

LES POSSIBILITES ACTUELLES DE POSITIONNEMENT PAR LES TECHNIQUES SPATIALES ET LE PROGRAMME DE L'OBSERVATOIRE ROYAL DE BELGIQUE

P. PAQUET

(1 figure et 3 tableaux)

RESUME.- Depuis 1972, l'Observatoire Royal de Belgique est engagé dans un programme de géodésie spatiale visant à déterminer les paramètres de la rotation de la Terre et le positionnement de sites terrestres dans un repère lié au centre de la Terre. Par rapport au centre de masse de la Terre, les coordonnées tridimensionnelles sont déterminées avec une précision voisine de 10 à 20 cm; les positions relatives de deux sites terrestres étant déterminées avec une précision du même ordre de grandeur, quelle que soit la distance, cette approche offre un intérêt limité en géodynamique «régionale».

Depuis 1983, un nouvel ensemble de satellites qui constitueront le Global Positioning System (GPS) se met en place; dans sa phase finale prévue pour les années 1991-1992, il sera composé d'un ensemble de 18 satellites au moins.

Des expériences menées depuis plusieurs années montrent que des précisions de l'ordre du centimètre sont obtenues d'une manière courante sur des distances allant jusqu'à 30 km. Au delà, la précision se dégrade rapidement à cause des perturbations ionosphériques et de la précision insuffisante de l'orbite; cependant une adaptation récente des récepteurs permet d'envisager d'étendre cette précision à quelques 10^{-8} , soit un centimètre à 1000 km.

L'Observatoire Royal de Belgique vient d'acquérir deux de ces récepteurs avec, dans une première phase, les objectifs suivants :

- intégration du point fondamental du réseau géodésique belge dans les réseaux internationaux;
- mise au point et contrôle systématique d'une base de calibration entre deux sites belges;
- participation à des programmes de géophysique dont la localisation à des intervalles de temps réguliers des stations du réseau sismologique et d'une quinzaine de stations du réseau gravimétrique de premier ordre.

ABSTRACT.- Since 1972, the Royal Observatory of Belgium is involved in a space geodetic programme aiming to determine the Earth Rotation parameters and the geocentric coordinates of terrestrial sites. With respect to the center of mass of the Earth, the cartesian coordinates are currently determined with a precision close to 10 to 20 cm; between terrestrial sites this method does not improve the precision of relative positioning and is more or less not useful for geodynamics studies on regional scales.

Since 1983, new satellites are progressively launched and will form the Global Positioning System (GPS); in its final issue, expected for 1991-1992, it will be composed of at least 18 satellites.

Since several years, experiences demonstrate the capability of this new system to obtain precision close to the centimeter level over distances extended till 30 km. For larger distances, the precision decreases as a consequence of the perturbations of the ionosphere on the radio signal propagation and the lack of accuracy of the orbit determination; however recent technological improvements of the ground receivers let believe that a precision of few units of 10^{-8} are obtainable; it means one centimeter over 1000 km.

The Royal Observatory of Belgium has just acquired two receivers with, in a first phase, the following objectives :

- integration of the fundamental belgian geodetic mark in the international networks;
- between two belgian sites development of a calibration basis with systematic measurements between the two stations;
- participation to geophysical programmes such as regular controls of seismological stations and first order gravimetric network.

I.- INTRODUCTION

Au cours des deux dernières décennies l'astronomie et la géodésie spatiale ont mis au point de nouvelles méthodes d'observation dont les précisions sur le positionnement de sites terrestres permettent dès à présent de considérer comme réaliste, la contribution de ces sciences à l'étude des déformations locales de la croûte terrestre.

Le premier objectif de définir et de maintenir des repères de référence terrestres et célestes est atteint. Le repère céleste n'est plus celui de l'astronomie classique réalisé par des étoiles proches observées par des méthodes optiques, mais il est constitué par des radio-sources stellaires ou quasars qui sont les objets les plus éloignés de notre Univers; leurs mouvements propres sont jusqu'à présent imperceptibles. Par rapport à ces balises, localisées par des radiotélescopes, l'état de rotation de la Terre est mesuré à quelques centimètres près. Les instruments sont organisés en interféromètres dont les bases sont de plusieurs milliers de kilomètres; cette méthode d'observation est connue sous le nom d'interférométrie à longue base ou Very Long Base Interferometry (VLBI).

Comme référentiel, la géodésie utilise les orbites de la Lune ou de satellites artificiels dont les meilleures positions sont obtenues par la mesure des distances aux stations terrestres par des tirs LASER; on désigne ces expériences par Lunar LASER Ranging (LLR) et Satellite LASER Ranging (SLR). Sur des intervalles de temps de quelques mois, cette dernière méthode (SLR) est quasi équivalente au VLBI; il en est de même du LLR qui souffre cependant de la difficulté technique de l'expérience que 3 ou 4 stations seulement sont à même de mener à bien. Les stations d'interférométrie et LASER, réparties sur le globe terrestre, définissent le repère terrestre avec une précision de l'ordre de 10cm.

D'autre part, depuis quelques années les Etats-Unis mettent en place un ensemble de 18 satellites émettant des signaux radio-électriques. Leur objectif est de fournir un réseau spatial de référence tel qu'en tout point de la Terre au moins

quatre satellites soient continuellement visibles; il devient ainsi possible de déterminer, quasi instantanément et à quelques dizaines de mètres près, les coordonnées de n'importe quel point de la Terre dans un repère terrestre géocentrique. Sous cet aspect c'est essentiellement un outil de navigation qui est connu sous le nom de Global Positioning System (GPS).

Son avantage apparaît cependant par la détermination des coordonnées relatives pour lesquelles des précisions de l'ordre du centimètre sont déjà accessibles; le GPS ouvre ainsi la porte à de très nombreuses applications dont beaucoup restent encore à découvrir; en géophysique, elles concernent certainement le contrôle des déformations temporelles de la croûte terrestre sur des distances allant de quelques à plusieurs milliers de kilomètres.

II.- CONNAISSANCE GLOBALE DE LA TERRE

A. ETAT DE ROTATION DE LA TERRE

L'origine du vecteur représentant la rotation de la Terre étant située au centre de masse de la Terre, son orientation est donnée par les deux coordonnées de son point de percée dans le plan tangent à la Terre, mené au voisinage du pôle Nord; l'axe de rotation se déplace dans la Terre elle-même et donne lieu au mouvement du pôle reconnu depuis la fin du siècle dernier. Son amplitude totale est de l'ordre de 20 mètre; il est composé de deux périodes fondamentales, l'une annuelle et l'autre de 435 jours.

C'est un mouvement très complexe que la théorie ne permet de prévoir que d'une manière très approximative; force est donc de recourir à des observations pour localiser le pôle Nord instantané.

Comme on le constate d'après la figure 1, de 1967 à 1987, la précision a été améliorée d'un facteur 10 et le pôle Nord est actuellement localisé à quelques centimètres près à raison d'une localisation tous les 5 jours.

En outre, la rotation propre de la Terre fluctue avec des périodes allant de quelques heures à

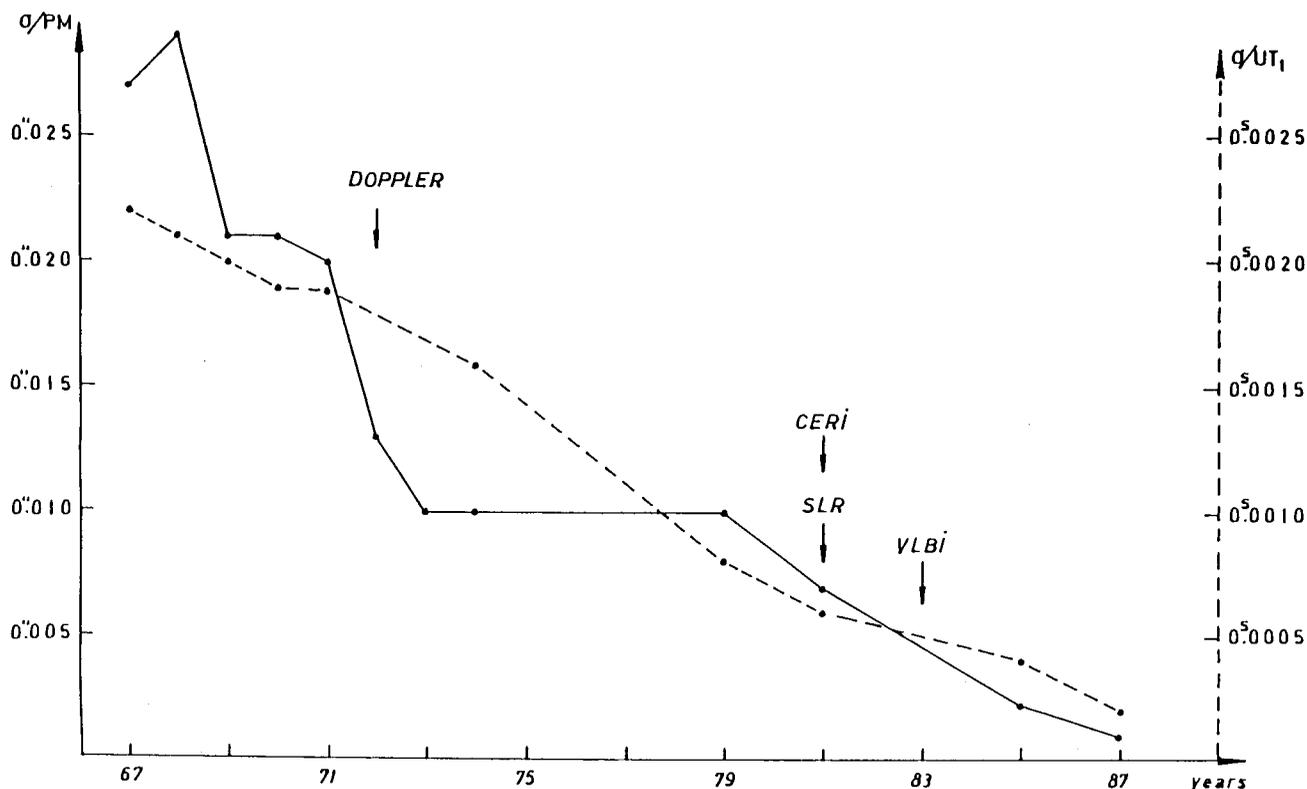


Figure 1.- Evolution de la précision de localisation du pôle nord instantané (axe vertical gauche noté PM) et de l'état de rotation de la Terre (axe vertical droit noté UT₁). L'axe des abscisses indique les années.

plusieurs dizaines d'années; ici aussi la théorie est insuffisante et seules des observations permettent de les estimer correctement. La figure 1 indique aussi une amélioration des précisions d'un facteur 10, progrès réalisé grâce à l'apport des techniques interférométriques et LASER. Dans un repère inertiel l'état de rotation de la Terre est donc connu à mieux de 10 centimètres près.

B. LA DERIVE DES CONTINENTS

Ce qui frappera sans doute davantage le géologue est la mise en évidence, sur quelques années, du déplacement des continents détectés par le mouvement relatif des stations composant les réseaux VLBI et LASER.

Sur base des données géologiques, Minster & Jordan (1978) ont développé un modèle du mouvement des plaques continentales; les vitesses estimées sont donc une moyenne sur des intervalles de 2 à 3 millions d'années.

D'autre part, par référence à l'orbite d'un satellite artificiel (LAGEOS) spécialement conçu pour la géodynamique, la détermination répétée des distances entre les stations du réseau a permis de mettre en évidence leur variation. Le tableau 1 résume les résultats obtenus tant par la méthode basée sur les événements géologiques que celle mise en oeuvre par la géodésie spatiale.

Tableau 1.

Vitesse de dérive des plaques continentales déduites des données géologiques et des mesures LASER (Christodoulis *et al.*, 1984)

Plaques	Moyenne selon Minster et Jordan en cm/an	SLR, moyenne en cm/an	Erreur en cm/an	Nombre de lignes de base
Amérique du Nord vers				
Australie	-2.5	-1.8	0.4	14
Pacifique	1.5	1.0	0.9	5
Amérique du Sud	-0.8	-0.8	0.6	7
Australie vers				
Pacifique	-6.0	-4.6	0.9	4
Amérique du Sud	2.0	2.8	0.8	2
Pacifique vers				
Amérique du Sud	4.6	-0.5	1.2	2
Amérique du Nord	0.0	0.9	0.8	9
Australie	0.0	-2.4	2.1	1

On note l'accord remarquable entre les deux approches; la plupart des mouvements sont significatifs sauf lorsque le nombre de stations, représenté par le nombre de lignes de base, est réduit à 2 ou 3 unités.

Ces méthodes VLBI et LASER ne sont cependant pas facilement utilisables sur des courtes distances parce que les équipements sont coûteux et lourds à mettre en oeuvre. Il faut cependant savoir que des expériences régionales sont régulièrement effectuées dans les zones sismiques de la Californie et du bassin méditerranéen.

III. LE GLOBAL POSITIONING SYSTEM POUR LA GEODESIE REGIONALE

A. LES AVANTAGES DU GPS PAR RAPPORT AU LASER

Comme on vient de l'indiquer, les stations VLBI et LASER ne sont guère utilisables en vue de la densification d'un réseau géodésique; ainsi pour l'étude des déformations des régions méditerranéennes une dizaine de stations auront été occupées par des équipements LASER deux fois au cours d'une période de 3 ans. Par rapport aux équipements LASER, outre l'avantage d'être opérationnel quelle que soit la météorologie, un récepteur GPS est facilement transportable, son installation peut être effectuée en moins d'une heure et il opère automatiquement. De plus les stations LASER ne disposent actuellement que d'un seul satellite et pour atteindre une précision voisine du centimètre, elles doivent séjourner quelques semaines au même site; par contre avec le GPS, en tout point de la Terre, quatre satellites seront visibles en permanence. Cette situation est attendue pour les années 1991 ou 1992; actuellement cinq satellites seulement sont en orbite, ce qui réduit les possibilités d'observation à quelques heures mais permet cependant de tester le système et de vérifier les précisions attendues.

B. PRECISIONS DU GPS SUR DE COURTES DISTANCES

Dès 1983, les premiers résultats de positionnement relatif obtenus par le US Federal Geodetic Control Committee (FGCC) démontraient l'extraordinaire potentiel du GPS. Sur un réseau test où les longueurs varient de 8,7 à 42,1 km, les différences entre les mesures classiques et GPS (tabl. 2) étaient de l'ordre de 1 à 3 cm (Bossler, 1983).

Il n'était cependant guère possible d'assurer cette précision au-delà de 20 ou 30 km; la raison est facile à comprendre.

Pour déterminer des positions relatives, les stations doivent observer les mêmes satellites aux mêmes instants. Au cours de leur trajet vers les sites terrestres, les signaux émis par les satellites sont perturbés lors de la traversée de l'ionosphère et de la troposphère; quand les stations sont proches, les zones atmosphériques traversées sont quasi identiques et donc les perturbations le sont aussi.

Or, pour déterminer des positions relatives on est amené à calculer la différence entre les quantités observées; de ce fait, les perturbations s'éliminent et ceci d'autant mieux que les stations sont proches l'une de l'autre.

Tableau 2. Tests effectués par le FGCC
Comparaisons de la longueur des bases mesurées par
les méthodes classiques et GPS

Date de l'observation	Stations de	à	Longueur km	Différences (cm) Terrestre - GPS
1-19-83	7	6	12.8	-0.8
	7	5	18.5	-0.1
	5	6	8.7	0.6
1-20-83	7	8	42.1	2.1
	7	5	18.5	0.0
	5	8	34.6	-1.7
1-21-83	7	8	42.1	2.7
	7	5	18.5	-0.4
	5	8	34.6	1.0

Tableau 3
Comparaisons de distances mesurées par les méthodes
LASER ou VLBI et GPS (Breuer *et al.*, 1988)

(a) VLBI - GPS

- EFFELSBURG - WETTZEHL - ONSALA

- distances de 450 à 920 Km

. Ephéméride transmise, accord 2.3×10^{-7}

. Ephéméride améliorée, accord 1.8×10^{-8}

(b) LASER - GPS

- WETTZEHL - GRAZ - ZIMMERWALD

- distances de 300 à 600 Km

- Résultats

. Ephéméride transmise, accord 1.9×10^{-7}

. Ephéméride améliorée, accord 1.4×10^{-8}

Cependant, depuis 1988, les récepteurs sont capables d'utiliser les deux fréquences émises par chaque satellite alors que, généralement, les premiers équipements n'en observaient qu'une seule; cette situation était d'ailleurs parfaitement valable pour des travaux classiques de géodésie dont la longueur des lignes de base n'excédait pas 20 ou 30 km. Pour de plus grandes distances il y a intérêt à utiliser les nouveaux récepteurs bi-fréquences car la contribution de la perturbation ionosphérique peut être corrigée selon l'état réel de l'ionosphère et non plus selon un modèle.

Notons au passage que le bruit du récepteur, estimé d'après l'écart des résultats de mesure d'une base de longueur nulle, est de l'ordre de 1.5 millimètres.

C. PRECISION DU GPS SUR DE GRANDES BASES

De nombreux tests sont effectués depuis quelques mois mais peu de résultats sont déjà disponibles. Ci-dessous on notera cependant que des précisions de l'ordre de 10^{-7} à 10^{-8} sont accessibles sur des distances allant, selon les expériences actuelles, jusqu'à 1000 km. Les

résultats du tableau 3 (Breuer *et al.*, 1988) sont obtenus par des équipements GPS qui ont occupé les sites permanents de trois stations VLBI et de trois stations LASER; les accords sur les distances mesurées par ces différentes techniques sont très prometteurs car ils sont d'une précision jamais atteinte jusqu'à présent.

Au même tableau 3, on entend par «éphéméride transmise» le fait que les positions du satellite soient données en temps réel par une modulation de l'onde porteuse, tandis que «l'éphéméride améliorée ou précise» consiste à déterminer a posteriori les positions du satellite. Bien que notablement plus compliquée, l'éphéméride précise doit être utilisée pour des travaux de précision sur des distances supérieures à quelques dizaines de kilomètres.

Il ressort de ces quelques résultats représentatifs que le GPS est à même de contribuer à l'estimation des vitesses de mouvement, à la mise au point de modèles cinématiques qui doivent conduire à une meilleure compréhension des mouvements tectoniques et de la physique qui les génère.

IV.- ACTIVITES DE L'OBSERVATOIRE ROYAL DE BELGIQUE EN GEODESIE SPATIALE

A. ACTIVITES ANTERIEURES ET ACTUELLES

L'Observatoire Royal de Belgique s'est intéressé à la géodésie spatiale dès 1966, avec sa participation à la première campagne européenne visant à tester ces nouvelles méthodes en vue de l'homogénéisation du réseau géodésique européen (Pâquet, 1968). Sur la position d'une station, la précision de l'époque était de 2 à 3 mètres; les observations se sont déroulées de 1966 à 1971.

En 1972, l'Observatoire Royal était intégré dans un réseau mondial composé de 20 stations visant à déterminer les paramètres d'orientation du globe terrestre; il s'agissait du réseau TRANET et des satellites TRANSIT observés par effet Doppler (Pâquet, 1973 et 1984). Bien que la précision du mouvement du pôle déduit par cette approche ne puisse plus concurrencer celle des techniques VLBI ou LASER, le système TRANET restera opérationnel jusqu'au moment où le système GPS sera tout à fait en place. Actuellement le réseau TRANET détermine l'éphéméride précise des satellites de navigation et altimétriques; il reste aussi d'un usage courant en géodésie car il permet de déterminer des coordonnées absolues à 30 cm près, en deux ou trois jours et à l'aide d'un équipement facilement transportable (20 kg).

En 1988, l'Observatoire Royal a obtenu le budget nécessaire à l'acquisition du matériel pour la mise en place et l'exploitation des données GPS. Deux récepteurs multifréquences sont disponibles depuis le début de l'année 1989.

La Belgique compte ainsi 5 récepteurs puisque l'Institut Géographique National, pour le développement et le maintien du réseau géodésique belge, dispose depuis 1988 de trois récepteurs mono-fréquence.

B. ACTIVITES FUTURES

Outre le maintien en opération de la station TRANET, l'Observatoire Royal s'est engagé dans le développement de logiciels pour l'exploitation du GPS, en y incluant le calcul des déformations du sol dues aux surcharges océaniques et atmosphériques. Ces études constituent le pôle principal des activités du groupe concerné par la géodésie et la rotation de la Terre.

En ce qui concerne les mesures expérimentales déjà prévues, relevons les missions suivantes :

- la borne de référence du réseau géodésique belge, située à l'Observatoire Royal de Belgique, sera raccordée aux réseaux internationaux matérialisés par les stations LASER et VLBI. Cette opération sera répétée régulièrement, par exemple tous les deux ou trois ans; il est d'ailleurs vraisemblable qu'un réseau permanent sera déployé en Europe en vue de fournir des éphémérides précises liées à des recherches en géophysique comme le contrôle de zones sismiques par exemple.
- occupation régulière, tous les 4 ou 5 ans, de quelques stations représentatives du réseau sismologique et du réseau gravimétrique de premier ordre.
- installation d'une base de calibration, d'une centaine de kilomètres, pour l'étude des perturbations ionosphériques et le contrôle de la stabilité des coordonnées relatives déduites du GPS.
- participation à des campagnes de mesure de l'état de rotation de la Terre pour la mise en évidence des fluctuations à courte période (Pâquet *et al.*, 1988).

Cette liste n'est certainement pas exhaustive et il n'y a aucun doute que de nombreuses applications restent à découvrir au gré de la mise en place et des développements liés au GPS. L'Observatoire Royal est bien sûr ouvert aux propositions, liées à des programmes scientifiques, que des membres des communautés géologiques et géophysiques souhaiteraient voir réaliser.

BILBIOGRAPHIE

BOSSLER, J., 1983. EOS, AGU, vol. 64, N° 39.

BREUER, B., SEEGER, H. & MUELLER, A., 1988. GPS-Techniques applied to Geodesy and Surveying. *Lecture Notes in Earth Sciences*. Ed. E. Groten, R. Strauss, Springer-Verlag : 150-161.

CHRISTODOULIS, D.C., SMITH, D.E., KOLENBIEWICZ, R., KLOSKO, S.M., TORRENCE, M.H. & DUNN, P.J., 1984. JGR 90, B11 : 9249-9263.

MINSTER, J.B. & JORDAN, T.H., 1978. JGR 83, B11 : 5331-5354.

PAQUET, P., 1968. Comm. Obs. Royal de Belgique N° 35, Sér. Géophysique N° 83.

PAQUET, P., 1973. Comm. Obs. Royal de Belgique N° 82, Sér. Géophysique N° 118.

PAQUET, P., 1984. Comm. Obs. Royal de Belgique N° 132, Sér. Géophysique N° 146.

PAQUET, P. & LOUIS, L., 1988. GPS-Techniques applied to Geodesy and Surveying. *Lecture notes in Earth Sciences*, Ed. E. Groten, R. Strauss, Springer-Verlag : 442-448.