

Références globales pour la géodésie et l'astronomie

le rôle du service international de la rotation terrestre (IERS)

Martine Feissel - Observatoire de Paris - Bureau Central de l'IERS

SUMMARY

Rotation is the major feature of our planet's motion, whose precise knowledge is needed in astronomical, navigation, and global geodetic activities. Its irregularities in both the rate of rotation and the direction of the rotation axis in space and in the Earth are due to dynamic exchanges among the solid, viscous, liquid and gaseous portions of the Earth, and so give information about the physical state of these various layers that cannot be obtained easily, if at all, by other means.

The mission of the International Earth Rotation Service (IERS) is to provide timely and accurate data on the Earth's rotation for current use and long-term studies. For this purpose it has established and maintains an international terrestrial reference frame and an international celestial reference frame and it regularly monitors the relative motion of these two frames by analysing observational data from a variety of techniques, including radio interferometry (VLBI), Lunar Laser Ranging (LLR) and satellite geodetic techniques. These reference frames have many other applications.

The permanent monitoring of the Earth's rotation requires the coordinated use of VLBI and satellite techniques. VLBI, operated once per week in regional networks (6 stations, 6 000 km scale) and once per month in global or full network (30 stations worldwide), provides the absolute reference for the determination of universal time, precession and nutation. The satellite techniques (GPS, SLR, DORIS) provide the daily interpolation and the short-term prediction of universal time in the highly accurate but sparser VLBI reference values; they also provide daily values of polar motion.

The maintenance of the international terrestrial reference frame recommended by the International Union of Geodesy and Geophysics includes monitoring the motion of the reference sites providing access to the reference frame, in particular via densification programs. It requires the maintenance of global networks observed with VLBI, LLR, GPS, SLR and DORIS, totalling at least four stations on each major plate and two on the smaller ones. Some stations of each technique have to be colocated with stations of the other ones, ensuring a balanced distribution. The stations should be operated at least monthly for the core networks in each technique (about 30 stations if possible) and twice yearly for the other sites. IERS sites have to be included in densification campaigns in order to ensure an accurate link.

The maintenance of the international celestial reference frame recommended by the International Astronomical Union requires the VLBI monitoring of 500-600 extragalactic objects by regional or global networks, each source being observed at least twice yearly.

The maintenance of the orbits in the satellite techniques requires permanent observation by core networks (30 stations when possible) with a global coverage, operated with LLR, GPS, SLR, DORIS.

The IERS techniques have strengths that are used in a complementary way, keeping enough redundancy for ensuring the permanence of the service over decades and maintaining close operational interaction with other global astronomical and geophysical programs. The maintenance of the consistency and accuracy of IERS products requires that the major techniques used in space navigation, space geodesy and astrometry be closely associated with the service.

Geophysical information can be derived from the combination of geodetic and related measurements. Because variations in atmospheric angular momentum (AAM) are mirrored clearly in earth-rotation signals on many time scales, it is necessary to monitor these atmospheric signals as part of the IERS mission. Ocean and core dynamics are two geophysical considerations relevant to Earth rotation variations as well.

The IERS can be considered as the specialized management of global aspects of the modern positioning techniques which are used in many other applications where accurately unified reference frames are by-products as well as major requirements.

Qu'y-a-t-il de commun entre la topographie et la surveillance de la direction des quasars, ces objets les plus lointains de l'Univers connu ? Beaucoup plus qu'on ne pourrait le penser. Et de plusieurs façons. Tout d'abord, le développement des méthodes de la géodésie spatiale s'est fait à la fois vers la globalité planétaire et extraplanétaire (cas du VLBI) et l'accès simplifié (cas du GPS) et on verra plus loin que l'usage de la localisation par GPS, qui se généralise de plus en plus, renvoie implicitement au système de référence établi sur la direction des qua-

sars. Mais, aussi, faire de la topographie, de la géodésie ou de l'astrométrie, c'est un peu le même métier : il s'agit d'appliquer des techniques métrologiques à des objets naturels.

Prenons le cas du GPS : le topographe utilise comme référence céleste l'orbite des satellites qui lui est fournie ; la détermination de cette orbite implique toute une organisation mondiale de collecte et d'analyse d'observations, notamment dans le cadre du Service

international GPS pour la géodynamique (IGS), mis en place en 1994 par l'Association Internationale de Géodésie (AIG). L'approche méthodique de l'IGS est globale, et ses analyses produisent, outre les orbites des satellites, les mouvements de plusieurs dizaines de sites de par le monde - dus à la dérive des plaques tectoniques, à des ruptures associées aux séismes, etc. Elles fournissent également une mesure permanente de la rotation de la Terre ; en effet le réseau d'observation est solidaire de la croûte terrestre, alors que les lois de la dynamique modélisent le mouvement du satellite dans un repère quasi-inertiel. Le système "voit" donc la rotation de la Terre et peut en observer les irrégularités.

Dans le cas du VLBI (Very Long Baseline radio Interferometry) on observe des quasars en ondes radio en formant un interféromètre par deux antennes réceptrices distantes de plusieurs milliers de km l'une de l'autre. Les quasars sont les objets célestes les mieux adaptés à la réalisation d'un système de référence céleste : ils se trouvent à des distances de milliards d'années lumière, et même un déplacement à la vitesse de la lumière resterait indétectable, même par les moyens d'observation les plus précis. Le VLBI permet donc aussi de suivre le mouvement des sites d'observation et les irrégularités de la rotation terrestre, ces dernières de façon plus complète que les méthodes de géodésie satellitaire, car malgré les progrès de l'analyse, on ne peut donner aux orbites calculées la stabilité à long terme qu'ont naturellement les directions des quasars.

Le VLBI et le GPS ne sont pas les seules méthodes d'astronomie et de géodésie spatiale mises en œuvre dans des programmes mondiaux permanents. Il s'y ajoute la télémétrie par laser sur la Lune ou sur satellites artificiels et le système radioélectrique DORIS du CNES. On en trouvera une description dans le numéro 52 de XYZ (juillet 1992), p. 41. Ces techniques ont chacune des applications qui leur sont propres, mais elles contribuent toutes aux travaux du Service international de la rotation terrestre, dont nous allons décrire les activités.

L'IERS

Le Service international de la rotation terrestre (en anglais : International Earth Rotation Service, IERS) a été créé en 1988 par l'Union Astronomique Internationale (UAI), et l'Union Géodésique et Géophysique Internationale (UGGI). L'IERS est l'un des services de la Federation of Astronomical and Geophysical Data Analysis Services (FAGS). Il a remplacé deux organismes plus anciens, le Service International du Mouvement du Pôle (SIMP) et la section de la rotation de la Terre du Bureau International de l'Heure (BIH); les activités du BIH sur le temps atomique ont été transférées au Bureau International des Poids et Mesures (BIPM).

L'IERS est responsable de :

- La définition et la maintenance du Système terrestre de référence international recommandé par l'UGGI.
- La définition et la maintenance du Système céleste de référence extragalactique en cours d'adoption par

l'UAI ; la relation avec les autres systèmes célestes de référence en usage en astronomie, géodésie, navigation spatiale, etc.

- L'évaluation de la rotation de la Terre pour ces systèmes : mouvement du pôle dans la Terre et dans l'espace (précession-nutation) et temps universel UT1.

- L'organisation des activités pour l'observation, la collecte, l'analyse et l'archivage des données, ainsi que de la distribution des résultats aux usagers intéressés.

Il met en œuvre cinq méthodes d'observation : radio interférométrie à longue ligne de base (VLBI), télémétrie par laser sur réflecteurs lunaires (LLR) et sur satellite artificiel (SLR), ainsi que les méthodes radioélectriques GPS et DORIS.

L'organisation du travail de l'IERS réalise un compromis intéressant entre la compétition et la coopération des divers éléments qui la composent, ce qui a jusqu'ici assuré un progrès rapide de la qualité et de l'extension des résultats. Les quelques 300 stations, toutes techniques confondues, qui en 1995 fournissent des observations à l'IERS, sont organisées en réseaux mondiaux par technique ; l'élaboration des programmes d'observation et l'analyse des mesures en vue des objectifs de l'IERS sont coordonnées au sein de chaque technique. Le Bureau Central collecte les résultats analysés et élabore les produits du service : rotation de la Terre et systèmes de référence. L'IERS est dirigé collectivement par les représentants des six centres de coordination par technique, du Bureau Central et des unions scientifiques fondatrices, UAI et UGGI. Le Bureau Central de l'IERS est une entreprise commune entre l'Observatoire de Paris et l'Institut Géographique National. L'IGN est responsable du Système terrestre international, l'Observatoire de Paris ayant en charge l'analyse de la rotation terrestre et du Système céleste international.

La précision actuelle des résultats de l'IERS est au niveau du centimètre, soit une fraction de milliseconde de degré. Nous donnons ci-après quelques exemples du rôle de l'IERS, concernant d'une part les irrégularités de la rotation de la Terre et leurs conséquences sur l'échelle de temps UTC et d'autre part la maintenance du Système de référence terrestre international. La Figure 1 donne par ailleurs un aperçu du Système de référence céleste extragalactique auquel l'ensemble des résultats de l'IERS sont rapportés.

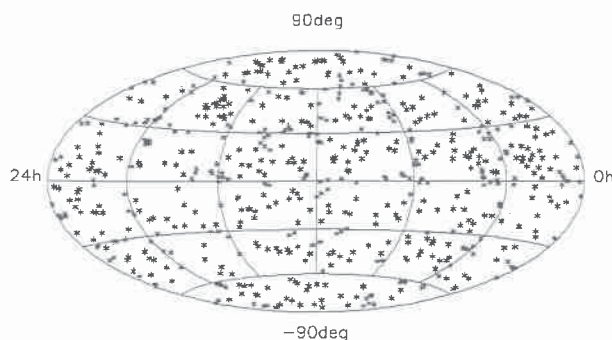


Figure 1. La réalisation du Système céleste de référence de l'IERS, en cours d'adoption par l'Union Astronomique Internationale. Le repère de référence comprend plus de 600 radiosources observées par VLBI. 90% ont une position connue à mieux qu'une milliseconde de degré près.

LES IRRÉGULARITÉS DE LA ROTATION DE LA TERRE ET L'ÉCHELLE DE TEMPS UTC

Le mouvement de la rotation terrestre est perturbé par de nombreux effets, dont les plus importants sont dus aux variations du régime des vents, à des variations de courants à l'intérieur du noyau de la Terre et à l'action de la Lune et du Soleil.

- L'atmosphère tourne un peu plus vite que la Terre solide, d'où une dominante des vents d'ouest (30 à 40 km/h en moyenne). L'atmosphère et la Terre solide échangent leur énergie cinétique de rotation de telle façon que la somme reste constante (principe de conservation de l'énergie cinétique). Si le vent moyen était nul, la Terre tournerait un peu plus vite, et le jour serait plus court de 2 millisecondes. Le cycle saisonnier des vents entraîne des variations de plus ou moins 1 milliseconde de la durée du jour.

- La Terre possède un noyau liquide de 3 500 km de rayon. La circulation lente dans le noyau est responsable de la dérive du champ magnétique observée à la surface terrestre ; ses irrégularités induisent des changements de vitesse de rotation (encore le principe de conservation du moment cinétique). Ces variations peuvent atteindre plusieurs millisecondes sur la durée du jour et se produisent deux ou trois fois par siècle.

- Les marées océaniques sont l'occasion d'une dissipation d'énergie par frottement sur le fond ou dans la masse liquide. De ce fait la rotation de la Terre ralentit régulièrement, d'environ 1,5 milliseconde par siècle sur la durée du jour. Ce ralentissement, d'amplitude plus faible que les deux types d'irrégularités précédents, est irréversible et c'est lui qui l'emporte à long terme.

Saut de seconde de UTC le 31 décembre 1995

La dernière minute de l'année 1995 durera 61 secondes. Pourquoi cette modification de l'heure ?

L'échelle du temps universel coordonné UTC (parfois appelé à tort GMT) est la base de temps de toutes les activités dans le monde. C'est une échelle de temps ultrastable délivrée par des horloges atomiques, le Temps Atomique International, TAI.

L'échelle de temps déduite de la rotation de la Terre, le temps universel (UT1) présente des irrégularités qui sont un million de fois plus grandes que celles du Temps Atomique International, d'où la préférence donnée à ce dernier pour assurer la stabilité du temps utilisé universellement.

Le Temps Atomique International est établi par le Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), au Pavillon de Breteuil à Sèvres, à partir d'un parc de plusieurs centaines d'horloges atomiques réparties dans le monde. Le temps des horloges atomiques repose sur le rayonnement électromagnétique lié à une modification interne aux atomes de Césium. Ces horloges ont été développées à partir de 1955 et le TAI a remplacé la rotation de la Terre comme base du temps international à partir de 1972.

On a défini l'origine du TAI de telle sorte qu'il était égal à UT1 le 1 janvier 1958. Le retard sur le temps ato-

mique accumulé depuis lors par l'horloge Terre s'élève à 29 secondes. En adoptant le TAI, on a décidé que l'unité de temps de l'échelle UTC serait la seconde de TAI ; mais on a voulu éviter que UTC s'éloigne indéfiniment du temps de la rotation de la Terre. On a donc aussi décidé que UTC, tout en se déroulant selon la seconde de TAI, serait décalé d'une seconde chaque fois que nécessaire, de façon à éviter que sa différence avec UT1 n'excède une seconde. Depuis l'instauration de ce système, la Terre ayant tourné trop lentement, on a dû ajouter à 18 reprises une seconde à UTC (voir Figure 2).

Les sauts de seconde de UTC sont programmés soit avant un 1er janvier, soit avant un 1er juillet à 0 heure. La décision d'effectuer un tel saut appartient au Bureau Central de l'IERS. Cette décision est annoncée plusieurs mois à l'avance et mise en œuvre par les autorités nationales responsables de la diffusion du temps. L'organisme français concerné est le Laboratoire Primaire du Temps et des Fréquences du Bureau National de Métrologie (LPTF, à l'Observatoire de Paris).

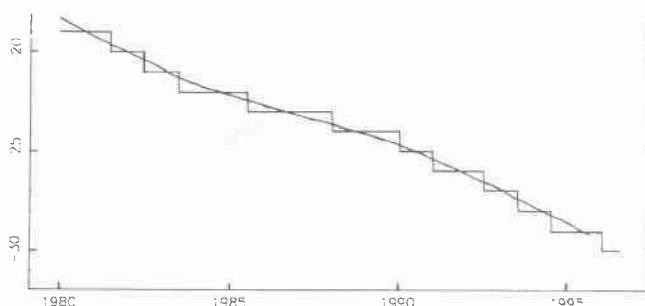


Figure 2. Les échelles de temps UT1 et UTC comparées au Temps Atomique International TAI depuis 1980, en secondes. UTC-TAI est défini comme une fonction en escalier à sauts de 1 seconde, approchant UT1 - TAI à mieux que $\pm 0,9$ secondes.

LA CRÉATION ET LA MAINTENANCE DU SYSTÈME DE RÉFÉRENCE TERRESTRE INTERNATIONAL

Vers 1980, la situation des références terrestres globales se résumait à l'existence de deux repères mal reliés l'un à l'autre : les coordonnées géodésiques du réseau de poursuite des satellites Transit (WGS72), et les coordonnées astronomiques du réseau Bureau International de l'Heure (BIH) pour l'observation de la rotation de la Terre. Le rattachement entre les deux repères avait une précision de l'ordre du mètre. C'est alors que le BIH proposa aux instances scientifiques internationales de confier au service chargé de la détermination de la rotation terrestre la définition et la maintenance d'un système de référence géodésique fondé sur les programmes globaux d'observation de rotation de la Terre par les méthodes de géodésie satellitaire et par VLBI. Dans le cadre d'une coopération entre l'IGN et l'Observatoire de Paris (siège du BIH), on développa les conceptions et les procédures qui conduisirent à quelques réalisations expérimentales démontrant la faisabilité d'un repère terrestre unifié, dont l'exactitude et la précision de départ étaient au niveau du décimètre. Ces premiers résultats valurent à l'équipe d'être chargée officiellement de la définition et de la maintenance du repère terrestre conventionnel international lors de la création de l'IERS. Aujourd'hui, l'International Terrestrial Reference Frames (ITRF), étendu et amélioré

chaque année par l'IGN, est devenu la référence terrestre universelle. La figure 3 montre la plus récente réalisation de l'ITRF.

Dès le stade expérimental dans le cadre du BIH, le repère terrestre élaboré à l'IGN avait été adopté comme référence pour d'autres travaux :

- le système terrestre conventionnel WGS84 de la Defense Mapping Agency des Etats-Unis ;
- des systèmes géodésiques régionaux majeurs (NAD84 aux Etats-Unis, EUREF en Europe) ;
- le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde (CCDS) a adopté l'ITRF comme référence pour les comparaisons d'horloges à distance (1989).

Les utilisateurs cités ci-dessus étaient relativement peu exigeants sur la précision mais avaient un besoin important soit de globalité, soit d'exactitude, ce qui explique la rapidité de leur rattachement. La décennie 1990, avec les améliorations importantes mentionnées plus haut et la confiance croissante dans les travaux de l'IGN du fait de la discussion permanente avec les spécialistes mondiaux ont convaincu les utilisateurs de pointe d'adopter l'ITRF :

- dès sa mise en place, le système DORIS a été exploité dans le repère ITRF. Depuis 1994 il est en cours

d'intégration dans l'IERS ;

- le programme franco-américain océanographique Topex/Poséidon a adopté officiellement l'ITRF comme référence terrestre ;

• l'IGS a fait plus qu'adopter l'ITRF : dans le cadre de la coopération étroite entre l'IERS et l'IGS, l'IGN est responsable du traitement du repère terrestre commun aux deux services. L'IGS fournit l'orbite précise des satellites GPS dans l'ITRF ;

- la révision en cours de WGS84 comporte un rattachement de haute précision à l'ITRF ;

• dans le cadre des programmes internationaux à visée climatique, l'ITRF a été retenu comme référence pour la surveillance du niveau des mers.

Last but not least, le Réseau de Référence Française (RRF) est aussi rattaché à l'ITRF.

En conclusion, on peut dire que l'IERS est un exemple spectaculaire de ce que peut réaliser la coopération internationale entre scientifiques qui ont compris qu'ils reçoivent autant qu'ils donnent dans une telle entreprise. Grâce à l'IERS, tout utilisateur peut avoir accès à des systèmes de référence universels de la qualité ultime existant à une date donnée.

Figure 3. Le repère terrestre international de référence ITRF, maintenu par l'IGN. L'édition 1995 comporte plus de 300 stations d'observation dans 240 sites différents. La précision de positionnement de ces stations se situe dans une fourchette de 5 à 15 mm, les vitesses de déplacement étant estimées avec une précision de l'ordre du mm/an pour les meilleures.

