

La genèse du Système International de Référence Terrestre (ITRS)

■ Claude BOUCHER

L'histoire de la géodésie met en évidence plusieurs périodes démarquées par l'émergence de nouvelles techniques. Ainsi, l'apparition des méthodes de triangulation vers 1533 fut à l'origine du développement des réseaux géodésiques, que le lancement en 1959 du premier satellite artificiel remit en cause, en ouvrant l'ère de la géodésie spatiale. Voir par exemple Levallois (1988) ou Boucher, Willis (2015)

C'est plus précisément l'évolution des concepts de systèmes de référence géodésiques et de leurs réalisations qui est l'objet de cet article, passant de l'astronomie géodésique à la géodésie spatiale.

Les références terrestres par astrométrie

L'utilisation de méthodes astronomiques a été prépondérante pendant plusieurs siècles. Est-il besoin de rappeler l'importance des progrès pour la détermination des latitudes et longitudes astronomiques, notamment pour la navigation et l'exploration.

Ces méthodes jouaient par ailleurs un rôle crucial dans les méthodes de triangulation.

C'était en effet la confrontation des données astronomiques aux données géodésiques dans l'établissement d'arcs méridiens qui fournissait l'estimation de la forme de la Terre, traduite notamment par la détermination des dimensions d'une succession d'ellipsoïdes. Mais les données astronomiques restaient par ailleurs indispensables pour l'établissement des réseaux géodésiques :

- Elles fournissaient nominalement les valeurs des coordonnées adoptées pour le point fondamental
- Elles assuraient l'orientation du réseau grâce à des stations de Laplace (où étaient déterminés latitude, longitude et azimut astronomiques)

Au point de vue théorique, le système

de référence terrestre était lié au système céleste par une transformation incluant précession, nutation et rotation de la Terre. Ce qui est d'ailleurs toujours valide.

Un point essentiel fut alors la prise en compte progressive de divers phénomènes, au fur et à mesure des progrès métrologiques et observationnels. On mentionnera principalement les déviations de la verticale, signature des irrégularités du champ de pesanteur terrestre, et plus récemment les irrégularités de la rotation diurne de la Terre (mouvement du pôle, variations du temps universel UT).

La nécessité d'observations permanentes pour suivre ces irrégularités donna lieu à la création en 1895 du Service international des latitudes (ILS) qui visait spécifiquement les mouvements du pôle.

En parallèle, la nécessité d'une coordination internationale pour l'établissement d'une heure universelle fut à l'origine de la décision de créer le Bureau International de l'Heure (BIH), prise en 1912 lors d'une conférence internationale réunie à Paris sur invitation du Bureau des longitudes. Le BIH, hébergé par l'Observatoire de

MOTS-CLÉS

Système de référence terrestre, astrométrie, géodésie spatiale, ITRS, ITRF, BIH, historique

Paris ne fut officiellement mis en place qu'en 1919 après la Première guerre mondiale et constitua l'organe exécutif de la Commission internationale de l'heure établie en 1920 par l'Union Astronomique Internationale (UAI). Il devint par ailleurs en 1956 l'un des services de la Fédération des services astronomiques et géophysiques (FAGS) du Conseil des unions scientifiques internationales (ICSU).

L'un des produits fondamentaux réalisés par le BIH était le Temps universel, corrigé du mouvement du pôle, UT1, ce qui nécessitait de disposer rapidement d'une estimation de ces mouvements. Or les résultats fournis par l'ILS, puis par le service international qui lui succéda en 1962 (Service international du mouvement du pôle (IPMS) situé à Mizusawa au Japon) l'étaient avec des délais incompatibles avec les besoins du BIH. Ce dernier décida alors d'établir un service rapide de détermination du pôle, en collectant un ensemble global d'observations astrométriques de précision (astrolabes et Photo Zenith Tubes PZT). Le BIH fournit ainsi à partir de 1967 des valeurs du mouvement du pôle et UT1 selon un algorithme traitant des mesures astrométriques (UT et latitude), ceci exprimé dans un système cohérent dit "1968 BIH system".

Dans ce cadre, le système de référence terrestre rattaché à ces déterminations était le système dit CIO-BIH, système géocentrique dont l'axe Z passait par le pôle de référence CIO. Ce système était notamment réalisé par le repère constitué de l'ensemble des stations astrométriques contribuant au BIH, avec leurs coordonnées astronomiques associées, c'est-à-dire les directions des verticales locales à chaque station.

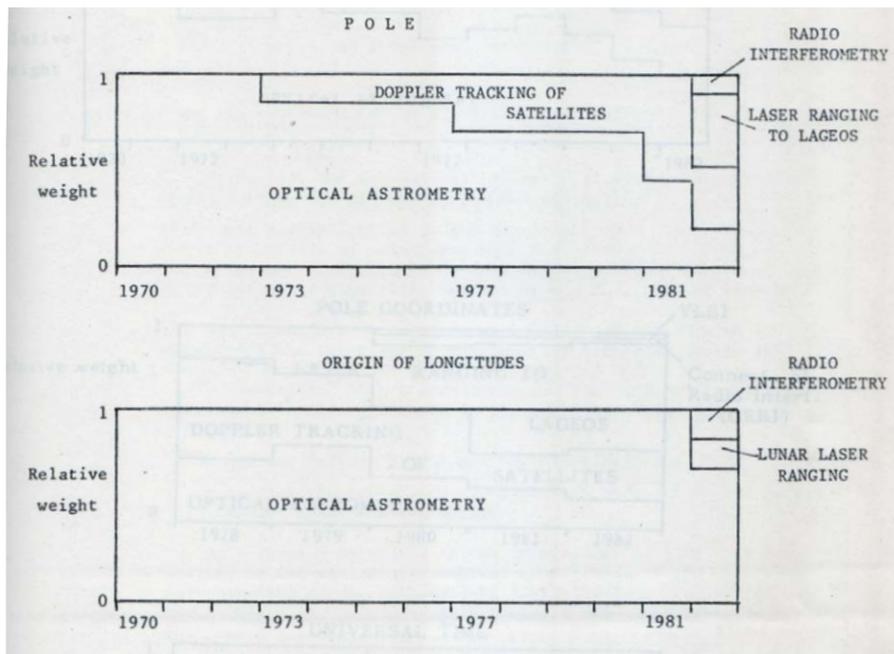


Figure 1. Contribution relative de l'astrométrie et des techniques spatiales dans la détermination des paramètres de rotation de la Terre faite au BIH

► L'émergence de la géodésie spatiale

Le développement de l'utilisation du système de navigation américain Transit ou NNSS fut une étape décisive, à plusieurs égards. À côté du système opérationnel mis en œuvre par la Marine des USA, un laboratoire de recherche (*Naval Weapons Laboratory de Dahlgren* en Virginie) menait un ensemble de travaux sur l'amélioration des traitements des données de ce système, sous la conduite de Richard Anderle. En particulier, il déterminait des produits de précision, s'appuyant sur un réseau global de stations (TRANET), notamment des éphémérides précises des satellites Transit. C'est dans ce cadre qu'ils essayèrent avec succès l'estimation simultanée des paramètres du pôle. Anderle, Beuglass (1970).

Ceci permit au BIH d'utiliser dès 1973 ces déterminations Doppler de manière opérationnelle, en plus des données astrométriques.

En parallèle aux techniques Doppler, d'autres techniques spatiales commençaient également à fournir des estimations de la rotation de la Terre, à savoir la télémétrie laser sur satellites et sur la Lune, ainsi que la radiointerférométrie à longue base (VLBI), qui

furent introduites dans les traitements du BIH à partir de 1982 (Figure extraite du Rapport annuel du BIH pour 1982).

Le projet MERIT

L'apport des techniques spatiales était devenu un sujet de discussion important au sein de la communauté internationale, notamment astronomique. Et comme vu à l'instant, leur contribution à la détermination de la rotation de la Terre était un sujet particulier. C'est ainsi qu'à l'occasion d'une réunion en 1978 à San Fernando (Colloque IAU 82 Time and Earth rotation) que fut lancée l'idée d'un projet international consacré à ce thème, et fut



Figure 2. Antennes VLBI

créé un groupe de travail pour organiser ce projet, dirigé par George Wilkins. Ainsi fut créé MERIT (*Monitoring Earth Rotation and Intercomparison of Techniques*). Voir Wilkins (1988).

L'objectif de MERIT était de comparer les techniques susceptibles de contribuer à la détermination de la rotation de la Terre. Les techniques retenues dans le projet furent :

- L'astrométrie optique
- La télémétrie laser sur satellite (Lageos)
- La télémétrie laser sur la Lune
- Les mesures radioélectriques Doppler sur satellite (Transit)
- Le VLBI
- La radiointerférométrie connectée (CEI)

Le projet fut formellement soutenu par l'Union Géodésique et Géophysique Internationale (UGGI) et plus précisément l'Association Internationale de Géodésie (IAG), lors de l'Assemblée générale de Canberra en 1979.

L'un des objectifs de MERIT fut de stimuler les observations des diverses techniques, à travers l'organisation de deux campagnes internationales :

- "Short campaign" du 1^{er} août au 31 octobre 1980
- "Main campaign" du 1^{er} septembre 1983 au 31 octobre 1984

MERIT donna par ailleurs lieu à une organisation complexe avec de multiples intervenants. On retiendra notamment que le BIH y joua le rôle de centre opérationnel, sous la direction de Martine Feissel.

Les travaux associés à MERIT furent discutés principalement à l'occasion de trois réunions internationales à Grasse en 1980, Herstmonceux en 1983 et Columbus en 1985.

Un nouveau repère terrestre réalisé par géodésie spatiale

Les traitements de techniques spatiales qui fournissaient des déterminations de la rotation de la Terre permettaient également d'estimer des données qui réalisaient les systèmes terrestres et célestes. Pendant les années 80, et notamment grâce aux



travaux suscités par MERIT, le thème des systèmes de référence et de leurs relations connut une sorte de refondation.

C'est dans ce contexte que Bernard Guinot me contacta pour examiner ensemble s'il était concevable de réaliser un repère terrestre constitué de positions de stations de géodésie spatiale. Les concepts ainsi dégagés et la méthode d'analyse furent présentés lors d'une réunion internationale à Sopron en 1984 (Boucher, Feissel (1984)).

C'est l'origine du BTS84 (BTS pour *BIH Terrestrial System*), déterminé dans le cadre d'une collaboration naissante entre l'Observatoire de Paris (BIH) et l'IGN (Service de géodésie), et publié dans le Rapport annuel du BIH pour 1984 (Boucher, Altamimi (1985)). Cette solution fut la première mise en application de la méthode mentionnée, utilisant deux solutions VLBI (NGS et JPL), une solution laser Lune (JPL), une solution laser satellite (CSR) et une solution Doppler (stations déterminées avec Ephémérides Précises Transit et archivées par la DMA). C'est l'occasion de citer les principaux organismes qui déterminèrent les premières solutions globales de mesures de géodésie spatiales (D : Doppler, L : SLR ou laser satellite, M : LLR ou laser Lune, R : VLBI)

- CSR : *Center for Space Research*, Austin TX (L)
- DMA : *Defence Mapping Agency* (D)
- JPL : *Jet Propulsion Laboratory*, Pasadena CA (M et R)
- NGS : *National Geodetic Survey*, Rockville MD (R)



Figure 3. Une station Doppler (JMR-1)

Création et développements de l'IERS

Le projet MERIT permit de dégager un certain nombre de conclusions, et notamment des recommandations soumises à l'UAI et l'UGGI (dont IAG). Le résultat majeur fut sans conteste la création d'un nouveau service international, *International Earth Rotation Service* (IERS), chargé des définitions et réalisations primaires des références célestes et terrestres, ainsi que de leur relation, via la rotation de la Terre, précession et nutation. Ce service entra en activité début 2008, et parallèlement les services BIH et IPMS cessèrent leur activité.

Le cœur de l'IERS était un Bureau central résidant à Paris, et assuré par une collaboration tripartite entre le Bureau des longitudes (volet système céleste animé par Jean-François Lestrade), l'IGN (volet système

terrestre animé par moi-même) et l'Observatoire de Paris (volet rotation de la Terre et secrétariat de l'IERS, animé par Martine Feissel).

C'est dans ce nouveau cadre que fut déterminée la réalisation primaire du nouveau Système international de référence terrestre, l'ITRS. ITRS, initialement nommé *IERS Terrestrial Reference System*, reçut finalement sa désignation actuelle, *International Terrestrial Reference System*. Le nom de repère de référence international (*international terrestrial reference frame*, ITRF) fut alors adopté pour les futurs produits de l'IERS.

De 1984 à 1987, trois autres réalisations du repère de nouveau type avaient été publiées par le BIH (BTS85, BTS86 et BTS87).

La première réalisation primaire publiée par l'IERS, ITRF88, assura la continuité avec BTS87, notamment pour son orientation.



Figure 4. Station laser de Grasse



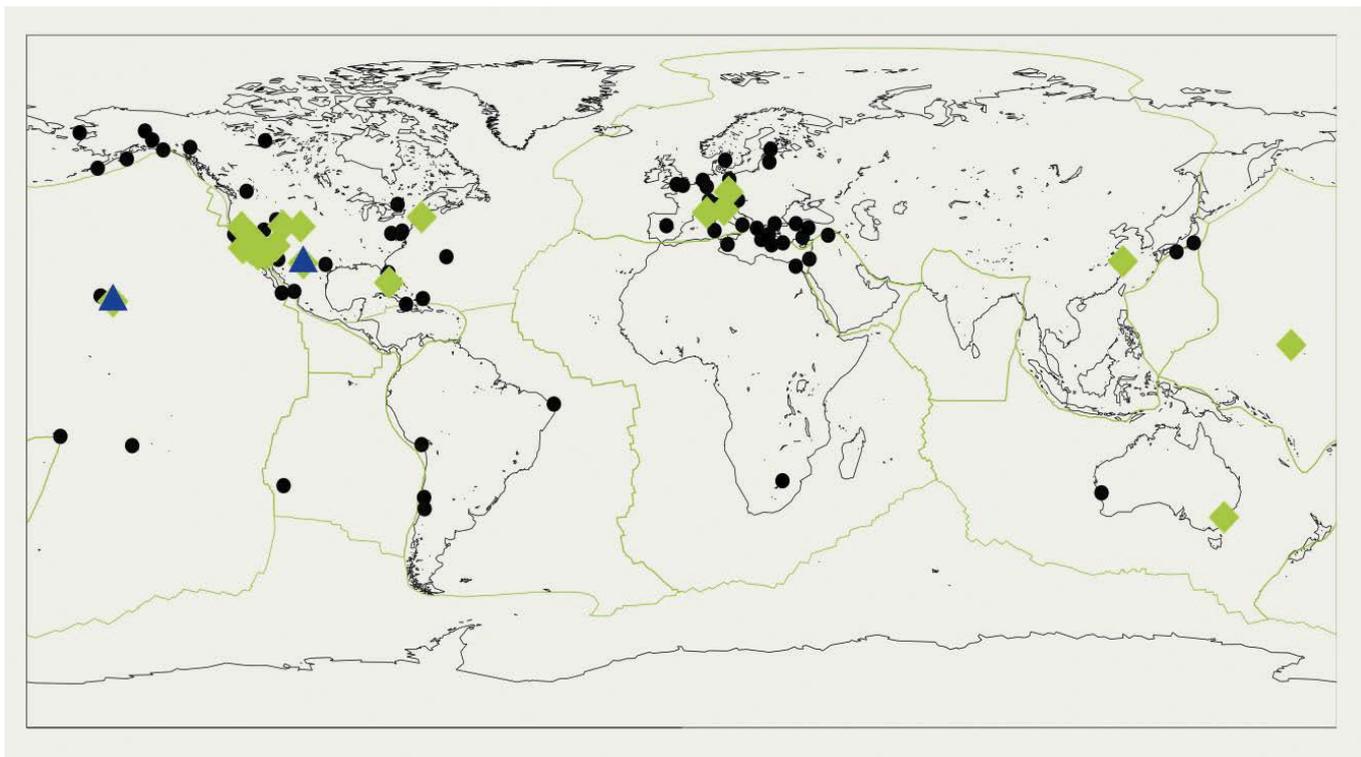


Figure 5. Réseau ITRF88 ● Instrument seul, ▲ Colocation 2 instruments, ◆ Colocation 3 instruments

Depuis cette date, une série de solutions ITRF fut publiée, avec de multiples améliorations concernant aussi bien les données utilisées (notamment usage de GPS et DORIS) que le modèle de traitement, passant ainsi de précisions décimétriques à millimétriques. Voir Boucher, Willis (2015).

La solution actuellement en vigueur est ITRF2008. Une nouvelle solution est en cours (ITRF2014). Voir Altamimi, Collilieux, et Metivier (2011)

Conclusion

Nous nous sommes concentrés dans cet article sur le changement fondamental de la réalisation du système de référence terrestre qui a accompagné l'émergence de la géodésie spatiale. C'est une illustration frappante de l'impact des nouvelles technologies. Est-il nécessaire de rappeler qu'elles ont eu un effet similaire dans les processus de positionnement, avec l'abandon des techniques de triangulation, cheminement, etc. au profit de GPS et plus généralement des systèmes globaux de navigation par satellites (GNSS). Il faut s'attendre que ce type de phénomène se retrouve prochainement, sans doute par l'utilisation d'horloges

atomiques de plus en plus exactes et compactes. ●

Contact

Claude BOUCHER
Bureau des longitudes
claude-boucher@club-internet.fr

Références

Altamimi Z, Collilieux X, Métivier L, (2011), *ITRF2008: an improved solution of the International Terrestrial Reference Frame*, Journal of Geodesy, doi:10.1007/s00190-011-0444-4.

Anderle R.J., Beuglass I.K. (1970)
Bull Geod 96

Boucher C, Altamimi Z (1985) *Towards an improved realization of the BIH Terrestrial Frame*. In: Mueller (ed) *Proceedings of the international conference on Earth rotation and reference frames*, MERIT/COTES Report, vol 2, 31 July-2 August, 1985, Ohio State University, Columbus, OH, USA

Boucher, Feissel (1984), *Realization of the BIH Terrestrial System*, International Symposium on Space Techniques for Geodynamics, Sopron, Hungary, 1984

Boucher, Willis (2015), *Références terrestres*, in *Les références de temps et d'espace*. Un panorama encyclopédique :

histoire, présent et perspectives. Boucher C (coordonné par), Paris, Hermann, sous presse

Levallois (1988), *Levallois J.J., Mesurer la Terre. 300 ans de géodésie française*. De la toise du Chatelet au satellite. Paris, AFT, 1988

Wilkins G.A. (1988), *Review of the achievements of project MERIT for the intercomparison of techniques for monitoring the rotation of the Earth*, in *The Earth's Rotation and Reference Frames for Geodesy and Geodynamics* (Proc. IAU Symp. 128), A.K. Babcock et G.A. Wilkins éd., p. 227-232, Kluwer.

ABSTRACT

The occurrence of space techniques generated drastic changes in astrometric and geodetic activities, both on theoretical and operational aspects. The case of geodetic reference system discussed in this document, describing the changes in concepts of terrestrial reference systems, and their realisations, and the key rôle of the Bureau International de l'Heure (BIH) both in the transition from CIO/BIH system to BTS/ITRS, and the creation of the International Earth rotation service (IERS)