

40 ans de géodésie à l'IGN¹

1^{re} partie : la géodésie spatiale

■ Françoise DUQUENNE

La géodésie est une science qui étudie la forme et les dimensions de la Terre ainsi que son champ de pesanteur. Le cœur de métier de la géodésie à l'IGN est de définir des systèmes de référence terrestre et de mettre en place les infrastructures qui permettent à tout utilisateur de se géoréférencer, c'est-à-dire d'obtenir des coordonnées dans une référence nationale, continentale ou mondiale selon le contexte.

Avec l'arrivée des satellites artificiels, l'évolution de la géodésie a fait un bond de géant. L'ouvrage "Mesurer la Terre : 300 ans de géodésie française" coordonné par Jean-Jacques Levallois [23], est toujours un des best-sellers de l'AFT, publié de 1983 à 1988, sous forme d'articles dans les numéros 16 à 37 de la revue XYZ, il fut ensuite édité sous forme d'ouvrage en collaboration avec les presses de l'école des ponts et chaussées en 1988. Cet article se propose de rappeler les évolutions de la géodésie à l'IGN non pas en détails comme dans l'ouvrage [23] mais en faisant référence aux articles publiés dans XYZ et téléchargeables [27], ainsi qu'à une bibliographie fournie qui permettra d'approfondir les sujets abordés.

Introduction

Le rôle de l'IGN a été depuis sa création en 1940, et en continuité avec le SGA (Service géographique de l'armée), de réaliser le système de référence terrestre national, la NTF (Nouvelle triangulation française), en mettant en place les infrastructures (bornes géodésiques) permettant aux utilisateurs d'y accéder. Après la guerre, l'IGN participe dès le début à l'élaboration du système de référence terrestre européen (ED50).

Déjà évoqué dans les chapitres XVI et XVII [23], le lancement de satellites artificiels autour de la Terre, engendrant la géodésie spatiale, a été l'évolution majeure et déterminante pour la géodésie de ces quatre dernières décennies. La géodésie spatiale aura pendant cette période permis de passer d'une géodésie nationale ou continentale à une géodésie mondiale.

Dès l'origine, en France, les acteurs principaux de la géodésie ont compris

(1) IGN : l'Institut géographique national rebaptisé en 2012 Institut national de l'information géographique et forestière

MOTS-CLÉS

Géodésie, spatial, Laser, GNSS, systèmes de référence, RGP, EPN, IGS, ITRF, ETRF

l'importance de créer une structure collaborative et c'est ainsi qu'en 1971, le GRGS (Groupe de recherche de géodésie spatiale [33]) est créé par les présidents et du Bureau des longitudes (BDL) et du Centre national d'études spatiales (CNES), et les directeurs de l'Institut géographique national (IGN), de l'Observatoire de Paris (OP) pour une collaboration scientifique efficace dans le domaine de la géodésie spatiale. Ils seront rejoints ensuite par le Service hydrographique et océanographique de la marine (SHOM), l'Institut des sciences de l'univers (INSU), l'Observatoire Côte d'Azur (OCA), l'observatoire Midi-Pyrénées (OMP), l'École et observatoire des sciences de la Terre (EOST), le Conservatoire national des arts et métiers (CNAM), l'Université de Polynésie française (UPF).

Le rôle de l'IGN de ces dernières décennies a donc été de réaliser un nouveau système de référence terrestre qui soit compatible avec les nouvelles technologies de positionnement par satellites et ce dans un contexte européen et mondial.

L'ouvrage collectif du Bureau des longitudes "Les références de temps et d'espace" [7] coordonné par Claude Boucher est conseillé à tous ceux qui voudraient aborder au niveau scientifique les concepts de systèmes de référence terrestre et céleste.

Aujourd'hui, les infrastructures mises en place et les développements du matériel d'observation offrent aux utilisateurs la possibilité de se positionner en temps réel avec une exactitude et une précision centimétrique dans un système de référence terrestre bien défini élargissant le champ des applications possibles.

Les premiers pas en géodésie spatiale [23] [21]

Bien que le but de cet article soit l'évolution depuis la création de l'AFT, rappelons ici le début de la géodésie spatiale en remontant brièvement presque 20 ans plus tôt.

Dès le lancement des premiers satellites, la première préoccupation fut de suivre leurs trajectoires en les observant à partir de stations terrestres. Inversement l'idée de se positionner sur terre à partir des satellites est vite devenue une évidence.

■ La triangulation spatiale

Dès 1961, la première technique de géodésie spatiale consistait à observer

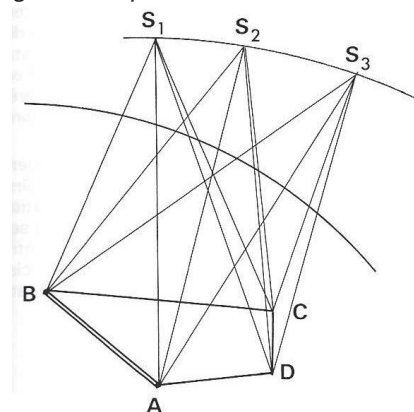


Figure 1. Triangulation spatiale [23]

©: Marcel D.



Figure 2. Chambres balistiques IGN - Station de Fort-Lamy (1968)



Figure 3. Satellite ECHO-I (NASA)



par photographie sur fond d'étoiles le passage de satellites réflecteurs ou émetteurs de lumière (figure 3), simultanément en plusieurs lieux sur Terre, ce qui permettait de positionner ces lieux l'un par rapport à l'autre avec une précision de quelques mètres. Cette méthode nommée triangulation spatiale était purement géométrique (figure 1) et ne faisait pas intervenir dans les calculs l'orbite du satellite.

L'IGN développe alors ses propres chambres balistiques (figure 2). La triangulation spatiale permet de faire les premières liaisons entre des territoires lointains et c'est ainsi que l'IGN mena des campagnes de liaison entre la France et l'Algérie (1963), l'Europe et l'archipel des Açores (1965), l'Europe et l'Afrique (1968).

A la fin des années 60 commence la télémétrie laser, avec des tirs au laser sur satellites. Une mission CNRS/IGN, permet de comparer cette nouvelle méthode avec la méthode de photographie sur fond d'étoiles à l'occasion du rattachement de la Corse au continent. La concordance était de l'ordre du mètre.

Une autre campagne de recherche coopérative (PCP133), lancée en 1967 par le CNRS en collaboration avec l'IGN

consiste en une jonction entre l'Europe, l'Afrique et l'Amérique du Sud en utilisant les deux techniques (figure 2). Les résultats publiés définitivement en 1973, montrent une précision de 10^{-5} rd sur les directions spatiales, 2 mètres sur les mesures de distances, et 5 mètres sur les coordonnées.

La géodésie spatiale dynamique

La photographie sur fond d'étoiles est abandonnée à la fin des années soixante et alors commence la géodésie spatiale dynamique. Le satellite n'est plus considéré comme une cible, mais son mouvement et donc ses coordonnées à tout instant (trajectoire) sont considérées dans les équations, soit comme inconnues comme les coordonnées des stations d'observations, soit comme paramètres connus (éphémérides).

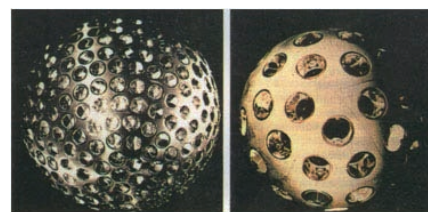
Dès lors orbitographie ou positionnement terrestre deviennent indissociables, les domaines traités vont comprendre aussi la rotation de la Terre, le champ de pesanteur, la propagation des ondes dans l'atmosphère. La première préoc-

cupation est de définir un système de référence terrestre géocentrique tridimensionnel dans lequel seront exprimées les coordonnées des stations terrestres et les positions de satellites, afin d'écrire les observations de géodésie spatiale. Les observations entre le sol et le satellite sont de différents types : télémétrie laser, ou sur ondes radio (effet doppler, différence de phase, code, etc.)

La télémétrie laser

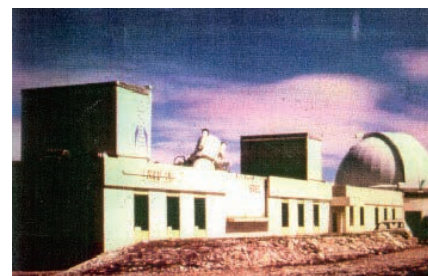
La télémétrie Laser utilise soit des satellites dédiés (figure 4), soit des réflecteurs installés sur des satellites, ainsi que les réflecteurs installés sur la Lune par les missions spatiales Apollo (USA) et Luna (ex URSS).

L'observatoire de Paris installe l'observatoire astronomique de Calern en 1970, (figure 5) avec la première station permanente laser-satellite fran-



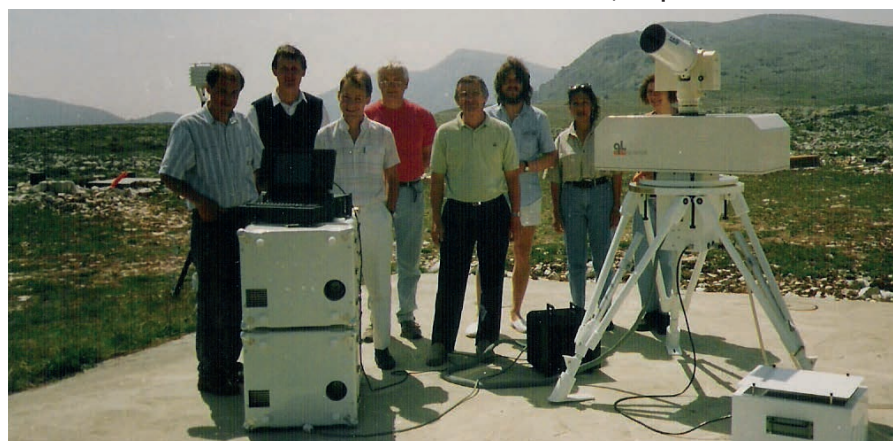
© CNES

Figure 4. Satellites Starlette et Stella lancés en 1975 et 1993 par le CNES



© CERGA-IGN

Figure 5. Observatoire de Calern : laser-satellite, coupole laser-lune



© CERGA-IGN

Figure 6. La Station Laser Ultra-Mobile française (FTLRS). A gauche, ses deux concepteurs, F. Pierron et M. Kasser

çaise. Le laser-lune, dont la mise au point demanda une dizaine d'années entra en fonctionnement continue en 1982. Le CERGA (Centre d'études et de recherches en géodynamique et en astrométrie) est créé en 1988.

Ce site deviendra l'un des sites fondamentaux de la géodésie spatiale mondiale avec ses nombreuses stations d'observation spatiale et l'IGN y assura le rattachement métrologique des différents instruments (figure 16).

Une collaboration entre l'IGN, le CNES et le CERGA aboutira à la fabrication d'une station laser-satellite ultra-mobile (figure 6).

■ L'arrivée des satellites de navigation

Le principe général est la mise en place d'une constellation de satellites en orbite haute qui émet vers la Terre des signaux radio-électriques, et des récepteurs au sol qui effectuent des mesures sur les signaux reçus permettant d'obtenir des distances (ou différences de distances) entre le satellite et le récepteur au sol. Le signal émis par le satellite contient un message avec des paramètres d'orbite et des décalages d'horloge qui permettent de calculer une position au sol en temps réel. La précision de cette position, qualifiée de navigation, n'est pas suffisante pour la géodésie et très vite des méthodes de positionnement relatif sont développées et des réseaux géodésiques déterminés par ces méthodes.

Le système satellitaire Transit est mis en place par la Défense américaine et mis à disposition des civils dès 1967. Le principe est la mesure Doppler par des récepteurs au sol ou en mer d'un signal radio bi-fréquence émis par le satellite.



Figure 7.
Récepteur
Transit JMR
(Gabon 1977)

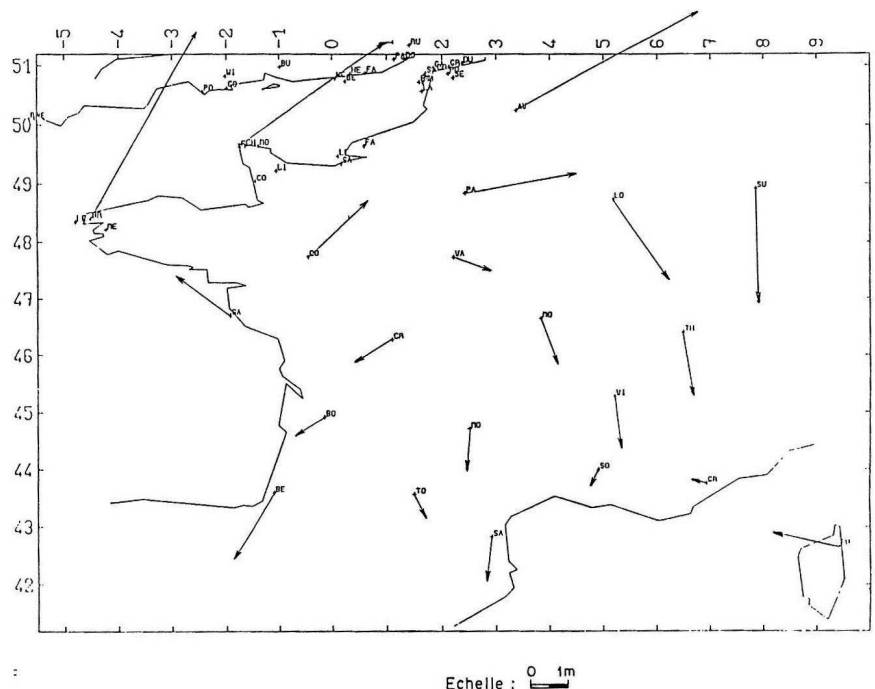


Figure 8. Résidus de la transformation WGS72 → NTF [23]

Ce système est rapidement utilisé pour la navigation par le SHOM puis dès 1972 par l'Observatoire de Paris (OP), pour la détermination des coordonnées du pôle. Dès 1974 l'IGN s'équipe de 6 récepteurs géodésiques, pour l'établissement de réseaux géodésiques matérialisés.

Dans le cadre du réseau géodésique européen, l'IGN effectue des observations Doppler sur des points anciens : EDOC-1 (1975), EDOC-2 (1977), EDOREF (1978-79).

Les premières missions d'observations Doppler (EDOREF) sur le réseau NTF permettront de calculer une transformation générale (translation de plusieurs centaines de mètres) sur la France entre la NTF sur le système WGS72 dans lequel sont exprimées les orbites des satellites. La figure 8 montre les résidus de la transformation jusqu'à 4 mètres, confirmant des défauts d'échelle et d'orientation de la NTF.

L'IGN crée de nouveaux réseaux géodésiques à l'étranger pour l'équipement de zones désertiques (Libye 1977), puis dans le désert Rub Al Kali en Arabie saoudite (RAK1980) (figure 10). Il s'agit alors de combiner les observations Doppler sur Transit avec les techniques de géodésie classique et d'astronomie de position qui n'étaient plus pratiquées depuis un temps certain. Un réseau de



Figure 9. Libye 1977, observations
astronomiques au Wild T4



Figure 10. RAK 1980, observations
astronomiques, mesure du temps

points primordiaux espacés de 200 km, sur lesquels sont pratiquées des observations Doppler sur le système satellitaire Transit avec des récepteurs JMR (figure 7), et des observations astronomiques (hauteurs égales et azimuts sur la polaire) avec des appareils Wild (T4)



© Kern

Figure 11. Astronomie, DKM3A



© Bernard Hamonic

Figure 12. RAK 1980 mesure de distance à l'AGA8.



Figure 13. Distance-mètre laser AGA 8 (Geodimeter)



(figure 9) et Kern (DKM3A) (figure 11). Les coordonnées géographiques astronomiques (longitude et latitude) sont déterminées par l'astronomie, les coordonnées géographiques géodésiques par la géodésie spatiale.

Il faut ici préciser que le système Transit n'était pas très performant, comme il y avait peu de satellites à observer il fallait faire des prédictions de passage, et les



© Claude Jacques

Figure 14. RAK 1980 : Azimut au DKM3A

observations n'étaient possibles que quelques heures par jour.

Entre ces points des cheminements géodésiques de 20 kilomètres de côtés sont observés au Wild (T3) et distance-mètre laser Aga8 (figure 12 et 13), avec des observations zénithales réciproques et simultanées sur projecteurs pour la détermination des altitudes.

L'orientation des cheminements était assurée par les mesures d'azimuts astronomiques (figure 14), corrigés de la déviation de la verticale.

Les calculs étaient traditionnels avec intégration de la déviation de la verticale (station de Laplace) et dans le référentiel géodésique national. Le système Transit permettait de calculer la ligne de base entre deux points distants de plusieurs centaines de kilomètres avec une précision de quelques décimètres par la méthode de calcul par arcs courts qui était nouvellement développée à l'IGN. Enfin l'IGN participe activement au réseau Africain ADOS en 1982-1983 avec l'observation de 70 stations Doppler sur 300 et participe aux calculs.

Les GNSS [12]

Dès 1986 les géodésiens commencent à s'intéresser au système GPS, qui succède au système Transit et qui ne sera déclaré opérationnel par le département de la Défense américain que le 27 avril 1995.

La société française SERCEL [4] développe un récepteur mono-fréquence le TR5S en collaboration avec l'IGN qui le

mettra en production pour les missions aux Antilles (1988), Guyane (1991) et le tunnel sous la Manche (1987). Ce récepteur mono-fréquence s'avère insuffisant pour la géodésie et l'IGN s'équipe de récepteurs bi-fréquence Ashtech pour toutes ses missions d'observations en France ou à l'étranger à partir de la mission Yemen (1992-1997) (figure 15).

En France métropolitaine, l'établissement du réseau matérialisé NTF (Nouvelle triangulation française) s'achève en 1991, avec la mission dans les Landes qui bat des records de hauteurs cumulées de signaux géodésiques et marque la fin d'une époque. Les premières observations GPS sur le réseau NTF confirment ses déformations par rapport au système WGS84 dans lequel les orbites GPS sont données. Cela voulait dire que la mise en référence NTF détériorait les résultats GPS et forçait l'utilisateur non averti à faire lui-même le changement de système.

En 1989, suivant la recommandation du CNIG (Conseil national de l'information géographique) [10] qui représente ses utilisateurs, l'IGN décide de moderniser son réseau géodésique et lance le RGF (réseau géodésique français) et observe par GPS entre 1993 et 1996 [24] un réseau de points matérialisés. Le RRF (Réseau de référence français : 24 sites) est observé par GPS en 1993 et 1994 dans le contexte européen EUREF (European Reference Frame), le site géodésique de Grasse étant à l'observatoire de la Côte d'Azur et opérant des



© Cosquer G.

Figure 15. Yemen 95 - Récepteur GPS Ashtech

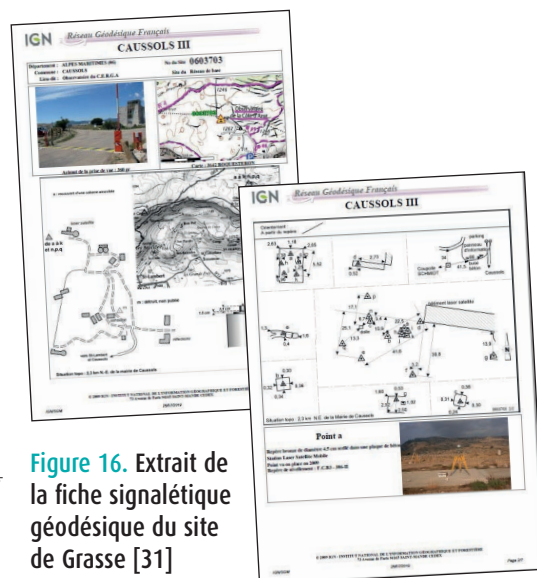


Figure 16. Extrait de la fiche signalétique géodésique du site de Grasse [31]



tirs Laser sur satellites et sur la Lune et les trois sites de Brest, Toulouse et Grasse ayant aussi été observés en VLBI (*Very Long Base Interferometry*) à l'aide de radiotélescopes mobiles américains. Puis le RBF (1 008 sites) est observé en GPS, en statique géodésique [12] avec des lignes de base de 25 km de longueur. Les coordonnées seront publiées en 1997, elles constitueront la première réalisation du système de référence RGF93.

Les territoires français d'outre-mer seront eux aussi équipés de réseaux géodésiques par observations GPS et de nouveaux systèmes de référence terrestre définis : Guadeloupe (1990 puis 2008), Martinique (1993 puis 2008), Guyane (1995 puis 2005), Mayotte (2003), Saint-Pierre-et-Miquelon (2005), Terres australes et antarctiques françaises (2007).

Le réseau RGF était à peine terminé que déjà apparaissent les stations permanentes. L'intérêt est que l'utilisateur n'a plus besoin d'installer un récepteur sur un point géodésique matérialisé, mais il récupère les observations d'une ou plusieurs stations permanentes et effectue les calculs en les combinant avec ses propres observations.

La première station GPS permanente est installée en France par le CNES en 1996 sur le site de Grasse. Le RGP (réseau GPS permanent) est mis en place par l'IGN dans un large partenariat public-privé [CNRS (universités, observatoires), CNES, communautés urbaines, D3E, Exagone, Satinfo, coop&tech, ports...], avec des stations permanentes installées pour des objectifs divers et variés allant de la géophysique à l'agriculture. Il couvre tous les territoires français y compris l'outre-mer. L'IGN met en place le service RGP qui centralise les observations, exécute des calculs horaires de contrôle et diffuse sur le site web les fichiers horaires des observations en format Rinx et produit des séries temporelles (*figure 17*), des paramètres qualités ainsi que des paramètres atmosphériques.

Seules 24 stations seront installées par l'IGN qui assurera une assistance à l'installation de nombreuses autres stations partenaires en particulier pour le rapatriement des données ainsi que la mise en référence nationale. Le RGP est libre d'accès pour tout utilisateur et pour des calculs en temps différé. C'est dans le cadre du CNIG et plus particulièrement de la commission

PSD (positionnement statique et dynamique) et son groupe de travail RGP que l'IGN recueille les besoins des utilisateurs et noue ses partenariats.

La durée d'observations des utilisateurs dépend de la distance à la station permanente, et le mode de calcul avec éphémérides précises pour les distances longues (> 25 km) demande une expertise aux utilisateurs. Par contre, au fur et à mesure l'installation des stations, la diminution des distances et la généralisation de la mise à disposition sur le RGP de fichiers horaires d'observations cadencées à la seconde autorisent des positionnements plus rapides. Ce n'est cependant pas suffisant et les premiers récepteurs GPS pour le positionnement précis en temps réel apparaissent, ce qui évite à l'utilisateur la phase de calcul. Le positionnement GPS se démocratise. Les premières méthodes "temps réel" consistaient à installer une station dans le chantier, pendant sa durée, et à déterminer ses coordonnées dans le RGF93 en enregistrant les observations pour les calculer en utilisant des stations RGP les plus proches.

Dès 2003, la question de l'évolution pour une diffusion temps réel sur le RGP est posée, et il est décidé que c'était plutôt du ressort des partenaires de l'IGN, les réseaux temps réel demandant un investissement important, étaient un service *a priori* payant et donc ne relevant pas du service public. Par contre il était essentiel que le développement de ces réseaux se fassent en concordance avec le RGP qui était la garantie de la mise en référence nationale. C'est ainsi que l'IGN et l'OGE (Ordre des géomètres-experts) établirent un partenariat pour la création du réseau TERIA [19] par la société Exagone, l'IGN assurant un conseil technique pour l'installation et la mise en référence des stations et TERIA fournissant au RGP ses fichiers RINEX horaires d'observation pour une diffusion différée gratuite. Ce partenariat public-privé fut une grande réussite, et les stations Teria sont devenues majoritaires sur le RGP. D'autres réseaux temps réel installés sur les territoires français (S@T-INFO, Lél@, ACTISAT) deviennent partenaires du RGP (*figure 18*).

MARS RGF93.

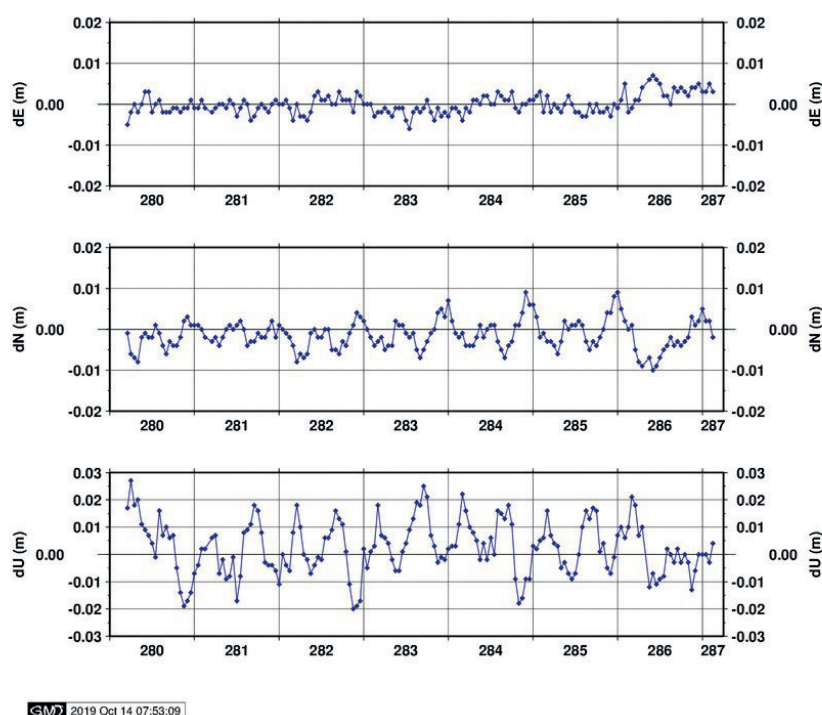


Figure 17. RGP : série temporelle de la station permanente Marseille [35]



Les récepteurs du RGP sont évidemment de différentes marques (Ashtech, Trimble, Leica Geosystems, Topcon/Javad, Septentrio) et au fur et à mesure de la disponibilité des récepteurs GNSS multi-fréquences et multi-constellations, Glonass (Russe), Galileo (Europe), Beidou (Chinois) et SBAS, ils sont intégrés au RGP qui devient alors Réseau GNSS permanent en intégrant les observations Glonass et Galileo dans les fichiers RINEX diffusés. Les calculs horaires permettent de déterminer des paramètres zénithaux troposphériques (ZTD), et à partir de

2005, dans le cadre d'une convention avec Météo-France, l'IGN devient centre de calcul pour le service européen E-GVAP (EUMETNET GNSS Water Vapour Programme). Ainsi, les ZTD issus des calculs GNSS, deviennent des paramètres d'humidité dans l'air que les météorologues introduisent dans leurs modèles.

Les réseaux permanents rendent possibles la détermination des orbites précises du système satellitaire ainsi que les paramètres d'horloge satellite, dans des délais de plus en plus courts permettant de faire des prédictions à court terme. La diffusion de ces paramètres ouvre la voie à une nouvelle méthode GNSS, le PPP (Positionnement Ponctuel Précis) qui

permet à l'utilisateur de se positionner précisément dans le système de référence des orbites avec un seul récepteur GNSS. L'IGN, en calculant ses propres orbites et en adaptant les modules du logiciel de Berne, met en production en interne le PPP pour positionner précisément les prises de vues aériennes puis met à disposition gratuitement un outil de calcul en ligne sur le site web RGP [35]. L'intérêt de cet outil IGN par rapport aux autres est de donner des coordonnées dans les systèmes de référence légaux sur les territoires français.

C'est dans le cadre du CNIG [28] et plus particulièrement de la commission PSD (positionnement statique et dynamique) devenue GEOPOS au

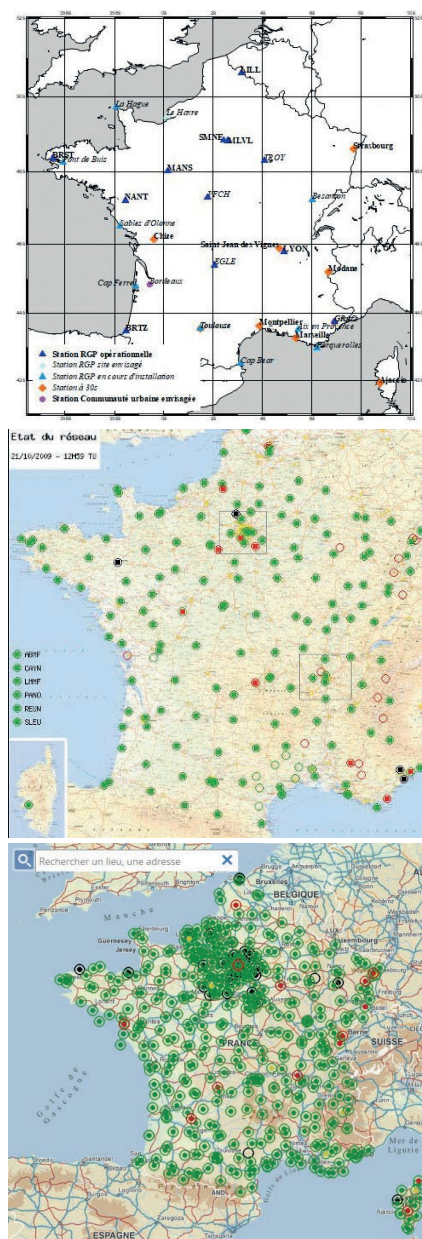


Figure 18. Évolution du RGP 2001 (15 stations), 2009 (170 stations), 2019 (536 stations) [35]



Figure 19. Réseau stations permanentes GNSS de l'EPN

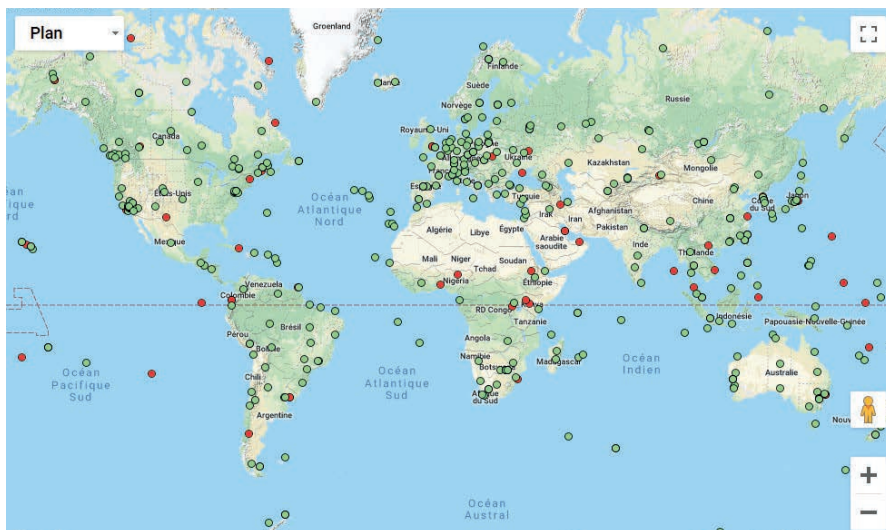


Figure 20. Réseau stations GNSS permanentes de l'IGS



Figure 21. Réseau des stations permanentes GNSS REGINA (IGN 2019)

travers du groupe de travail RGP que l'IGN recueille les besoins des utilisateurs, noue ses partenariats et participe à l'élaboration de recommandations envers les organismes tutélaires jusqu'aux constructeurs de matériels.

■ Contributions aux réseaux permanents GNSS européen (EPN) et mondial IGS

Le réseau permanent EPN (*Euref Permanent Network* [29]) est mis en place par une collaboration d'organismes volontaires de 30 pays européens dans le contexte de la sous-commission EUREF de l'IAG (Association internationale de géodésie).

Dès le début, des stations du RGP sont intégrées dans EPN et y sont actuellement au nombre de 26 (figure 19). L'IGN est un des centres d'analyse de l'EPN et contribue à la réalisation de la référence européenne (ETRF : *EEUREF Terrestrial Reference Frame*). L'IGN contribue aussi depuis le début à l'IGS (*International GNSS Service*) et 13 stations du RGP y sont actuellement intégrées (figure 20).

L'IGN est l'un des centres de données de l'IGS parmi les deux à l'origine et les six actuels. Il a pris aussi depuis 2010 la charge du *IGS Analysis Center Coordinator* (ACC) qui combine les solutions des différents centres d'analyse IGS et génère la solution officielle combinée des produits de IGS.

Initié en 2012, le projet REGINA (Réseau GNSS pour l'IGS et la Navigation) est une coopération entre le CNES et l'IGN visant à la mise en place et à l'exploitation d'une infrastructure d'observation GNSS de couverture mondiale. Constitué de stations GNSS, déployées sur 37 sites (figure 21) en coopération avec les organismes hôtes, ce réseau permet l'acquisition des signaux multi-constellations (GPS, Glonass, Galileo, BeiDou, QZSS et SBAS) et la diffusion en quasi-temps réel (de une à deux secondes) des observations au travers de l'IGS. Ces observations contribuent au calcul des corrections d'orbites et corrections d'horloges pour les services

de positionnement PPP en temps réel du CNES par exemple. La colocalisation de ces stations, notamment avec celles du réseau des stations Doris, et le rattachement topométrique effectué entre les points de référence de ces stations représentent également un apport aux réalisations du référentiel terrestre international.

Le système DORIS (Détermination d'Orbites et Radio-positionnement Intégrés sur Satellite)

Le CNES en collaboration avec l'IGN dans le cadre du GRGS développe à partir de 1982 le système DORIS destiné à la détermination précise de satellite et au positionnement terrestre.

A l'inverse des GNSS, ce sont des balises au sol qui émettent une onde et des mesures Doppler sont faites par un récepteur embarqué dans divers satellites [26][28].

Le rôle de l'IGN sera d'assurer la mise en place des balises constituant un réseau mondial (figure 22). Certaines de ces stations sont installées sur des sites hébergeant d'autres techniques spatiales (VLBI, Laser satellite, GNSS) et l'IGN sera parfois chargé des rattachements topométriques des instruments. L'IGN participe à l'IDS (le service international DORIS) et est un des centres d'analyse Doris.



Figure 22. Réseau permanent DORIS - 56 stations et colocalisation avec les autres techniques spatiales (IERS(2018) [30])

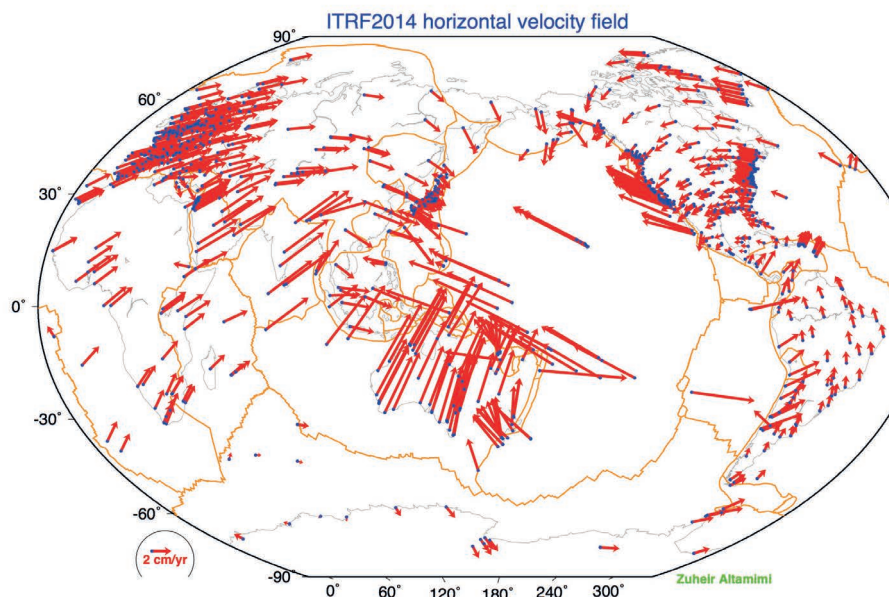


Figure 23. ITRF 2014 vitesses (Altamimi Z.)

Les Systèmes de référence terrestre [7][12]

L'IGN est depuis toujours responsable de la référence géodésique nationale (NTF, RGF93), dès le début a contribué aux références européennes (ED50, ETRF) et mondiale (ITRF).

L'ITRS

La communauté scientifique internationale entrevoit avec ces nouvelles techniques spatiales Laser (Lune et satellite), VLBI (*Very Long Base Interferometry*) et GPS le besoin de redéfinir de nouvelles références céleste et terrestre [5]. L'UAI (Union astronomique internationale) et l'UGGI (Union internationale de Géodésie et Géophysique) créeront alors l'IERS (*International Earth Rotation System*) dont le bureau central sera pris en charge par l'observatoire de Paris et l'IGN [16].

C'est ainsi que naîtra l'ITRS (l'IERS *Terrestrial Reference System*, maintenant nommé *International Terrestrial Reference System*) dont la première réalisation sera ITRF88 [6] basée sur des observations VLBI, laser lune, laser satellite. Dès le début, le centre de combinaison de l'ITRS est pris en charge par l'IGN qui développe le processus de combinaison des différents jeux de coordonnées fournis par les services internationaux VLBI, LASER et pour les réalisations ITRF88,

89, 90, 91, 92, 93, 96 [5], 97, 2000, 2005, puis DORIS pour l'ITRF2008 [1], et enfin les GNSS pour ITRF2014 [2].

Les réalisations successives sont d'une part les coordonnées tridimensionnelles à une époque donnée des stations ITRF ainsi que leur vitesse (figure 23). Un modèle de mouvement des plaques tectoniques (pôle et vitesse de rotation) est aussi calculé et associé à chaque réalisation.

L'ETRS89 (Euref Terrestrial Reference System 89)

L'IGN participe dès le début à la définition du nouveau système géodésique européen en remplacement du système ED50 dont la dernière réalisation fut ED87, pour laquelle les premières obser-



Figure 24. Les déformations de la NTF par rapport au RGF93 (IGN 1997)

vations de géodésie spatiale furent introduites.

Pour éviter que les coordonnées ne varient trop, un système de référence est défini en Europe, tel qu'il soit confondu à l'ITRS en 1989,0 et suive le mouvement de la partie stable de la plaque tectonique Eurasie. A chaque réalisation ITRF correspond une réalisation ETRF (*European terrestrial reference system*).

Le RGF93

Le RGF93 est la réalisation sur la France de l'ETRS89 avec une première réalisation Réseau Géodésique Français publiée en 1997.

Dès 1997 une grille de transformation entre la NTF et le RGF93 (GR3DF97A), est calculée à partir de points de la NTF, ré-observés par GPS et calculés en RGF93 (figure 24). Elle permettra d'une part d'attribuer aux 80 000 points de la NTF des coordonnées RGF93, et d'autre part aux utilisateurs de transformer leurs données géoréférencées en NTF.

Une deuxième réalisation est faite en 2009 par le re-calcul de toutes les observations du réseau permanent RGP. Les variations des coordonnées atteignent 4 centimètres en horizontal, et 10 centimètres en hauteur [20]. La grille de transformation NTF-RGF93 est alors recalculée.

C'est dans le contexte du CNIG que le RGF93 devient le nouveau système légal avec les décrets n°2000-1276 et n°2006-272 et que sont mises en place les mesures d'accompagnement avec le développement d'outils informatiques permettant de passer l'information géographique numérique de la NTF au RGF93 : logiciel CIRCE, conversion de fichiers raster.

Pour les territoires outre-mer, il faudra attendre 2019 et le décret 2019-165 pour que les nouvelles références deviennent légales [13][10].

Le topographe ne travaillant pas directement en latitude et longitude, l'IGN élabore deux nouvelles projections cartographiques sur la France métropolitaine, la Lambert 93 et la conique conforme 9 zones (CC) qui a l'avantage de ne quasiment pas altérer les longueurs, mais l'inconvénient d'un



affichage dans un SIG d'un neuvième de la France à la fois, autrement dit de manière plus classique pour les moyennes échelles pour la première, et pour les grandes échelles pour la seconde.

La compétence de l'IGN en matière de système de référence lui vaut aussi d'être impliqué dans la réalisation du système de référence terrestre de Galileo (GTRF) [3] et la référence géodésique globale dans l'initiative de l'ONU "Gestion de l'information géospatiale à l'échelle mondiale" (UN-GGIM) lancée en 2011.

Conclusion

On évoque souvent le rôle essentiel qu'a joué la France dans la géodésie au XVIII^e siècle, et cet article met en évidence que la géodésie française des XX^e et XXI^e siècles a été elle aussi essentielle dans une géodésie devenue mondiale. Comme par le passé, elle a aussi connu sa controverse dont a été témoin XYZ avec la publication d'articles dans ses colonnes [17][18][25][27] et qui portait sur la manière de traiter les observations de géodésie spatiale, et l'utilisation erronée du terme "géodésie". L'utilisateur qui peut désormais se positionner en temps réel avec une précision et une exactitude au niveau du centimètre dans un repère mondial, et sans aucun calcul saura juger et donner raison à qui de droit. Une concession cependant, sur la polémique terminologique, les systèmes de référence géodésique 2D évoluant vers la 3D, l'appellation "système géodésique" a cédé la place à "système de référence terrestre".

La force de la géodésie à l'IGN est d'avoir accueilli au sein du même organisme en même temps la recherche et la production.

Tout en assumant son rôle régali en géodésie, l'IGN a tenu un rôle reconnu au niveau international et la nomination récente de Zuheir Altamimi (IGN) comme président de l'Association Internationale de Géodésie (IAG) en est la consécration. ●

La suite de cet article sera publiée dans XYZ n°162 et traitera de la géodésie physique.

Contact

Françoise DUQUENNE
contact.fduquenne@gmail.com

Références

- [1] Altamimi Z. - *Le Repère International de Référence Terrestre (ITRF) : état actuel et perspectives* XYZ n° 133 - 4^e trimestre 2012
- [2] Altamimi Z. - *L'ITRF2014 et la modélisation des mouvements non linéaires des stations* - XYZ n° 153 - 4^e trimestre 2017
- [3] Altamimi Z. - *Contribution de l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière à la réalisation du repère de référence terrestre de GALILEO* - XYZ 143 - 2^e trimestre 2015
- [4] Bonin G., *Utilisation GPS pour la détermination des coordonnées précises d'un point*, XYZ n° 29 - 1986
- [5] Boucher C., Altamimi Z. - *Le repère international de référence Terrestre* XYZ n° 70 - 1^{er} trimestre 1997
- [6] Boucher C. - *La genèse du Système International de Référence Terrestre (ITRS)* XYZ n° 145 - 4^e trimestre 2015
- [7] Boucher C. - *Références de temps et d'espace* - Hermann 2017
- [8] Bureau des longitudes
Les observatoires - Hermann - 2009
- [9] Canaud G. - *Quand la légistique rattrape le train de la géodésie...* XYZ n° 159 - 2^e trimestre 2019
- [10] CNIG : *Géodésie et Nivellement : CNIG les priorités*, XYZ n° 80 - 3^e trimestre 1999
- [11] Duquenne F. - *Évolution de la géodésie en France* - XYZ n° 101 - 4^e trimestre 2004
- [12] Duquenne F., Botton S., Peyret F., Bétaille D., Willis P. - *GPS : localisation et navigation par satellites-Hermès-Lavoisier* 2005
- [13] Duquenne F. - *Les systèmes de référence terrestre et leurs réalisations Cas des territoires français* - XYZ n° 154 - 1^{er} trimestre 2018
- [14] Duquenne F. - *Le CNIG et les références géodésiques* - N° 154 - 1^{er} trimestre 2018
- [15] Duquesnoy T. - *Le réseau GPS permanent* - n° 101 - 4^e trimestre 2004
- [16] Feissel M., "Références globales pour la géodésie et l'astronomie", XYZ n° 65 pages 32-34, 4^e trimestre 1995.
- [17] Fontaine A. - *Géométrie et géodésie* XYZ n° 61 - 4^e trimestre 1994

- [18] Fontaine A. - *Incontournable géodésie* XYZ n° 79 - 2^e trimestre 1999
- [19] Gaudet A. - *Génération TERIA - Publi-Topex* - 2015
- [20] Harmel A. - *Rénovation du RGF93* XYZ n° 124 p. 37-40 - 3^e trimestre 2010
- [21] Kovalevsky J., Barlier F. - *Les débuts de la géodésie spatiale en France* XYZ n° 125 - 4^e trimestre
- [22] Harmel A. - *Rénovation du RGF93* XYZ n° 124 p. 37-40 - 3^e trimestre 2010
- [23] Levallois J.-J. *Mesurer la Terre : 300 ans de géodésie française* - de la toise du châtelet au satellite, 1988, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées /AFT
- [24] Luzet C., *Évolution du canevas national*, XYZ n° 69 - 1996 - 4^e trimestre
- [25] Million C. - *Les états d'âme de Mr Lambda* - XYZ n° 81 - 4^e trimestre 1999
- [26] Strittmatter J. - *Le système DORIS et certaines améliorations récentes* XYZ n° 136 - 3^e trimestre 2013
- [27] Willis P., Boucher C. - *GPS-GNSS et les références géodésiques : problèmes ou progrès pour les topographes ?* XYZ n° 67 - 2^e trimestre 1996
- [28] Willis P. - *Le système DORIS, applications scientifiques* - XYZ n° 73 - 4^e trimestre 1997

Les liens internet

- [27] AFT : www.aftopo.org/
- [28] CNIG : <http://cnig.gouv.fr/>
- [29] EPN : <http://www.epncb.oma.be>
- [30] IERS : www.iers.org
- [31] IGN/géodésie : <https://geodesie.ign.fr/>
- [32] IGS : <http://www.igs.org>
- [33] ITRF : <http://itrf.ign.fr>
- [34] GRGS : <https://grgs.obs-mip.fr/>
- [35] RGP : www.rgp.ign.fr
- [36] TERIA : <https://www.reseau-teria.com/>

ABSTRACT

Thanks to the artificial satellites geodesy has made a big step forward. The IGN has set up terrestrial reference systems on national territories as well as infrastructures so that the user can access in a context of broad partnership. The IGN has also played a major role in European and international geodetic references.