

## **VLBI ASTROGEODESIQUE ET SCIENCES DE LA TERRE**

Martine Feissel-Vernier <feissel@ensg.ign.fr>  
Observatoire de Paris/SYRTE et IGN/LAREG

### PLAN

1. La méthode	p. 1
2. Analyse	p. 6
3. Résultats	p. 9
4. VLBI et sciences de la Terre	p. 13
5. VLBI et géodésie satellitaire	p. 17
6. Conclusion	p. 19
7. Bibliographie partielle	p. 20

## **1. LA METHODE**

L'interférométrie à très longue base en ondes radio (en anglais : Very Long Baseline radio Interferometry, VLBI) a été développée au début des années 1960 pour la recherche en astrophysique, dans le but d'obtenir des images à haute résolution d'objets célestes. Son application en astrométrie et en géodésie utilise cette haute résolution en tant que précision de visée de direction d'objets célestes. Elle est caractérisée par la spécialisation d'un réseau d'observation permanent, la sélection d'objets quasi ponctuels (donc non résolus, à l'opposé des programmes astrophysiques), la sélection de seulement deux bandes de fréquence et la programmation d'observations régulières. Le programme international de VLBI astrogéodésique est coordonné par un service international parrainé par l'UAI (Union Astronomique Internationale) et l'AIG (Association Internationale de Géodésie) : l'International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS).

### **1.1. Principe du VLBI**

Le principe de la méthode est illustré par la figure 1. Au moyen d'une paire d'antennes distantes de plusieurs milliers de kilomètres l'une de l'autre, on collecte le signal en ondes radio d'un même astre. Les objets observés peuvent soit appartenir à notre galaxie (étoiles), soit être beaucoup plus lointains : quasars, noyaux de galaxies jusqu'à des distances de 5 ou 10 milliards d'années de lumière. Les fréquences utilisées pour l'astrométrie et la géodésie sont les bandes S (2,3 GHz) et X (8,4 GHz), correspondant respectivement à des longueurs d'onde de 13 cm et 3,6 cm. Le diamètre des antennes se situe entre 9 et 60 mètres. La figure 2 montre deux exemples de ces antennes. Le signal, qui ressemble plus à un bruit, comme le suggère la figure 1, collecté en parallèle sur un certain nombre de bandes étroites de fréquence, est daté au moyen d'une horloge locale puis enregistré, sur cassette vidéo ou bande magnétique selon le dispositif adopté. L'horloge

en station est généralement un maser à hydrogène, l'oscillateur de fréquence ayant la meilleure stabilité à court terme ( $10^{-14}$  pour des durées de quelques heures à une journée). Les horloges sont synchronisées sur UTC.

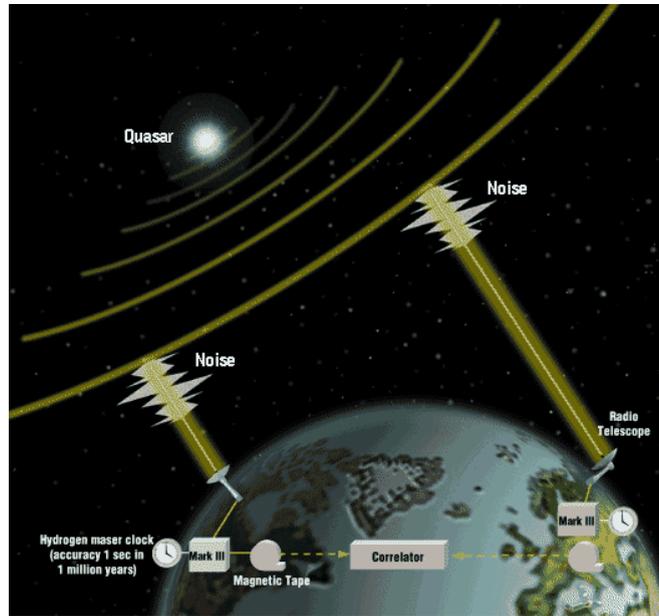


Figure 1. Description schématique de l'observation VLBI montrant deux stations, munies chacune d'une antenne, d'un codeur-enregistreur (ici MarkIII – le cliché date de 1995) et d'une horloge. Les enregistrements sont expédiés vers le corrélateur.



Fairbanks, Alaska. Diamètre: 26 m



Tsukuba, Japon. Diamètre: 32 m

Figure 2. Deux exemples d'antennes du réseau de VLBI astrogéodésique

## 1.2. Mise en oeuvre

Une **session d'observation** astrogéodésique est programmée sur 24 heures pour une demi-douzaine de stations. Elle comporte pour chaque base, formée par une paire de stations, quelques

milliers de séquences d'enregistrements utilisant plusieurs dizaines de radiosources. Les enregistrements sont ensuite acheminés vers un centre de corrélation, où un ordinateur spécialisé calcule le retard de l'arrivée du signal entre les deux extrémités de chaque base et pour chaque radiosource observée, en effectuant la corrélation des signaux collectés. La technologie de l'ensemble du processus est améliorée en permanence par plusieurs centres de recherche, aux Etats-Unis (systèmes Mark III, IV, V), au Japon (système K-4) et au Canada (système C2). Un développement en cours vise à remplacer le rapatriement des bandes magnétiques par la transmission électronique des observations (plusieurs téraoctets par station pour une session de 24 heures) depuis les stations de mesure vers le corrélateur, ce qui permettrait à la fois un fort gain de temps (une dizaine de jours) pour l'obtention des résultats et une économie substantielle sur le poste des bandes vidéo (maintenance du parc de supports magnétiques et frais de transport). Il est à noter que les tâtonnements et les progrès qui se firent dans les techniques de traitement du signal à la charnière des décennies 1970-80 pour le VLBI ont fourni par la suite une base de départ avancée aux concepteurs et aux développeurs du GPS.

Le programme d'observation est organisé en cycles annuels gérant au mieux l'alternance et la redondance partielle des sous-réseaux d'observation et le suivi des sources.

### **1.3. Repère de référence terrestre**

La figure 3 montre la carte du **réseau terrestre** international sur lequel s'appuient les observations permanentes réalisées pour l'IVS. Il s'agit d'un réseau à large maille, peu adapté à la surveillance des déformations à petite échelle, mais qui fournit un ancrage fort pour les déformations à grande échelle et la mesure des mouvements de la Terre dans l'espace. La figure 4 montre à titre d'exemple les bases les plus observées. La couverture relativement faible de l'hémisphère sud est amplifiée par un usage moins intensif des stations qui s'y trouvent. Noter le rôle clé de la station d'Hartebeesthoek en Afrique du Sud et l'absence de participation française au réseau international. Le site de Conception a été récemment équipé avec la station allemande multitechniques TIGO.



Figure 3. Le réseau permanent du programme astrogodésique de l'IVS

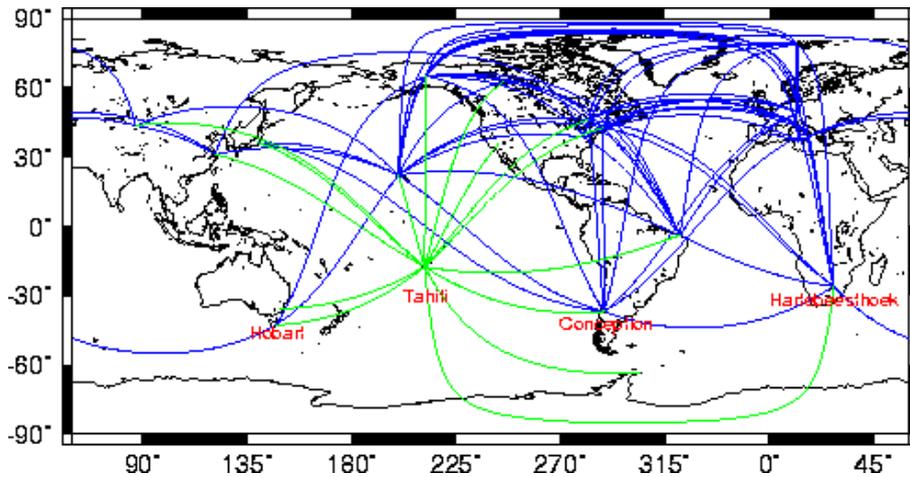


Figure 4. Les bases observées régulièrement par le programme de VLBI astrogodésique (en bleu). Les lignes vertes figurent les bases qui pourraient être ajoutées par l'installation d'une station à Tahiti.

#### 1.4. Repère de référence céleste

Le **référentiel céleste** est constitué d'environ 800 sources, observées avec des fréquences d'observation très inégales. La figure 5 illustre la répartition céleste des objets les plus observés par l'IVS. Seules les radiosources extragalactiques sont utilisées pour les applications astrogodésiques,

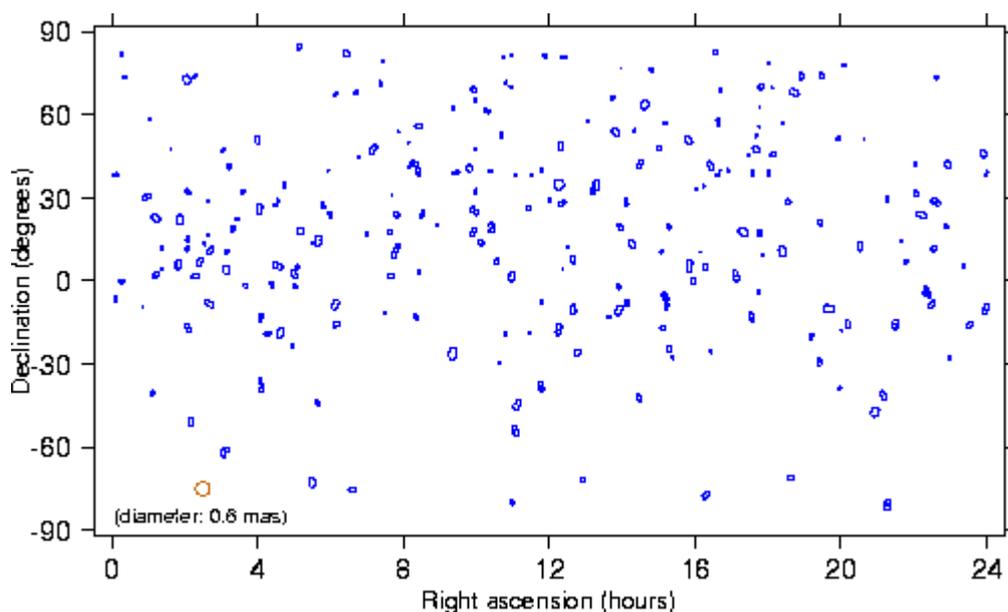


Figure 5. 245 radiosources stables régulièrement observées dans le programme de l'IVS. On montre l'enveloppe de la variabilité spatiale des positions annuelles de 1990 à 2002.

car ce sont les meilleurs objets offerts par la nature pour matérialiser un système de référence quasi inertiel, ou non tournant. En effet, la rotation différentielle de notre galaxie exclut d'y adosser un référentiel établi par VLBI, dont la précision de « pointage » de la Terre dans l'espace est de l'ordre de 100 microsecondes de degré, équivalant à quelques millimètres à la surface de la Terre.

Les quasars sont constitués d'une « machine » centrale brillante, qui peut émettre dans une direction axiale privilégiée des lobes rayonnant dans le domaine radio, avec des temps caractéristiques de quelques mois à quelques années. Quand un tel événement se produit, le VLBI mesure une direction moyenne entre les composantes principale et secondaire, cette dernière étant généralement plus faible. D'où, au cours des années, la présence de variabilité de la position mesurée, selon une direction propre à chaque quasar. Il en résulte la structure allongée des enveloppes de variabilité de la figure 5. La figure 6 montre deux exemples de structure spatiale de quasars. La source 0552+398 a une structure de rayonnement circulaire, peu variable dans le temps. La source 0923+392 a une structure moins symétrique, susceptible de se modifier. La figure 7 montre la variation de direction apparente de ces deux radiosources. La stabilisation des positions annuelles de 0552+398 à partir de 1990 reflète l'amélioration générale du programme VLBI, à travers l'extension du réseau terrestre, le développement de la qualité des systèmes d'enregistrement, donnant accès à des objets plus faibles donc plus nombreux et en général plus stables, aussi bien qu'aux progrès du cadencement des observations par base et par source au sein des sessions de 24 heures.

Pour assurer l'exactitude et la stabilité temporelle de la détermination par VLBI des quantités géodésiques variables dans le temps, il est indispensable de minimiser l'influence de la variabilité individuelle des sources. Une source du type de 0923+392, qui montre une oscillation lente d'amplitude totale 1 mas (0,001") ne sera pas utilisée pour la maintenance à long terme du

référentiel céleste. La source 0552+398, la plus intensivement observée du programme (200 000 observations en plus de 3000 sessions depuis 1980), est aussi l'une des plus stables, avec une précision de positionnement d'une dizaine de microsecondes de degré, équivalant à une fraction de millimètre à la surface de la Terre.

## 2. ANALYSE

La modélisation des observations est effectuée dans le cadre de la Relativité Générale, dans un système de référence rapporté au barycentre du système solaire. Le document le plus complet décrivant la modélisation du VLBI a été rédigé par O. Sovers *et al.* [13].

### 2.1. Le modèle géodésique

Le **système de référence céleste** est réalisé par la donnée des positions d'une sélection de plusieurs centaines d'objets extragalactiques, dont on admet que la rotation d'ensemble dans un système quasi-inertiel est nulle. Comme pour les autres techniques de géodésie spatiale, le **système de référence terrestre** est réalisé par la donnée des positions des stations d'observation et d'un modèle de leur mouvement. Notons qu'à la différence des méthodes satellitaires, le VLBI est une méthode géométrique dont les mesures ne sont pas sensibles au champ de pesanteur de la Terre, ce qui rend impossible le rattachement direct du référentiel terrestre à son centre des masses.

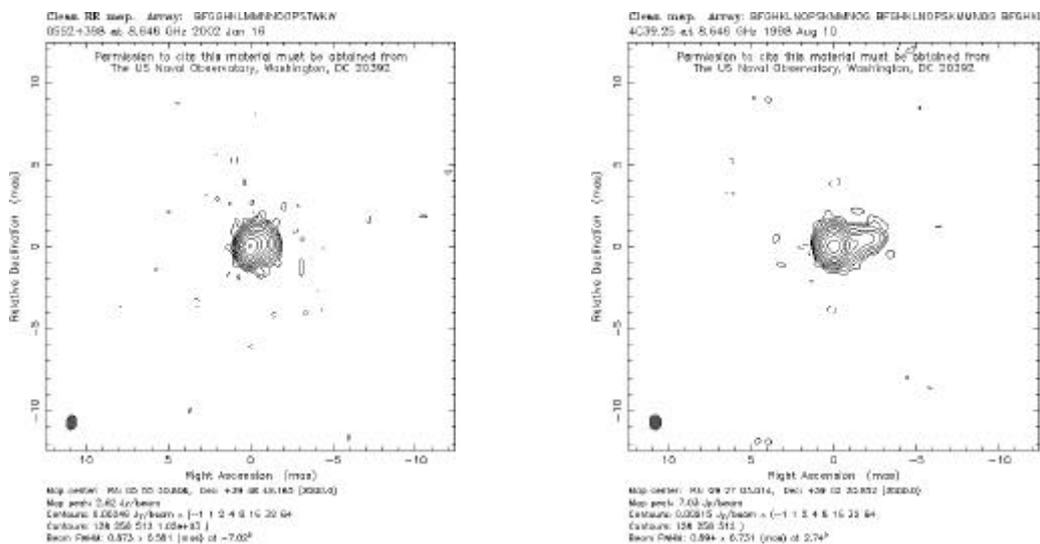


Figure 6. Cartes en bande X des sources 0552+398 et 0923+392 (4C39.25)

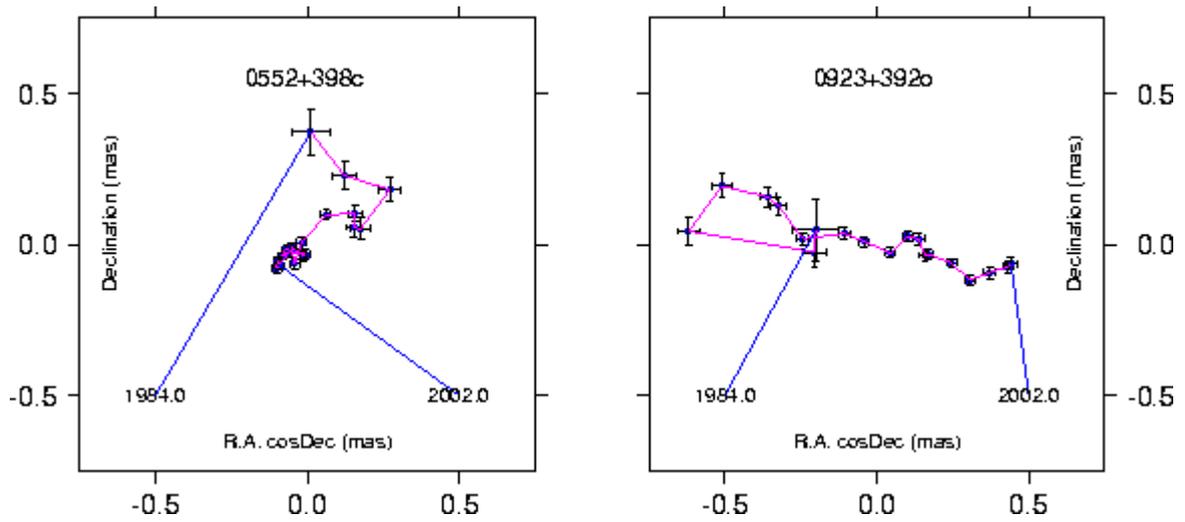


Figure 7. Déplacement apparent de 1984 à 2002 des sources 0552+398 et 0923+392. Noter la différence d'échelle d'un facteur 20 avec la figure 6. En tenant compte de l'opposition des signes en ascension droite entre les figures 6 et 7, on peut vérifier que la direction de déplacement (fig. 7) de 0923+392 est en accord avec celle de l'élongation de la structure de la source (fig. 6).

Le **retard géodésique** (*geodetic delay*) pour une source observée sur une base constituée par deux stations s'écrit :

$$\tau_G = - (\mathbf{e} \cdot \mathbf{B}_T) / c \quad [1]$$

où  $\mathbf{e}$  est un vecteur unitaire dans la direction de la source,  $\mathbf{B}_T$  est le vecteur de base exprimé dans le repère terrestre et  $c$  est la vitesse de la lumière. La relation entre  $\mathbf{B}_T$  et le vecteur de base exprimé dans le repère céleste,  $\mathbf{B}_C$ , fait intervenir les matrices de rotation correspondant aux diverses composantes de la rotation de la Terre : précession-nutation [PN], mouvement du pôle [XY] et rotation autour de l'axe [UT] :

$$\mathbf{B}_C = [PN].[UT].[XY] \mathbf{B}_T \quad [2]$$

La valeur du retard géodésique peut atteindre 20 millisecondes d'heure. Les composantes de cette valeur dues à la déviation relativiste du rayon incident par les objets les plus massifs du système solaire atteignent 30 nanosecondes à 10 rayons solaires du Soleil et 1 nanoseconde à 3 rayons joviens de Jupiter. Le bruit de mesure étant de l'ordre de la dizaine de picosecondes, on voit la nécessité d'une modélisation relativiste soignée.

Les inconnues principales de la compensation des données sont les coordonnées équatoriales de chaque source (ascension droite, déclinaison) dans le repère céleste, les coordonnées cartésiennes tridimensionnelles de chaque station dans le repère terrestre, et les cinq paramètres classiques de l'orientation de la Terre (*Earth Orientation Parameters, EOP*) : deux pour décrire la direction de l'axe de rotation dans le repère céleste, deux pour décrire la direction de l'axe de rotation dans le repère terrestre, et le temps universel, qui est pratiquement proportionnel au temps sidéral. Les paramètres d'orientation de la Terre peuvent être déterminés à partir des sessions d'observation de 24 heures impliquant en général cinq ou six stations bien réparties et quelques dizaines de radiosources. Une détermination précise des paramètres des repères célestes nécessite quelques dizaines de ces sessions.

## 2.2. Modèles complémentaires

Outre le retard géodésique, la modélisation du **retard observé** prend en compte un certain nombre de phénomènes géophysiques et atmosphériques perturbateurs, ainsi que de paramètres propres à la technique VLBI. Selon les objectifs et les conditions de l'analyse, ces phénomènes peuvent être soit corrigés par un modèle extérieur, par exemple à l'aide des Conventions IERS [10], soit estimés à partir des observations au moyen d'une modélisation et/ou de procédures de calcul. A partir d'un tronc commun de modélisation et d'une production standardisée de résultats, chaque groupe d'analyse développe ses propres expériences. Par ailleurs ces groupes participent à la discussion concurrentielle permanente avec les utilisateurs des autres techniques de la géodésie spatiale, télémétrie laser, Doris et, surtout, GPS. L'un des objectifs principaux de cette discussion est la contribution unifiée de l'ensemble des techniques à la détermination du repère de référence terrestre international ITRF et au suivi de la rotation terrestre. Ces pratiques tendent à assurer la convergence des modèles et des protocoles d'analyse.

Les phénomènes classiquement pris en compte sont énumérés ci-dessous.

### **Modèles extérieurs (sauf si étude ciblée)**

- Marées terrestres, marée polaire.
- Effets de charge océanique et atmosphérique.

- Variations quasi-diurnes dans le mouvement du pôle et le temps universel dues aux marées terrestres et océaniques.
- Correction ionosphérique (au premier ordre, grâce aux enregistrements bifrédence).

### ***Phénomène géophysique partiellement estimé***

- Correction troposphérique zénithale et gradient azimutal [9]. Le traitement est analogue à ce qui se fait en GPS. L'utilisation directe des paramètres déterminés par GPS dans le cas de stations colocalisées a été testée, mais n'est pas mise en œuvre en routine en 2003. La meilleure robustesse attendue des résultats du GPS, du fait d'une meilleure géométrie spatio-temporelle des observations, pourrait contribuer à l'amélioration des résultats du VLBI.

### ***Phénomène astrophysique identifié mais non encore pris en compte***

- Effet de la structure spatiale des sources et de ses variations. La correction a été testée [2] mais n'est pas mise en œuvre en général, vu sa lourdeur - il faudrait cartographier et modéliser la structure de toutes les sources une ou deux fois par an. Un tel programme de cartographie existe partiellement [6]. Une façon de minimiser les conséquences de cet effet sur la stabilité des résultats globaux (repère de référence céleste, précession, nutation, temps universel) consiste à s'appuyer sur une sélection de sources reconnues comme stables par une évaluation statistique appropriée [5].

### ***Effets instrumentaux corrigés par un modèle à priori***

- Corrections géométriques et thermiques propres à l'antenne.
- Retards électroniques dans la chaîne d'acquisition et de datation des mesures.

### ***Effets instrumental estimé***

- Variation temporelle des écarts entre les horloges des deux stations constituant la base d'observation. Cet effet a joué un rôle perturbateur important dans les premières décennies de l'exploitation du VLBI. Grâce aux progrès technologiques - meilleure électronique, permettant de surcroît des observations plus courtes sur chaque quasar, donc plus d'observations au cours de la session, d'où un suivi plus détaillé du comportement des horloges - la situation semble être sous contrôle dans les analyses. La tendance a été de resserrer la cadence de détermination des paramètres de différence d'état et de marche des horloges, jusqu'à une à trois déterminations par heure, ou même un filtrage de Kalmann.

### 3. RESULTATS

Les principaux résultats du programme international de VLBI astrogéodésique sont détaillés ci-dessous. Les précisions annoncées sont valables pour les résultats disponibles en 2003.

#### 3.1. Repères de référence céleste

Ces repères comportent les positions de radiosources extragalactiques, avec une précision de 10 à 100 microsecondes de degré. En particulier, l'International Celestial Reference Frame ICRF, réalisation primaire du système céleste recommandé par l'Union Astronomique Internationale. On dispose aussi de séries temporelles de coordonnées de radiosource par session.

#### 3.2. Repères de référence terrestre

Ces repères comportent position et vitesse des stations d'observations, dont les précisions sont respectivement de 2 mm et 0.5 mm/an, ainsi que des séries temporelles de coordonnées de station par session. Certains de ces repères entrent dans l'élaboration et la maintenance de l'International Terrestrial Reference Frame ITRF grâce aux stations colocalisées avec les autres techniques géodésiques globales : GPS, télémétrie laser, Doris [1].

#### 3.3. Le suivi de la rotation de la Terre :

Les paramètres de la rotation de la Terre décrivent la précession-nutation, la rotation autour de l'axe et le mouvement du pôle. Le programme VLBI international produit des séries temporelles de ces paramètres, avec un intervalle de 1 à 5 jours et une précision de l'ordre de 100 microsecondes de degré sur une valeur individuelle.

**3.3.1. La précession et la nutation** sont des oscillations de l'axe de rotation dans l'espace. Ce phénomène, illustré par la figure 8, comporte d'une part la réponse de la Terre solide à diverses excitations extérieures (le couple gravitationnel exercé par la Lune, le Soleil et les planètes sur une planète non sphérique et non rigide) ou en surface (pression atmosphérique et océanique), et d'autre part des modes oscillatoires propres du noyau et de la graine. D'où un spectre extrêmement riche. Le VLBI est la seule technique qui permette de mesurer complètement ces phénomènes, la télémétrie laser sur la Lune apportant une information pour le long terme, mais un peu moins précise. Alors que l'analyse des données GPS du réseau de l'IGS (International GPS Service) permet d'estimer la dérivée temporelle des angles de nutation. Une comparaison et une tentative de combinaison avec les mesures GPS ont été réalisées [16]. Comme il est reconnu que le référentiel céleste de l'analyse GPS est instable à moyen et long terme, cette combinaison ne considère que la composante haute fréquence des résultats GPS (périodes inférieures à 60 jours). L'étude spectrale comparative des solutions VLBI et GPS à haute fréquence montre que le niveau de bruit de cette dernière est nettement supérieur au signal VLBI pour les termes de nutation présents dans ce bande de fréquence. Même après calage en basse fréquence, dans l'état actuel les résultats GPS sur la nutation ne permettent pas d'enrichir la connaissance du phénomène.

**3.3.2. Le temps sidéral** décrit l'orientation instantanée de la Terre dans l'espace. Se superposant à un ralentissement très lent (la durée du jour s'allonge de 1,5 millisecondes par siècle), les variations du temps sidéral comportent des signatures décennales, attribuées à l'effet des irrégularités de la convection dans le noyau. Les variations interannuelles, annuelles et à plus haute fréquence sont dues à des influences climatiques (mesurées par la composante axiale du moment cinétique atmosphérique). Ces

irrégularités se superposent à des variations strictement périodiques dues aux marées terrestres zonales. La figure 9 en

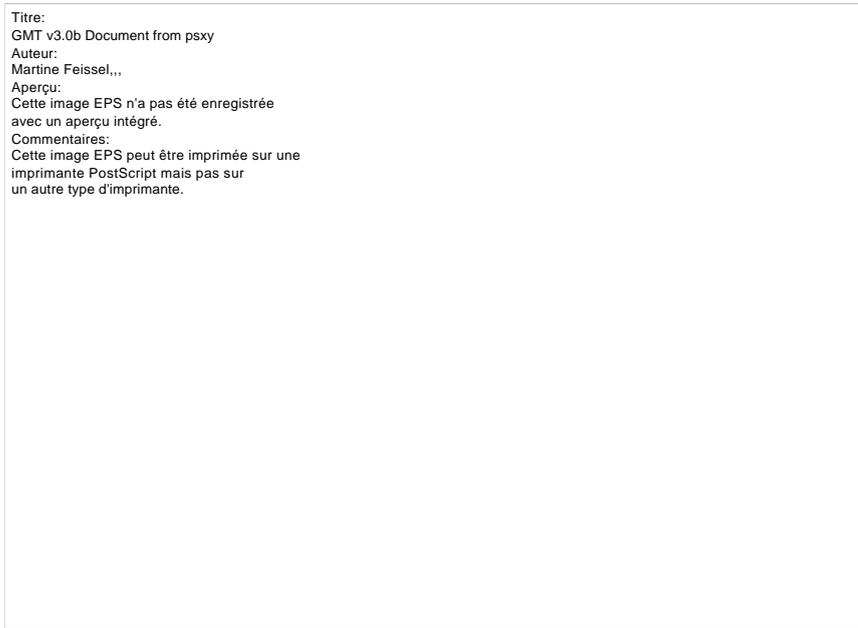


Figure 8. Mesure de la nutation par VLBI : écarts à un modèle approché (UAI1980). Les signatures d'erreurs sur les termes les plus importants (18,6 ans, 1 an, 14 jours) sont visibles. Le modèle recommandé par l'UAI en 2000 (MHB2000) fait disparaître la plus grande partie de ces écarts. Le signal résiduel contient les nutations libres du noyau et de la graine et l'effet de la variabilité des excitations saisonnières, atmosphérique et océanique.

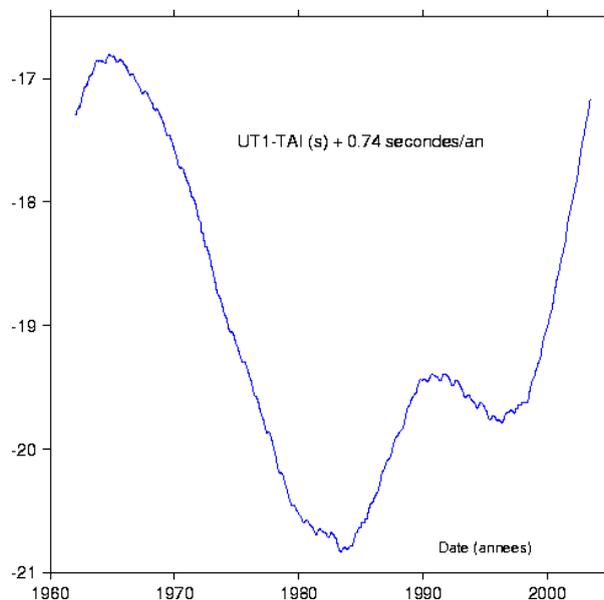


Figure 9. Variations du temps universel, 1962-2003. La référence TAI (Temps Atomique International) est une échelle de temps ultra stable construite par le Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) à partir d'un parc mondial de près d'un millier d'horloges à césium.

Les festons annuels, d'amplitude 50 ms pic à pic, sont visibles dans les parties peu inclinées de la courbe.

montre les variations sur les quatre dernières décennies, telles qu'elles ont été mesurées par astrométrie optique jusqu'au début des années 1980, puis par VLBI. Ici encore, le VLBI est actuellement la seule source de connaissance de cet angle, car les techniques satellitaires rencontrent les mêmes problèmes de stabilité de la référence liée à l'orbite que ceux mentionnés pour la nutation. Elles doivent utiliser le résultat VLBI comme une référence externe à priori.

La dérivée temporelle de cet angle est la **durée du jour** (*length of day*), paramètre qui est aussi accessible aux méthodes de géodésie satellitaire. La figure 10 en montre les variations sur les quatre dernières décennies. Les variations interannuelles, saisonnières et sub-saisonniers imputables aux courants atmosphériques sont visibles. Le pic de la composante irrégulière ("*residual oscillation*") en 1983 est la trace d'un phénomène El Nino exceptionnel. La figure 11 montre l'excellente corrélation des mesures VLBI de la durée du jour avec les variations prédites d'après la dynamique de l'atmosphère.

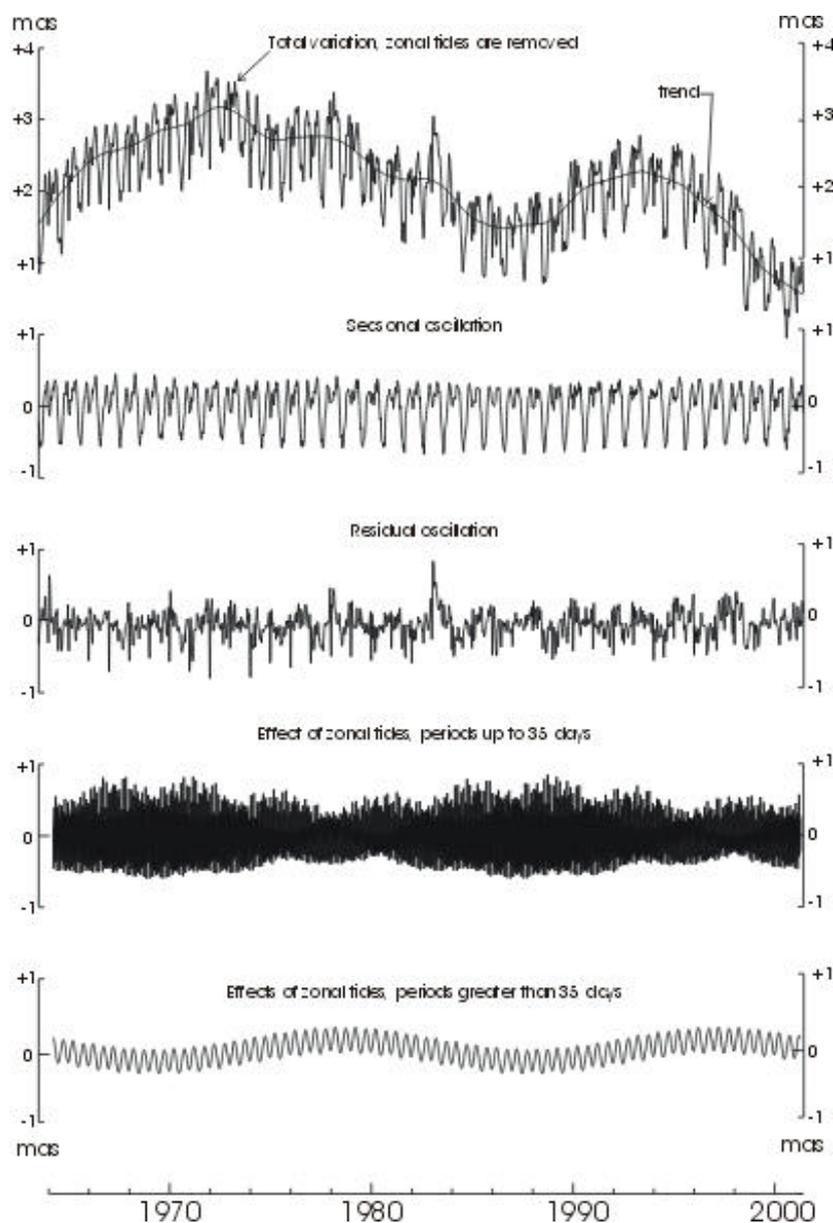


Figure 10. Variations de la durée du jour de 1962 à 2003 et leur décomposition selon l'origine. Unité : milliseconde d'heure.

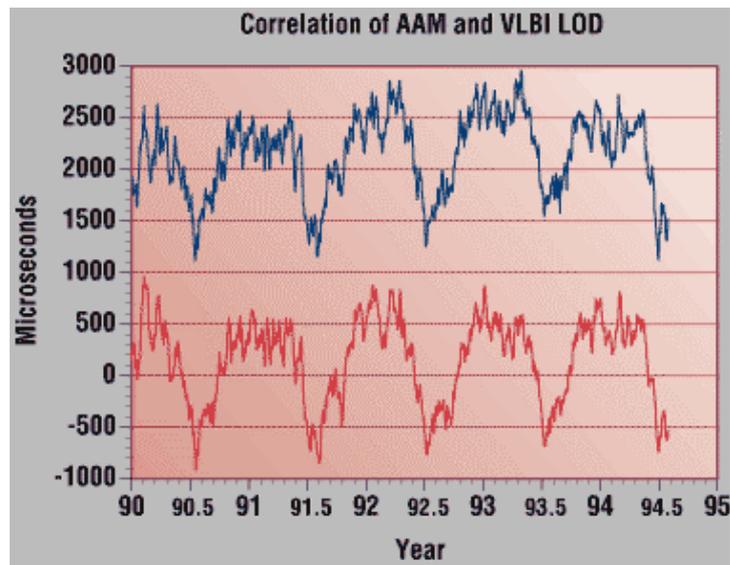


Figure 11. Variations de la durée du jour prédites d'après les données de moment cinétique atmosphérique (AAM, graphe du haut) et d'après les observations VLBI (graphe du bas). Les variations périodiques dues aux marées terrestres zonales ont été soustraites de la mesure VLBI. Le terme prépondérant de cette composante a une période de 13,66 jours et une amplitude de 360 microsecondes.

**3.3.3. Le mouvement du pôle** est une oscillation de la planète autour de son axe de rotation (voir figure 12). Les deux composantes principales des variations observées sont une oscillation propre, appelée terme de Chandler et dont la période est de 1,2 ans, et une oscillation annuelle, forcée par les variations saisonnières de pression atmosphérique et océanique. Le battement des deux termes sur 6 ans donne à la *polhodie* (trajectoire du pôle à la surface de la Terre) une structure en spirale pulsante. Les festons à plus haute fréquence de la polhodie sont aussi des effets atmosphériques (mesurés par les composantes équatoriales du moment cinétique atmosphérique).

### 3.4. Le suivi du retard troposphérique zénithal.

Depuis le 1 juillet 2003 l'IVS publie les valeurs de cette quantité par station [12]. La comparaison avec les données de l'IGS sur octobre 2002 permet de conclure à la présence d'un biais de 5,2 mm et un écart type de 4,8 mm pour les différences sur un ensemble de huit stations en colocalisation. La comparaison entre techniques est ici importante car elle peut aider à mieux qualifier les mesures de déplacements verticaux, ou de l'échelle des repères de référence terrestres.

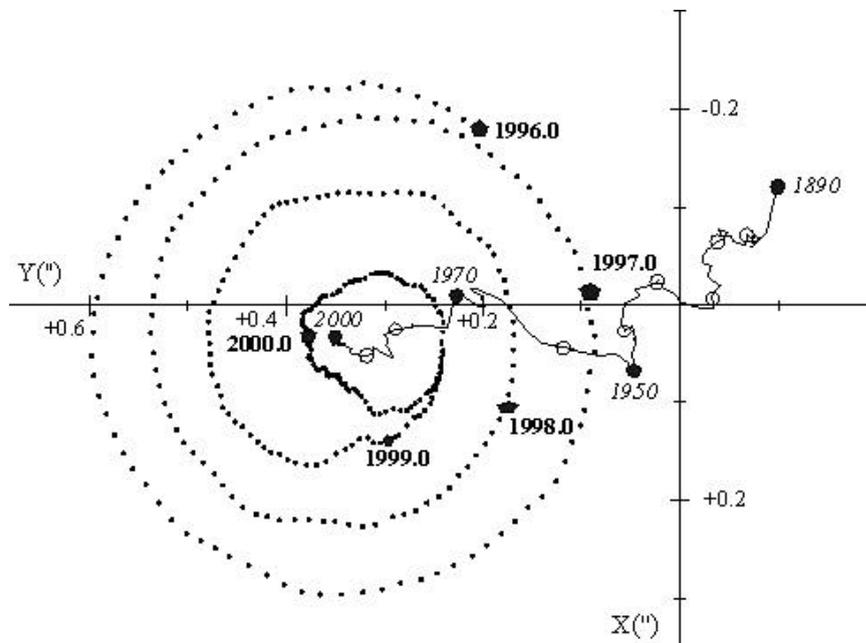


Figure 12. Polhodie de 1998 à 2003 et mouvement de son barycentre depuis 1890. La dérive séculaire est attribuée à des effets tectoniques et dans le manteau supérieur, tels que le rebond post-glaciaire.

#### 4. VLBI ET SCIENCES DE LA TERRE

Par sa mesure de la nutation et de la précession, le VLBI est une source importante de connaissance de l'intérieur de la Terre, à côté des méthodes sismologiques. Par le suivi des irrégularités du mouvement du pôle et du temps sidéral aux périodes de quelques jours à la décennie il apporte une information complète sur le bilan de moment cinétique global de l'atmosphère et de l'océan. Par la mesure de ces variations dans la bande diurne il fournit une détermination fine des effets des marées terrestres et océaniques. Il contribue aussi à la connaissance des mouvements tectoniques à grande échelle, en apportant une mesure géométrique à côté des évaluations par les méthodes satellitaires, dynamiques. Pour les mouvements verticaux, il apporte une contribution spécifique à l'étude du bilan d'exactitude de l'ensemble des techniques.

##### 4.1. Nutation forcée

La nutation forcée est un mouvement de l'axe de rotation de la Terre dans l'espace, en réponse à l'action gravitationnelle de la Lune, du Soleil et, dans une moindre mesure, des planètes. La modélisation du couple gravitationnel exercé par ces corps permet de prédire ce que serait la nutation forcée par ce couple si la planète était rigide, avec une précision d'environ 10 microseconde de degré ( $10 \mu\text{s}$ ) [14]. Le modèle comporte près de 1400 composantes périodiques, dont les termes principaux ont des périodes de

18,6 et 9,3 ans, 1 et 0,5 ans, 14 jours. La nutation réelle, telle qu'elle est observée par le VLBI (et seulement lui) comporte ces mêmes composantes, mais avec une amplitude modifiée par la fonction de transfert de la planète, constituée de couches solides, plus ou moins fluides ou visqueuses, interagissant à leurs interfaces. A partir d'une représentation réaliste de la planète, on peut élaborer un modèle analytique de la fonction de transfert. Les éléments pris en compte sont, par exemple, l'anélasticité du manteau, le couplage magnétique à la frontière entre le noyau et le manteau, l'ellipticité du noyau liquide, le couplage à la frontière entre la graine et le noyau. L'observation VLBI permet d'estimer les paramètres décrivant ces propriétés. L'application de cette méthode a permis de rendre compte du phénomène observé en laissant la question ouverte au niveau résiduel de seulement quelques dizaines de microsecondes de degré. C'est le modèle MHB2000 [8], adopté comme modèle conventionnel par l'UAI. Les termes résiduels s'expliquent si l'on complète le modèle par la prise en compte de la variabilité temporelle du forçage atmosphérique et, probablement, océanique [3].

## 4.2. Nutation libre du noyau

Le noyau liquide possède un mode propre oscillatoire rétrograde dont les caractéristiques (période, amortissement) permettent de remonter à ses propriétés géométriques et dynamiques. Le mode est actif dans la mesure où se produit une excitation extérieure ayant une période proche de sa période propre, 430 jours. La figure 13 illustre l'évolution de cette oscillation, mesurée par VLBI. L'amplitude, assez importante dans la décennie 1980-1990 (250  $\mu$ as), diminue jusqu'à environ 50  $\mu$ as autour de 1998, puis semble recommencer à croître. Ces variations sont attribuées à l'excitation par l'atmosphère : les variations diurnes (dans un repère terrestre) de pression atmosphérique induisent une excitation saisonnière de la nutation (dans un repère céleste), cette saisonnalité pouvant glisser vers la période de la FCN (*Free Core Nutation*), comme ce fut le cas dans la décennie 1980-1990. Par ailleurs, la valeur de la fonction de transfert au voisinage de la FCN permet de placer le facteur de qualité Q dans l'intervalle [20000-24000] [3].

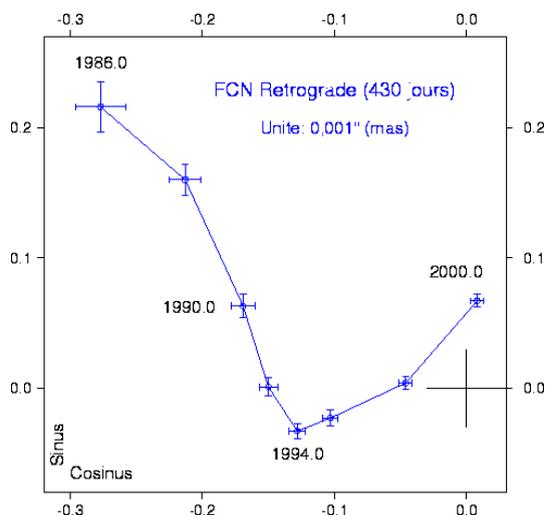


Figure 13. Evolution de l'amplitude et de la phase de la nutation libre du noyau (FCN), 1984-2003. Estimation par fenêtres glissantes de six ans, permettant de décorrélérer les composantes de périodes 365 et 430 jours.

## 4.3. Nutation libre de la graine

La théorie prévoit que la graine solide possède un mode oscillatoire propre prograde dont la période se situerait autour de 1000 jours [8]. L'analyse des observations VLBI, excluant de la référence céleste les sources reconnues comme instables, a permis la détection de ce mode alors qu'il est excité par l'atmosphère, comme illustré par la figure 14. Sa période est estimée à 880 +/- 30 jours, et son amplitude en 1990-1995 à 37 +/- 10  $\mu$ as. La valeur estimée du facteur de qualité Q est égale à 2500 [4].

Titre:  
 C:\MATLAB6p1\work\truffaut\Figurearticle3.eps  
 Auteur:  
 MATLAB, The Mathworks, Inc.  
 Aperçu:  
 Cette image EPS n'a pas été enregistrée avec un aperçu intégré.  
 Commentaires:  
 Cette image EPS peut être imprimée sur une imprimante PostScript mais pas sur un autre type d'imprimante.

Figure 14. Détection de la nutation libre de la graine solide (*Free Inner Core Nutation, FICN*), à la période 880 jours, alors qu'elle est excitée par l'atmosphère : analyse en ondelettes de la bande de fréquences progrades 400-1000 jours (ordonnées) en fonction de la date (abscisses). Le pic entre 1990 et 1995 a une amplitude de 37  $\mu$ as

#### 4.4. Variations quasi diurnes de la rotation dues aux marées terrestres et océaniques

Les marées océaniques induisent des variations du temps sidéral et du mouvement du pôle dans la bande des fréquences quasi-diurnes, dont l'amplitude atteint une fraction de milliseconde de degré (mas). La figure 15 illustre ces variations, mesurées par VLBI lors de l'une des campagnes d'observation intensive qui sont régulièrement organisées par l'IVS. Les modèles utilisés conventionnellement en géodésie spatiale ont été établis à partir de ce type d'observations [11].

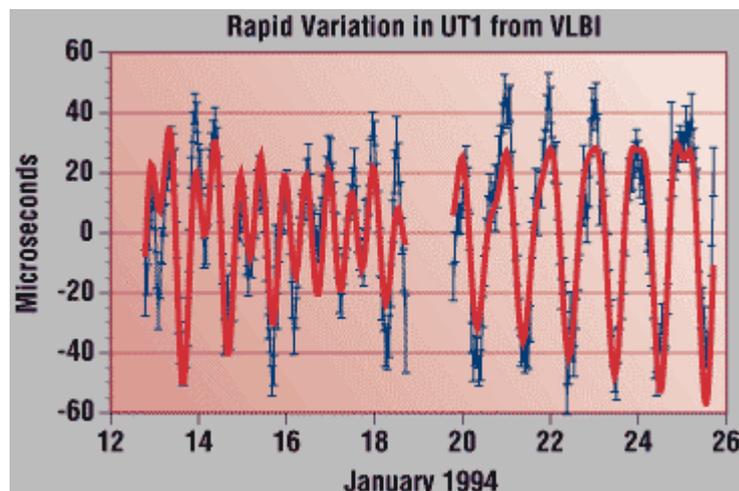


Figure 15. Observations VLBI des variations quasi-diurnes du temps universel (angle pratiquement proportionnel au temps sidéral). Le modèle prédictif établi par confrontation de la théorie et des observations VLBI est superposé aux valeurs observées.

#### 4.5. Tectonique globale

Avec son réseau global peu dense, le VLBI n'est pas adapté à l'étude des déformations locales ou régionales. Par contre, cette technique fournit un jeu de vitesses de plaques rapporté au repère extragalactique (figure 16). Noter que, pour exploiter toute la valeur de ce rattachement extérieur, il est nécessaire de prendre en compte le rattachement des stations VLBI à la partie non déformable de chaque plaque tectonique. Ceci peut se faire grâce aux colocalisations avec les stations de géodésie satellitaire, qui apportent la haute résolution terrestre.

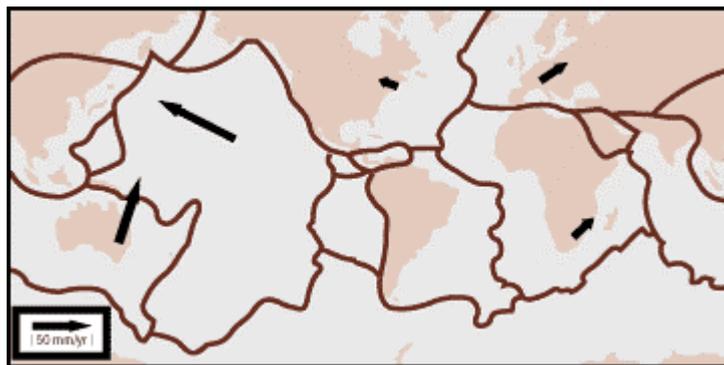


Figure 16. Exemple de détermination des vitesses de plaques tectoniques par VLBI

#### 4.6. Déformations régionales : deux exemples

Un réseau multitechniques de surveillance en temps réel des déformations a été installé dans la région de Tokyo [15] : le projet Keystone fait appel conjointement au VLBI, à la télémétrie laser et au GPS pour détecter des signaux précurseurs de séismes. La programmation et la réalisation des observations VLBI ainsi que la corrélation et l'analyse géodésique sont gérées entièrement en automatique. Le système fonctionne et produit des résultats.

Le VLBI peut aussi contribuer à la mesure des déformations verticales. Leur étude est plus difficile que celle des mouvements horizontaux, car leur amplitude est généralement inférieure d'un ou plusieurs ordres de grandeur. Elle est aussi plus complexe car, plus encore que l'étude des mouvements horizontaux, elle doit faire intervenir l'ensemble du milieu physique local et régional – terre solide, océan et eaux souterraines, atmosphère. Parmi les questions scientifiques dépendant de la connaissance des mouvements verticaux, un enjeu important est la caractérisation des variations actuelles du niveau de la

mer. Dans l'ensemble des mesures de géodésie spatiale, l'apport spécifique du VLBI tient à la nature géométrique de la méthode. D'autre part, la configuration du référentiel céleste et la nature des observations étant différentes de celle des de la télémétrie laser, de Doris et du GPS, on peut espérer mieux séparer les erreurs de correction de propagation du signal dans l'atmosphère du signal tectonique. A titre d'exemple, le programme de VLBI géodésique européen donne des estimations de vitesses verticales avec une précision de 1 à 2 mm/an dans les meilleurs cas [7].

## 5. VLBI ET GEODESIE SATELLITAIRE

Tout d'abord, le VLBI est pour la géodésie satellitaire une source de références spatio-temporelles incontournable, concernant des paramètres nécessaires à l'analyse des données mais inaccessibles à l'observation. Il s'agit de la précession-nutation, du temps sidéral et des variations diurnes du mouvement du pôle et du temps sidéral.

### 5.1. Orientation de la Terre : précession, nutation, temps sidéral

La relation [2] s'écrit plus généralement comme

$$\mathbf{X}_C = [PN].[UT].[XY] \mathbf{X}_T \quad [3]$$

où  $\mathbf{X}_T$  est un vecteur de position exprimé dans le repère terrestre et  $\mathbf{X}_C$  ce vecteur exprimé dans le repère céleste. Cette relation est d'usage universel quand il s'agit de modéliser des observations d'objets dont la position est exprimée dans un repère quasi inertiel, ou repère céleste, les observations étant faites par des stations au sol dont la position est exprimée dans un référentiel terrestre. Dans le cas du VLBI le repère céleste est constitué par les coordonnées des radiosources, dans le cas de la géodésie satellitaire, c'est l'éphéméride géocentrique du centre de gravité du satellite.

Si la matrice du mouvement du pôle [XY] peut être déterminée à partir des observations satellitaires, ce n'est pas le cas des **matrices de précession-nutation [PN] et de rotation autour de l'axe[UT], que le VLBI fournit aux analystes de géodésie satellitaire.**

### 5.2. Variations diurnes du temps sidéral et du mouvement du pôle

La configuration même des systèmes de géodésie satellitaire entraîne la présence dans les orbites de satellites de signatures dans la bande de fréquences diurnes, ce qui rend difficile la singularisation des **variations quasi-diurnes du mouvement du pôle et du temps sidéral. Ce sont les modèles issus de l'observation VLBI qui sont utilisés pour prendre en compte ces variations.**

### 5.3. Repère de référence terrestre

Les apports mentionnés ci dessus concernent l'orientation de la Terre globale. Leur exactitude dépend de la configuration des observations et de la complétude de l'analyse du VLBI, mais cela ne remet pas en cause leur pertinence pour les autres systèmes d'observation. Par contre, la pertinence d'une mesure VLBI terrestre régionale comme le mouvement des plaques tectoniques dépend de la liaison terrestre du VLBI avec les autres techniques. On a déjà mentionné l'impact global possible des déformations locales sur un réseau peu dense.

Par ailleurs, le VLBI entre dans des combinaisons conjointes de référentiels terrestres et des paramètres de la rotation de la Terre dans le cadre de l'IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service). La liaison se fait au moyen des stations de VLBI en colocalisation avec les réseaux de géodésie satellitaire. Ici intervient une difficulté provenant de ce réseau de colocalisation, illustré par la figure 17.

### Current VLBI-GPS Collocations

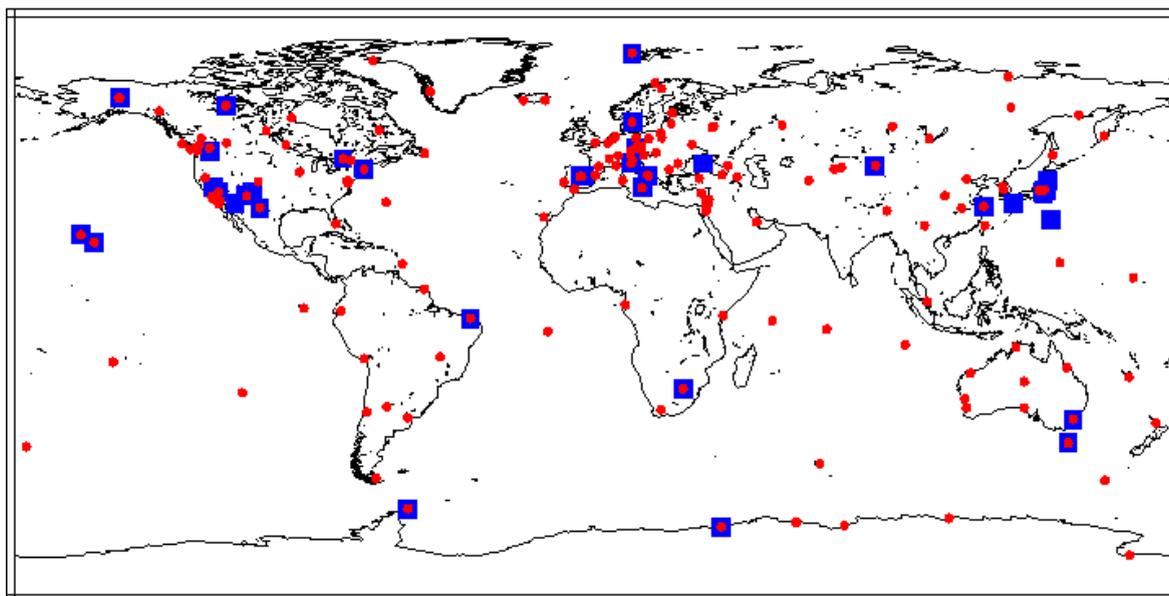


Figure 17. Le réseau de colocalisation entre les techniques VLBI (carrés bleus) et GPS (points rouges) en 2003. Les réseaux de colocalisation du VLBI avec les techniques SLR et DORIS sont très peu denses et mal répartis.

Le tableau 1 donne la valeur des corrélations entre les sept paramètres de la transformation de Helmert (translation de l'origine, rotation des axes, changement d'échelle) s'appuyant sur le réseau de colocalisation du VLBI avec l'ensemble des techniques satellitaires.  $\mathbf{T}_x$ ,  $\mathbf{T}_y$ ,  $\mathbf{T}_z$ , sont les translations entre repères,  $D$  est le facteur d'échelle différentiel,  $\mathbf{R}_x$ ,  $\mathbf{R}_y$ ,  $\mathbf{R}_z$ , sont les angles de rotation entre les axes des repères. On constate l'existence quelques corrélations dépassant la valeur 0,5. Ce défaut, ainsi que la difficulté d'unifier le référentiel terrestre VLBI à partir de sessions d'observation reposant sur des sous-réseaux en partie disjoints, est susceptible d'introduire une inhomogénéité interne dans la combinaison avec les résultats des autres techniques, si l'on veut considérer dans la même analyse le repère terrestre et le mouvement du pôle. Il faut cependant noter que l'échelle, qui est un paramètre global tout comme les paramètres d'orientation de la Terre, montre une excellente stabilité et - du moins s'y attend-on en vertu de la modélisation des observations - exactitude. **Avec le facteur d'échelle des solutions SLR, le VLBI assure la calibration de l'échelle de l'ITRF2000** [1]. Cependant, la faiblesse du rattachement direct entre VLBI et SLR (moins de 10 sites de colocalisation) pose un problème pour l'estimation combinée du facteur d'échelle de l'ITRF.

Finalement, comme le montre le tableau 2, la précision des positions de station VLBI dans un repère global est au même niveau que celle des positions GPS (1 mm en horizontal, 3 mm en vertical). La précision des vitesses est la meilleure parmi les techniques participant à l'ITRF2000 (0.4 mm/an en horizontal, 0.8 mm/an en vertical). L'avenir dira si les vitesses GPS établies sur une base de temps plus longue atteindront le niveau de précision des vitesses VLBI.

Tableau 1. Coefficients de corrélation de la transformation d'Helmert associée au réseau de colocalisation du VLBI avec les techniques de géodésie satellitaire ayant contribué à l'ITRF2000.

	$R_x$	$R_y$	$R_z$	D	$T_x$	$T_y$
$R_y$	0.07					
$R_z$	0.08	-0.07				
D	0.00	0.00	0.00			
$T_x$	-0.07	-0.52	-0.32	0.03		
$T_y$	0.56	0.04	0.08	0.30	-0.04	
$T_z$	0.39	-0.01	0.03	-0.45	-0.02	0.08

Tableau 2. Ecart type des écarts résiduels à la compensation de ITRF2000 pour les différentes techniques participantes.

TECHNIQUE	POSITION (MM)			VITESSE (MM/AN)		
	EST	NORD	HAUT	EST	NORD	HAUT
VLBI	1.0	0.9	2.8	0.40	0.36	0.78
GPS	1.0	1.2	2.6	0.94	0.85	2.08
SLR	2.7	2.2	4.1	1.53	2.14	1.32
Doris	1.6	1.8	12.8	1.87	1.02	2.16

## 6. CONCLUSION

Dans le concert des mesures globales permanentes de la planète Terre par les méthodes de la géodésie spatiale, le VLBI a une place à part, avec des forces et des faiblesses qui sont liées au choix des objets de référence extérieurs auxquels sont rattachés ses résultats : les quasars, objets célestes très lointains donc propres à la matérialisation d'un repère de référence quasi inertiel au prix d'un minimum de modélisation. A condition de bien choisir les objets de référence (sources spatialement peu étendues ayant un rayonnement stable), la modélisation du repère céleste se réduit au postulat d'un mouvement d'ensemble nul. La différence est grande avec la difficulté de modélisation des orbites de satellites de la Terre. Mais ces sources lointaines sont faibles et leur le signal naturel est le résultat de processus complexes. Le prix à payer pour y avoir accès à est la lourdeur du dispositif d'observation, nécessitant de grandes antennes, ainsi que l'enregistrement et le traitement de masses de données ressemblant plus à un bruit qu'à un signal. D'où un réseau d'observation moins dense et moins bien réparti que dans le cas des méthodes satellitaires radioélectriques, et des mesures discontinues, sauf dans le cas de campagnes spéciales. Pourtant, les avantages l'emportent sur les lourdeurs, puisque **le VLBI est l'unique fournisseur des références sidérales indispensables à l'exploitation des techniques satellitaires**, avec une précision et une exactitude de l'ordre de 10 à 100 microsecondes de degré. Par ailleurs, **il**

**apporte sur l'intérieur de la Terre des connaissances originales**, pour une part inaccessible aux méthodes d'investigation géophysiques.

## 7. BIBLIOGRAPHIE PARTIELLE

Cette liste de références est loin d'être exhaustive sur le sujet. Elle ne mentionne que les publications citées dans le texte. Toutefois, les références 10, 13 et 14 sont de portée très générale.

1. Altamimi, Z., Boucher, C., Sillard, P. 2002. *J. Geophys. Res.* **107**, 2214
2. Charlot, P., Sovers, O., 1997. 23<sup>ème</sup> AG de l'UAI, JD 7, Août 1997, Kyoto, Japon.
3. Dehant, V., Feissel-Vernier, M., de Viron, O., Ma, C., Yseboodt, M., Bizouard, C., 2003, *J. Geophys. Res.* **108**, 13. DOI 2002JB001763
4. Dehant, V., de Viron, O., Feissel-Vernier, M., Ma, C., Rivoldini, A., 2003. *Science* (à paraître)
5. Feissel-Vernier, M., 2003. *Astron. Astrophys.* **403**, 105.
6. Fey, A., 2003. <<http://rorf.usno.navy.mil/rrfid.shtml>>.
7. Haas, R., Nothnagel, A., Campbell, J., Gueguen, E., 2003. *J. of geodynamics*, **35**, 391.
8. Mathews, P.M., Herring, T.A., Buffet, B.A., 2002. *J. Geophys. Res.* **107(B10)**
9. MacMillan, D.S., Ma, C., 1997. *Geophys. Res. Lett.* **24**, 453.
10. McCarthy, D.D. (ed.), 1996. IERS Conventions (1996). Observatoire de Paris.  
Voir une mise à jour récente sur <<http://www.iers.org/iers/products/conv/>>
11. Ray, R.D., Steinberg, D.J., Chao, B.F., Cartwright, D.E., 1994. *Science* **264**, 830.
12. Schuh, H., Boehm, J., Engelhardt, G., MacMillan, D., Lanotte, R., Tomasi, P., Negusini, M., Vershchagina, I., Gubanov, V., Haas, R., 2003. <http://mars.hg.tuwien.ac.at/~ivstrop>
13. Sovers, O.J., Fanselow, J.L., Jacobs, C.S., 1998. *Reviews of Modern Phys.*, **70**, 1393.
14. Souchay, J., Kinoshita, H., 1996. *Astron. Astrophys.* **312**, 1017.  
1997. *Astron. Astrophys.* **318**, 639.
15. Takahashi, F. Kondo, T. Takahashi, Y Koyama, Y., 2000. Wave summit course : Very Long baseline Interferometer. Ohmsha, Ltd, Tokyo.
16. Vondrák, J., Ron, C., Weber, R., 2003. *Astron. Astrophys.* **397**, 771

### Sites Internet

IVS	<a href="http://ivsc.gsfc.nasa.gov">http://ivsc.gsfc.nasa.gov</a> , <a href="http://ivsc.leipzig.ifag.de">http://ivsc.leipzig.ifag.de</a>
IERS Conventions	<a href="http://www.iers.org/iers/products/conv/">http://www.iers.org/iers/products/conv/</a>
IERS/Centre ITRS	<a href="http://lareg.ensg.ign.fr/ITRF">http://lareg.ensg.ign.fr/ITRF</a>
IERS/Centre EOP	<a href="http://hpiers.obspm.fr/eop-pc">http://hpiers.obspm.fr/eop-pc</a>
Cartes de radiosources	<a href="http://rorf.usno.navy.mil/rrfid.html">http://rorf.usno.navy.mil/rrfid.html</a>

### Crédit figures

- Figures 1, 2, 3, 11, 15, 16 : site Internet de l'IVS
- Cartes de la figure 6 : site Internet de l'USNO
- Figures 10 et 12 : Centre EOP de l'IERS
- Figure 17 : Z. Altamimi.
- Les figures 4, 5, 7, 8, 9, 12, 13, 14 sont de l'auteur, ou tirées de publications auxquelles elle a participé.