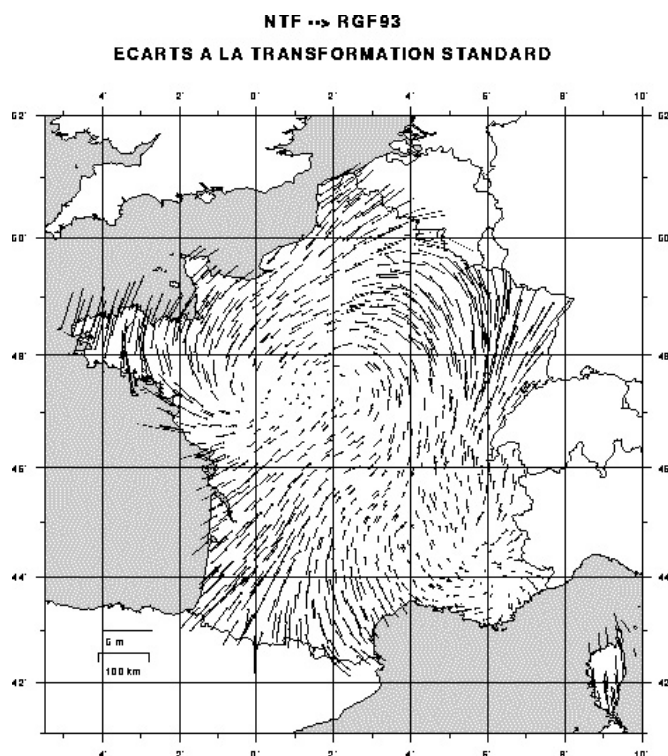


Schéma de principe du système DORIS embarqué sur un satellite océanographique radar de type Topex-Poséidon ou Jason. Le but de ces missions est de connaître et d'entretenir avec une précision centimétrique la cartographie altimétrique de la surface de la mer, ce qui permet un suivi permanent des courants marins.

que les géodésies anciennes (triangulations) étaient dotées d'erreurs relatives acceptables (quoique bien évidemment assez importantes), mais d'erreurs absolues considérables, alors que le GPS a été le premier système opérationnel caractérisé par une erreur absolue, et suivant le type de mesures pratiquées, cette erreur peut-être extrêmement faible (par exemple mieux que 1 cm pour des stations GPS permanentes).

Pendant des siècles et jusqu'aux années 90, les réseaux géodésiques nationaux étaient obtenus par triangulation, avec des mises à l'échelle et des orientations assez difficiles puisque les mesures de distances n'ont pu être effectuées facilement sur grandes distances que depuis les années 70 et que les orientations mettaient en œuvre des mesures astronomiques longues et délicates. De plus les calculs ont dû se faire par blocs plus ou moins grands, selon les moyens de calculs disponibles. L'histoire de la conception globale d'un réseau impliquait, par suite des imperfections des procédés employés et des limitations inhérentes aux anciens moyens de calcul "à la main", des modèles d'erreurs très complexes. Typiquement les coordonnées diffusées en France pour la NTF s'écartaient des valeurs exactes (que l'on aurait obtenues si tout avait été parfait) de grandeurs d'autant plus élevées que l'on s'éloignait de Paris (où était situé le point de référence, le Panthéon), et pouvant atteindre quelques mètres aux extrémités de la métropole. Le référentiel faisant foi n'était donc pas le référentiel théorique, mais celui réellement disponible au travers des bornes observées et de leurs coordonnées publiées. D'où des difficultés sans

Cette figure, qui montre les erreurs observées sur environ 1000 points géodésiques de l'ancienne triangulation NTF, mesurées dans les années 90 par GPS, illustre bien les problèmes rencontrés lorsqu'on passe d'une référence ancienne avec une géodésie moderne, où les erreurs sont presque partout indétectables (1 à 2 cm)



fin lorsque ces bornes étaient détruites et reconstruites, rien ne permettant de garantir que la re-détermination aurait les mêmes erreurs que la détermination ancienne. On a coutume de présenter les modèles d'erreurs de la NTF sous la forme "1 cm/km", erreur purement relative, sans trop évoquer l'erreur absolue (pouvant donc atteindre plusieurs mètres) sur les coordonnées publiées. Ceci avec une excellente excuse: personne ou peu s'en faut ne s'intéressait à des coordonnées absolues fausses de 5 m à Marseille, mais tous étaient concernés par l'erreur relative entre deux points proches, ici inférieure à 5 cm entre deux points éloignés de 5 km et qui a été jugée tout à fait supportable jusque dans les années 80. (fiche CNIGN° 49).

Le WGS 84 et le référentiel mondial de géodésie ITRF

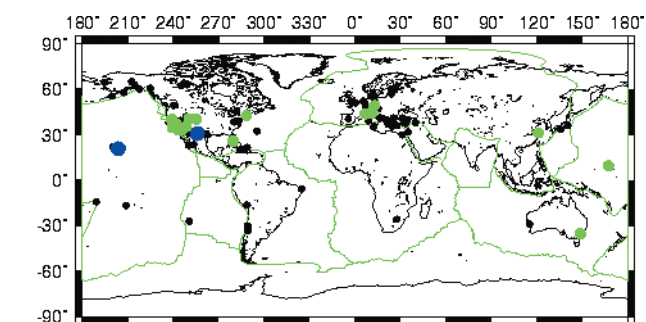
Avec un système purement géométrique et de couverture mondiale, on avait tout intérêt à mettre en place un référentiel unique pour toute la planète. C'est ce qui s'est fait, par étapes, dès la fin des années soixante, le gros du travail ayant réellement commencé dans les années 80, et il s'agit là sans doute de l'avancée la plus importante qui ait été menée dans l'histoire de la géodésie. Actuellement, le référentiel mondial est réalisé et entretenu par un groupe de laboratoires dont l'IGN (laboratoire LAREG) effectue par délégation la synthèse des résultats et publie ainsi la solution officielle (actuellement ITRF 2000). Conceptuellement, sa réalisation peut être décrite sommairement ainsi, même si la logique de calcul est en fait plus complexe :

- Les observations de VLBI permettent de créer géométriquement un polyèdre d'antennes réparties dans le monde entier. On en tire d'une part les paramètres décrivant la rotation de la Terre, et d'autre part un jeu de coordonnées formant l'ossature du réseau mondial.
- A proximité de ces antennes sont installés d'autres dispositifs de géodésie spatiale (télémétrie laser sur satellites, GPS, GLONASS, DORIS,...) permettant d'employer les positions d'antennes VLBI pour en déduire avec précision les orbites des satellites employés, et ainsi de déterminer les coordonnées des autres stations observant ces mêmes satellites : une densification considérable est ainsi obtenue, passant de quelques dizaines de stations VLBI à plusieurs centaines de nouveaux points.
- On intègre à ce stade les déformations connues de la Terre (cycles quotidiens des marées terrestres, tectonique des plaques), on peut alors en déduire les coordonnées mondiales et les vitesses des stations (dues aux déformations tectoniques). On forme ainsi ce qu'on appelle l'ITRF (International Terrestrial Reference Frame) et chaque référentiel national, matérialisé par quelques stations fondamentales (télémétrie laser sur satellites, stations GPS permanentes,...). C'est ce système de coordonnées qui est mis à disposition sous le nom de WGS 84 (World Geodetic System 84), en particulier pour les usagers du GPS. Evidemment, comme le GPS est purement géométrique, il convient de spécifier aussi l'emploi d'un ellipsoïde de référence, qui peut être choisi librement certes, mais qui est généralement toujours le même, le GRS 80. La référence Européenne EUREF est extraite de l'ITRF en

■ soustrayant pour l'ensemble des stations les vitesses moyennes: ces vitesses sont pratiquement toutes égales puisque l'Europe forme une seule plaque tectonique. On obtient ainsi des coordonnées fixes pour les stations d'Europe, et c'est sur cette référence qu'on définit les références modernes de tous les pays: en France on obtient ainsi le RGF 93, devenu officiel en 2001.

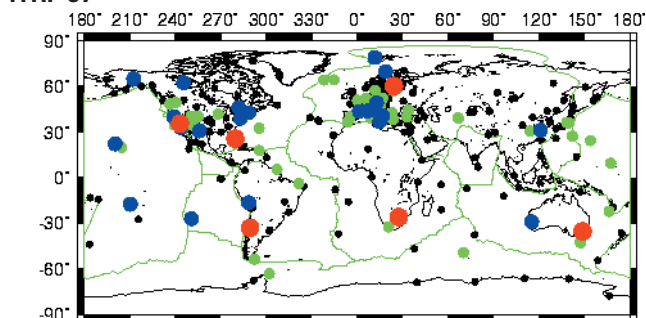
L'évolution des ensembles d'observatoires géodésiques employés pour calculer la référence mondiale depuis 1988. Le nombre a augmenté considérablement, la précision aussi, la référence mondiale actuelle atteint ainsi une précision du centimètre.

ITRF 88



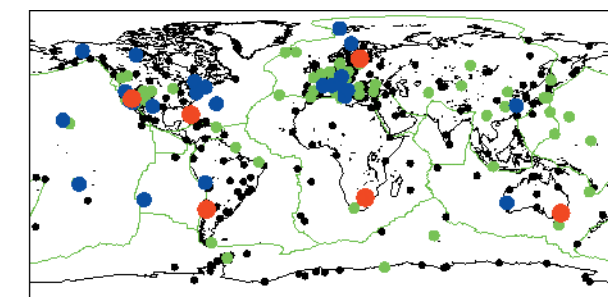
Collocated techniques --> 20 2

ITRF 97



Collocated techniques --> 49 24 6

ITRF 2000



Collocated techniques --> 64 24 6

En un quart de siècle la géodésie a complètement changé. Nous avons rappelé ici certaines des avancées majeures, qui pour l'essentiel ont été obtenues grâce aux efforts consentis dans le domaine spatial: actuellement, la géodésie moderne repose entièrement sur des outils spatiaux, et c'est sans doute

là qu'est l'origine de la poursuite d'une forte implication française en géodésie, structurée autour de Groupe de Recherches en Géodésie Spatiale (le GRGS, dont le CNES est un acteur essentiel). De nombreux autres aspects n'ont pas été présentés ici, par souci de concision (p. ex. les travaux remarquables menés par les français et les allemands dans le domaine du champ de pesanteur par méthodes spatiales), mais les points essentiels sont les suivants:

- la géodésie est définitivement spatiale, et donc mondiale,
- elle a progressé énormément en précision, mais il est probable que ce progrès va ralentir, voire s'arrêter (si le sens physique d'un centimètre sur le terrain est clair moyennant quelques précautions, celui du millimètre peut-il encore l'être?),
- la géodésie n'est plus un domaine réservé pour quelques rares spécialistes très pointus, mais pas toujours très convaincants dans leurs explications adressées aux usagers peu avertis. Avec le GPS elle est devenue à la portée de tous, et corrélativement elle devra être maîtrisée de tous les topographes. Elle devra donc être bien mieux connue que par le passé, et un gros effort de publication doit être mené: l'emploi de stations GPS permanentes (le RGP de l'IGN, le futur réseau de l'OGE, etc...), l'arrêt du 16-9-2003 sur les précisions des levés, l'adoption du RGF 93 comme référence géodésique officielle, l'emploi du GPS en matière de nivellement grâce à la grille de correction altimétrique très précise RAF 98, en particulier pour l'entretien du NGF, etc... conduisent de plus en plus les topographes d'aujourd'hui à ne plus pouvoir s'offrir le luxe de "n'y rien comprendre".

L'AFT a accompagné durant toute son existence cet effort soutenu de communication et d'explications sur ces sujets, manifestement pas toujours clairs pour tous. S'appuyant sur ses adhérents, elle poursuivra cet effort, car la géodésie et la topométrie sont de plus en plus fortement imbriquées, et tout laisse à penser que cette situation va perdurer. Bientôt tous géodésiens ! ●

Contact

Michel KASSER, Directeur de l'ENSG de l'IGN, Directeur Exécutif du GRGS, Président de l'AFT.

6 - 8 avenue Blaise Pascal, Cite Descartes, Champs-sur-Marne
F 77 455 MARNE LA VALLEE CEDEX 2 - FRANCE

Téléphone: +331 6415 3100, Télécopie: +331 6415 3107

Courriel: michel.kasser@ign.fr

ABSTRACT

The evolutions of the Geodesy have been considerable during the last decades, this being mainly due to the accessibility of space techniques since the sixties. The fantastic improvements of VLBI geodetic radio-astronomy, satellite laser ranging, DORIS and GPS have allowed an improvement of more than three orders of magnitude in the precision. This has led to a complete change in the way of use of the references, thanks to the definitions of the extremely precise new geodetic reference frames in most countries. And thus most surveyors have re-appropriated these techniques for their everyday work.