

# Cahier "Méchain et la longueur du mètre"



Colloque organisé par l'Observatoire de Paris  
le 22 et 23 septembre 2004  
en collaboration avec l'Institut Géographique National  
l'Association Française de Topographie  
et la participation du Bureau des Longitudes





désien au Service Cartographique de la Marine (situé à Versailles, puis à Paris) ce qui lui a valu de faire quelques campagnes en mer, le long des côtes françaises puis d'être aux côtés de Legendre et de Cassini IV dans l'opération géodésique de raccordement des méridiens de Paris et de Greenwich en 1787. Cassini IV avait de qui tenir, étant fils de Cassini III auquel est due la première carte scientifique à l'échelle d'un pays de grande taille.

Tout les trois se trouvèrent donc parfaitement bien adaptés à la mesure nouvelle de la Méridienne de France; Cassini IV et Legendre s'étant récusés, Méchain, demeuré seul fut associé à Delambre, élève comme lui de Lalande qui paraît avoir été à l'origine de leur choix pour cette opération.

**L'Association Française de Topographie** a bien voulu se charger des aspects logistiques de l'organisation. Ses membres appartiennent à de nombreux domaines qui s'apparentent à la géodésie, aux mesures sur le terrain, aux relevés topométriques, trois domaines qui ont fait partie des travaux de Méchain au cours d'une carrière de plus de 40 années au service de la science.

En s'associant à ce colloque, le **Bureau des Longitudes** a souhaité honorer un de ses premiers membres, nommé dès la création de 1795. Par son Règlement le Bureau des Longitudes est chargé de l'édition des éphémérides françaises, établies de nos jours sous sa responsabilité scientifique.

Le colloque "Méchain et la longueur du mètre" se devait, non seulement de mettre en valeur les travaux de Méchain, mais aussi de faire connaître certains des aspects des tâches accom-

plies par ses successeurs dans différents domaines de ses activités. Il convenait aussi de traiter des recherches de notre époque qui, d'une façon ou d'une autre, sont issues de ces travaux, que ce soit la mesure de la Terre, la genèse du système métrique, la mise en œuvre d'opérations de triangulation. Les travaux actuels, même basés sur le GPS ou sur quantités d'autres méthodes spatiales extrêmement performantes (télémétrie laser sur satellites, interférométrie radio-astronomique, DORIS...), sont directement héritiers de cette période particulièrement active et brillante de l'histoire de la Géodésie.

C'est pourquoi après des conférences à caractère historique, le 22 septembre 2004, après-midi, la journée du 23 septembre a vu la présentation de communications traitant, tour à tour, de sujets modernes et d'aspects historiques. Au total ce sont onze exposés qui ont détaillé l'ensemble des thèmes relevant – à un titre ou à un autre – des travaux de Méchain.

Pour terminer il convient de formuler le vœu que ceux qui n'ont pu assister aux rencontres des 22 et 23 septembre 2004 éprouvent du plaisir à la lecture des pages qui suivent et, qui sait, aient peut-être quelque regret de leur absence... ●

## Contact

Michel KASSER, Directeur de l'ENSG de l'IGN, Directeur Exécutif du GRGS, Président de l'AFT.

6 - 8 avenue Blaise Pascal, Cite Descartes, Champs-sur-Marne  
F 77 455 MARNE LA VALLEE CEDEX 2 - FRANCE

Téléphone: +331 6415 3100, Télécopie: +331 6415 3107

Courriel: michel.kasser@ign.fr

# Pierre-François-André Méchain - Quelques jalons

*La vie de Méchain et ses activités sont données en ordre chronologique.*

## ■ Suzanne DÉBARBAT

**1744 août 16** Naissance à Laon du jeune Méchain qui entre, adolescent, à l'Ecole des Ponts et Chaussées à Paris et qui ne pourra y achever ses études pour raisons financières.

**1770 (vers)** Rencontre avec Lalande (1732-1807), alors professeur au Collège de France, qui deviendra un de ses protecteurs. Ce dernier lui demande de revoir les épreuves de la deuxième édition de son *Astronomie*.

**1771 janvier 28 et octobre 9** Méchain découvre sa première puis sa deuxième comète. Au total il en découvrira 11 dont 7 seront, plus tard, homologuées par l'Union Astronomique Internationale.

**1772** Lalande obtient pour Méchain un poste à Versailles, au Service cartographique du Dépôt de la Marine. A ce titre il participe à deux campagnes de mer, dans La Manche, pour une description des côtes de France.

**1777** Méchain épouse Thérèse Marjou. Ils auront une fille et deux fils.

**1781** Méchain fournit à Laplace des données d'observations de l'objet nouvellement découvert (mars), par Herschel à Bath, objet qui se révélera être une planète (Uranus).

**1782** Son premier article de caractère astronomique, publié par l'Académie Royale des sciences, lui vaut un Prix de cette Académie. Il y est nommé astronome adjoint, puis en 1785 il en est associé et, en 1795, membre résident. Il observe au Collège de France et à l'Observatoire de la Marine, alors situé à l'Hôtel de Clugny, comme il était désigné à l'époque, où "règne" Messier (1730-1817).

**1787** Avec Cassini IV (1748-1845) et Legendre (1752-1833), accompagnés de Piazzi (1746-1817), Méchain participe au raccordement des méridiens de Paris et de Greenwich. Pour la

première fois un cercle de Borda (1733-1799) du constructeur Lenoir (1744-1832) est utilisé, dans une opération franco-britannique de caractère géodésique.

**1790-1791-1792** Avec Cassini IV et Borda, Méchain entreprend l'étude de l'emploi du cercle répétiteur aux observations astronomiques de latitude.

**1790** L'Académie des sciences est chargée des opérations devant conduire à la longueur du Mètre, étalon d'un nouveau système des poids et mesures de caractère décimal.

**1792** Cassini IV et Legendre s'étant récusés pour assurer les mesures de la Méridienne de France, Méchain et Delambre (1749-1822) en sont chargés. Le 25 juin Méchain part pour Barcelone. Le 13 septembre, avec Tranchot, qui s'est illustré dans la Carte de Corse, Méchain commence les mesures. Le 29 septembre il est à Montjouy.

**1793 avril 2** Méchain travaille à une possible prolongation de la Méridienne et, le 23 septembre avec Tranchot, il se propose d'assurer le raccordement avec les stations françaises.

**1794** En raison des événements franco-espagnols, Méchain est tenu de demeurer à Barcelone; en fin d'année et en désespoir de cause il obtient des passeports pour l'Italie.

**1795 juin 25** Création du Bureau des Longitudes le 7 messidor an III.

**1795 juillet 31** Méchain est à Marseille, à Vendres au début de septembre, puis à Carcassonne. Il fixe une base et la raccorde à ses triangles principaux. Il y prolonge son séjour en dépit d'une visite de Mme Méchain venue l'inciter à rentrer à Paris.

**1798** Méchain est de retour. S'étant récusé pour faire partie de l'expédition d'Egypte, il y est remplacé par son fils Jérôme-Isaac, âgé de vingt ans puisque né en 1778. Le nom de Méchain, gravé à l'intérieur d'un temple d'Egypte, est celui de ce fils. Méchain s'emploie à une mise en ordre des instruments acquis par le Bureau des longitudes pour l'Observatoire de Paris, et il en discute avec le Baron de Zach.

**1799 (printemps)** Les Commissaires étrangers, réunis à Paris pour finaliser les opérations de la Méridienne de France et établir la longueur du Mètre définitif, la fixent à 3 pieds 11.296 lignes de la "Toise du Pérou".

**1800** Zach (Fr. von) publie une biographie de Méchain dans sa *Monatliche Correspondenz der Erde-und-Himmels-Kunde*, Gotha, juillet, p. 96-117.

**1802 septembre 17** Les Consuls approuvent le projet de prolonger la Méridienne de Delambre et Méchain qui s'arrête à Barcelone.

**1803 avril 26** Méchain quitte Paris pour Barcelone en vue de la prolongation vers les Baléares. Le 5 mai il arrive à Barcelone.

**1804 janvier 8** Méchain embarque pour se rendre à Ivice. Le 8 février il arrive à Palma de Majorque.

**1804 août 29** Dernière lettre connue de Méchain à Delambre.

**1804 septembre 11** Dernières mesures de Méchain, malade, au Pic d'Espadan. Le 13 septembre il est conduit en la maison



Bibliothèque de l'Observatoire de Paris.

**Portrait de Méchain placé en frontispice de la biographie que fait paraître Zach en 1800. Ce portrait, de profil, paraît être le seul qui ait été fait du vivant de Méchain. Les autres auraient été exécutés à partir de celui-ci et, d'ailleurs, il semble que tous les portraits existants le représentent sous ce profil ou sous son inverse. Celui que possède l'Observatoire de Paris est une copie offerte, en 1882, par Achille Moisson (1816-1885), Premier président de la Cour d'Appel de Riom, quatrième enfant de Jean-Louis Moisson et de Rose Méchain (1783-1850). A. Moisson avait fait exécuter ce portrait à partir de celui qu'il possédait de son grand-père.**

du Baron de la Puebla Tornesa à Castellon de la Plana.

**1804 septembre 20** A 5 heures et quart, Méchain meurt chez le Baron de la Puebla où son collaborateur Desauche l'a accompagné. Son fils Augustin (1786-1860) est profondément affecté.

**1804 septembre 25** Méchain est enterré au "nouveau cimetière" de Castellon de la Plana

**1804 octobre 12** Le Bureau des longitudes est informé du décès de Méchain. ●

## Références

Mètre et Système métrique. "Journée", de cet intitulé, dont les Actes ont été publiés en coopération Observatoire de Paris/Instituto de Estudios Documentales e Historico sobre la Ciencia de l'Universitat de Valencia-C.S.I.C., Débarbat S. et Ten A. responsables d'édition, 1993.

*Medir el Metro*. Ten A., Instituto de Estudios Documentales e Historico sobre la Ciencia de l'Universitat de Valencia-C.S.I.C., 1993.

*Méchain géodésien*. Débarbat S., Revue XYZ 100 de l'Association Française de Topographie, p. 63-70, 2004.

*Archives de l'Académie des sciences*, dossier Méchain.

## Contact

**Suzanne DÉBARBAT**

Observatoire de Paris – SYRTE/UMR 8630

Bureau des longitudes – mail : Suzanne.Debartat@obspm.fr

# La galerie des instruments anciens de l'IGN

■ Jean-Claude LEBLANC et Daniel SCHELSTRAETE (Ingénieurs IGN) - Daniel MENET (Photographe de l'IGN)

*"Ses instruments représentent le patrimoine de l'histoire cartographique et instrumentale française de 1750 à 1950". Un bref rappel historique permet de comprendre leurs provenances.*

## Période historique liée à la galerie

■ **L'Académie**, créée en 1666, elle réalise les premières mesures géodésiques: 1<sup>er</sup> arc de méridien, 1<sup>er</sup> canevas géométrique du territoire, 1<sup>re</sup> carte générale appelée "carte de l'Observatoire" ou "carte de l'Académie" puis "carte de Cassini".



Extrait d'une "carte de Cassini" (1683 à 1815)

■ **Le dépôt de la guerre** créé en 1688, par Louvois:

- A sa création il porte le nom de "Dépôt des archives de la Guerre" destiné à l'archivage des cartes et plans.



Extrait de la carte des chasses du Roi (1704 à 1807)

- Louis XV fait établir les cartes des campagnes militaires et des places fortes, puis, vers 1765 la "carte des Chasses du Roi".
- A partir de 1817, la "Commission Laplace" lui confie les activités géodésiques et cartographiques avec le lancement vers 1820-1830 de la "Carte d'Etat-Major" puis à partir de 1860-1870, la cartographie dans "les colonies".



Les travaux liés à la carte d'Etat Major ont duré de 1818 à 1881 pour 267 feuilles



Les feuilles de 51 villes de France à 1/20 000 ont été réalisées durant le XIX<sup>e</sup> siècle

■ **Le service géographique de l'armée** créé en 1887 par le Général Perrier, a regroupé les cartes générales du dépôt de la Guerre et les plans aux grandes échelles du Génie Militaire.

■ **Le service du nivellement** créé en 1884 deviendra en 1891 "le service du nivellement général de la France", rattaché au ministère des Travaux Publics, en relation avec le chemin de fer.

■ **L'Institut Géographique National** créé en juin 1940, reprend les fonctions du SGA et le nivellement en France.

## La création de la galerie

Au fil de l'histoire, les instruments étaient entreposés sur 4 sites dont a hérité l'IGN: Hôtel des Invalides, 140 rue de Grenelle, rue La Boétie, rue Gay-Lussac.

En 1957, le Général Hurault, chef du Laboratoire d'optique du SGA puis fondateur de l'IGN, a créé la galerie pour regrouper tous les instruments anciens dans un même lieu prévu à cet effet, dans le sous-sol du bâtiment de la 5<sup>e</sup> Direction (Matériels) de l'IGN à St-Mandé.

## Accessibilité et évolution de la galerie

La galerie n'est pas un musée ouvert au public (sous-sol et accès difficile). Des petits groupes peuvent cependant la visiter après accord du Service de la Logistique de l'IGN, et des appareils sont prêtés lors d'expositions à thème cartographique.

Tous les instruments sont photographiés depuis 2000. Les clichés sont consultables en interne à l'IGN mais il n'est pas encore prévu de les diffuser sur le site Internet de l'IGN.

Aujourd'hui, l'IGN conserve des instruments témoins lorsqu'il renouvelle son parc du fait de l'évolution, et un dépôt complémentaire a été constitué dans la base de matériel de l'IGN à Villefranche sur Cher.



## Contenu de la galerie

**Environ 650 instruments sont exposés dans 14 vitrines, classées en 6 grands thèmes : Astronomie de position, Géodésie, Lunettes d'observation, Topométrie et levers, Nivellement, Dessin et report**

L'Ingénieur Géographe RICHARME, chargé de la sélection et de la présentation a écrit dans ses mémoires : *"je les trouvais très en désordre, et je mis deux ans pour les ranger, les étudier, enfin les faire astiquer et cataloguer"*. Il a dû terminer vers 1960. Devant le grand nombre d'appareils, il n'a présenté qu'un modèle par type, ce qui fait que tous les instruments sont uniques.

Les appareils de cette galerie permettent de suivre l'évolution technologique de deux siècles avec par exemple :

- **La disparition des échelles transversales**, remplacées par les verniers (avant 1800).
- **L'évolution quart de cercle** : graphomètre (vers 1750-1800) – cercle hydrographique ou cercle entier (vers 1790) – cercle répéteur (vers 1790-1830) – grands cercles azimutaux (vers 1870 et vers 1940), lunette méridienne de Brunner (vers 1900).

- **Les perfectionnements optiques** : alidades à pinnules sans optique – premières lunettes avec seulement 2 lentilles (avant 1800) – découverte du verre "flint-glass" utilisé en France vers 1820, qui permet de fabriquer des oculaires plus puissants – premiers réticules obtenus par photogravure (vers 1880) – nouvelle génération des théodolites : les T2 et T3 conçus par H. Wild (vers 1920-1930).
- Apparition vers 1850 des appareils auto-réducteurs (idée de PORRO). Tachéomètres de Moinot, Sanguet, Goulier, etc.
- L'évolution de "l'écimètre-boussole" entre 1800 et 1880.
- L'évolution de la "règle à écimètre" depuis le Colonel Goulier (vers 1880) jusqu'à "l'alidade holométrique modèle 1940"
- Le nivellement : niveau à "cuvette" de Lenoir ; niveau "de Chézy" (nivelle montée sur la lunette) ; niveau "d'Egault" (nivelle montée sur le support de lunette ce qui permet de tourner la lunette) ; niveau "Bourdaloüë", niveau fabriqué par "Barthélemy" pour le NG et le SGA.
- **Les mesures des longueurs** : les étalons de 4 mètres utilisés pour la mesure des bases avant 1900 ont disparu ; il reste un étalon du mètre, section en X, construit vers 1865, ainsi que plusieurs règles en maillechort ; il y a aussi des jeux de fils en invar de 24 mètres.

Le tableau ci-après montre la diversité des instrument contenus dans la galerie

### Astronomie

INSTRUMENT	REFER.	CONSTRUCTEUR	DATE	COMMENTAIRES
Astrolabe	01 A.2.06	Arsenius	1575	Le plus ancien et prestigieux instrument fabriqué dans les ateliers d'Arsenius ; il est estimé vers 1575, avant l'introduction du calendrier grégorien (1582).
Astrolabe "Claude Driancourt"	02 A.2.08	Jobin	1910	Visée de l'étoile à 30°, un seul pointé. Un prisme renvoie la visée de la lunette sur un miroir ou liquide horizontal qui permet de viser des étoiles rigoureusement lors de leur passage dans une direction faisant un angle de 30° avec la verticale.
Cercle méridien	03 A.2.15	Gambey	1820	Pour observations méridiennes. Avant 1800, les traits étaient directement gravés sur le limbe ; vers 1810, Gambey grave les traits sur un disque en argent porté dans le limbe.
Lunette méridienne	04 A.1.02	Brunner	1900	Permettait de déterminer la latitude par mesure de hauteur et la longitude avec l'heure de passage d'étoiles dans le plan méridien. Du fait du poids de la lunette, il fallait faire une correction de déformation de lunette.



Astrolabe



Astrolabe "Claude Driancourt"



Cercle méridien



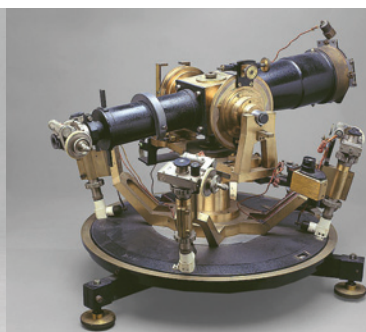
Lunette méridienne

### Géodésie : instruments à axe principal vertical et secondaire horizontal

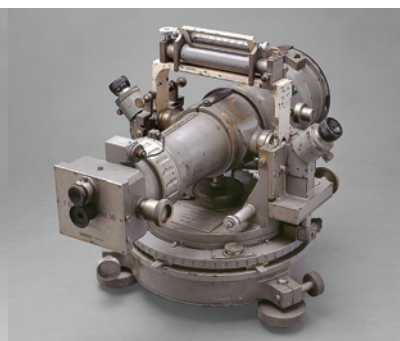
INSTRUMENT	REFER.	CONSTRUCTEUR	DATE	COMMENTAIRES
Théodolite	05 H.1.06	Gambey	1820	Mesure directe d'angles horizontaux et de distances zénithales.
Cercles azimutaux	06 C.1.01	Brunner	1870	Pour visées lointaines, modifié vers 1925 pour travail de nuit.
	07 E.1.04	Chasselon	1940-45	Abandonné vers 1950 au profit des théodolites.



Théodolite



Cercle azimutal "type GI Perrier"



Cercle azimutal "type IGN"

### Géodésie : Instruments visant dans le plan contenant les points visés

INSTRUMENT	REFER.	CONSTRUCTEUR	DATE	COMMENTAIRES
Cercles répéteurs "de Borda"	09 H.1.10	Lenoir	1790	Cercles utilisés par Delambre et Méchain
	10 H.1.09	Lennel ?	1785 ?	Cercle répéteur en degrés, surchargé en grades, en 1791
Cercle hydrographique "de Borda"	11 B.3.03	Hurlimann, Ponthus et Terrode	1860 ?	Appareil tenu à la main pour viser dans la direction de la lunette et d'un autre point grâce à un miroir échancre



Cercle répéteur "de Borda"



Cercle hydrographique "de Borda"

### Cartographie des XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> siècle

INSTRUMENT	REFER.	CONSTRUCTEUR	DATE	COMMENTAIRES
Graphomètre	12 I.2.07	Langlois	1760 ?	Instrument typique de la "Carte de Cassini"
	13 I.2.10	Ferrat	1810	Instrument toujours utilisé au XIX <sup>e</sup> siècle



Graphomètres à lunettes et échelles transversales



Graphomètre à pinnules et 2 verniers

## Levers aux grandes échelles

INSTRUMENT	REFER.	CONSTRUCTEUR	DATE	COMMENTAIRES
Alidade nivelatrice à perpendicule	14 M.3.01	"Diebolt et Fahlmers à Strasbourg"	1780 ?	Perfectionnement des 1 <sup>res</sup> alidades (nivelatrices ou non) en métal
Eclimètre boussole	15 I.1.09	Jecker	1810	Pour les levés sur le terrain de la carte "d'Etat-Major"
Règle à éclimètre "type Goulier"	17 L.3.01	Tavernier et Gravet	1880	Pour grandes échelles ; évolue en éclimètre "Puissant" pour petites échelles
Tachéomètre "type Sanguet"	18 F.3.06	Sanguet	1900	Instrument mesurant angles et distances par basculement de la lunette par rapport à son reglet verticale et une mire ayant des graduations d'un rapport 100.



Alidade nivelatrice à perpendicule (fil à plomb)



Eclimètre boussole



Règle à éclimètre "type Goulier"



Tachéomètre "type Sanguet"

## Nivellement

INSTRUMENT	REFER.	CONSTRUCTEUR	DATE	COMMENTAIRES
Niveau "de Chézy"	19 K.3.06	Lenoir ?	1780 ?	Niveau de Chézy transformé en "niveau d'Egault"
Niveau "d'Egault"	20 K.3.03	Jecker	1810	Niveau monté sur 2 vis calantes et 2 lames de ressort
Niveau "Bourdalouë"	21 J.4.05	Gravet	1860	Niveau munie d'une poignée isolée pour permettre le retournement de la lunette sans l'échauffer
Niveau de précision	22 J.3.04	Berthélemy	1900	Utilisé pour le NGF et par le SGA



Niveau "de Chézy"



Niveau "d'Egault"



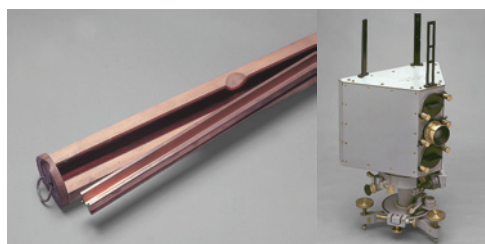
Niveau "Bourdalouë"



Niveau de précision

## Instruments divers

INSTRUMENT	REFER.	CONSTRUCTEUR	DATE	COMMENTAIRES
Règle en "X"	23 B.1.03	?	1880	"Etalon" secondaire du mètre étalon
Photo-théodolite	24 F.1.07	Brosset	1890	Pour accélérer la triangulation en montagne. 1 <sup>re</sup> utilisation de la photographie, avec des objectifs pouvant occuper 3 hauteurs pour les visées montantes, horizontales et descendantes



Règle en "X"

Photo-théodolite



# Géodésie publique et géodésie privée

## Pierre André Méchain et sa seconde mission en Espagne, 1803-1804

■ Antonio E. TEN Université de Valence (Espagne) - CSIC.

*L'histoire géodésique du système métrique décimal, rappelée ici à grands traits, est bien connue: le 19 mars 1791, l'Académie des sciences propose de fonder le nouveau mètre sur le quart du méridien, donc sur des mesures géodésiques. Le projet approuvé, deux astronomes, Jean Baptiste Delambre et Pierre André Méchain, mesurent, entre 1792 et 1798, l'arc du méridien de Paris depuis Dunkerque jusqu'à Barcelone. Le mètre définitif est arrêté, par la commission internationale réunie à Paris en 1799, à 443.296 lignes de la "toise du Pérou". Mais il est aussi bien connu que ce n'est pas la fin des travaux géodésiques autour du mètre. Le 31 août 1802, le Bureau des longitudes décide de continuer les mesures de la méridienne de France jusqu'aux îles Baléares, en Espagne. Pourquoi?*

**L**es raisons scientifiques sont bien établies dans un rapport, écrit de la main de Méchain et conservé aux Archives nationales de Paris, que le Bureau des longitudes soumet aux Consuls de la République. Ce sont des raisons géodésiques. La prolongation permettrait d'avoir un arc partagé à peu près en deux moitiés par le parallèle 45° et, suivant un théorème de Delambre, cela épargnerait la nécessité d'utiliser la valeur de l'aplatissement de la Terre, fondé, dans les calculs du mètre, sur les mesures faites au Pérou 60 ans auparavant et dont l'exactitude était douteuse. On voulait donner, en quelque sorte, plus d'exactitude à la mesure bien que personne ait proposé de changer la mesure arrêtée trois ans plus tôt.

Le premier consul, Napoléon, approuve le projet le 17 septembre 1802. Il convenait donc de retourner en Espagne et d'ajouter divers triangles géodésiques à la chaîne déjà mesurée jusqu'à Barcelone; l'un d'eux, au moins, serait un grand triangle sur la mer, le plus grand jamais mesuré. Sur sa demande, Pierre Méchain est chargé des opérations. Le 26 avril 1803 l'astronome, accompagné de son fils Augustin, de l'ingénieur Dezauche, du diplomate Le Chevalier et de son domestique Chauvet, quitte Paris pour Barcelone. Méchain ne réussit pas à terminer son travail. Accablé de malheurs, il succombe du paludisme à Castellón de la Plana, au nord de Valence, le 20 septembre 1804. Le travail sera terminé par

Biot et Arago entre 1806 et 1808. D'autres travaux continueront la mesure du méridien de Paris jusqu'aux îles du nord de l'Écosse et, à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, jusqu'en Algérie. Jusqu'ici tout est plus ou moins bien connu des historiens et des géodésiens.

Mais derrière cette histoire il y avait des détails cachés. Il n'est pas question ici des opinions de Delambre concernant la prétendue erreur commise par Méchain en 1792 dans la détermination de la latitude de Montjouy, erreur dont les mesures modernes ont dévoilé l'inexistence<sup>1</sup>, bien que des ouvrages récents continuent à y trouver la véritable raison de ce dernier voyage. Une grande partie de ces détails cachés qui, ici, nous concernent, les plus intéressants du point de vue géodésique sans aucun doute, sont contenus dans la riche, et presque totalement inédite, correspondance de Méchain pendant ce deuxième voyage, notamment dans la correspondance avec Delambre conservée aux Archives de l'Observatoire de Paris.

Le seul chercheur qui eut ces lettres en main jusqu'à la fin du XX<sup>e</sup> siècle fut Guillaume Bigourdan qui, en 1900, publia un article fondé sur sa lecture<sup>2</sup>. Ces lettres ne furent pas répertoriées dans le catalogue des manuscrits de l'Observatoire de Paris, fait de la main de Bigourdan, disparurent pendant presque un siècle et ne furent retrouvées pour la recherche que par les services de l'Observatoire de Paris et l'auteur de cet article en 1985.

Qu'apportent les lettres de l'époque à l'histoire officielle des opérations géodésiques autour du mètre? Déjà Bigourdan découvre là des détails importants pour l'histoire de la géodésie. Mais Bigourdan fait une lecture partielle. Seuls certains détails le concernent. Il y a un monde d'informations qui lui échappe. Les problèmes de Méchain avec les autorités, avec le temps, avec l'orographie et avec ses collaborateurs, ses doutes constants, dessinent une image beaucoup plus complexe des opérations que tout ce qu'on avait jamais raconté. Du point de vue géodésique, elles ouvrent une fenêtre privilégiée sur le travail d'un géodésien. C'est jusqu'à six projets différents de jonction des Baléares avec le continent, avec les raisons qui le portèrent à les proposer, que nous allons trouver sous l'histoire officielle.

(1) Polit I. (1931) La latitude de Montjuich determinada por Méchain. Anales de la asociación española para el progreso de las ciencias, 3 y 4, 43-48.

(2) Bigourdan, G. (1900). La prolongation de la méridienne de Paris, de Barcelone aux Baléares, d'après les correspondances inédites de Méchain, de Biot et d'Arago. Bulletin astronomique, XVII, 348-368; 390-400; 467-480.



## La seconde expédition de Méchain à la lumière de sa correspondance avec Delambre

Méchain arrive à Barcelone le 5 mai 1803 avec l'espoir de se rendre directement à Majorque grâce au brigantin, promis par le Gouvernement espagnol, sous le commandement de l'officier Pascual Enrile<sup>3</sup>. Faute du brigantin à son arrivée, il commence à parcourir les montagnes au sud de Barcelone pour préparer les stations. Datée à Montserrat, Méchain écrit une lettre à Delambre le 30 vendémiaire an XII (23 octobre 1803). C'est la première lettre que ce dernier reçoit à Paris.

Il s'agit d'une très longue lettre, en réponse à une autre de Delambre, perdue, datée du 16 thermidor an XI. Après quelques mots affectueux, la lettre commence par une discussion des détails de la publication de la Base du système métrique. Le plus important, sans doute, dans cette lettre du 23 octobre 1803, c'est qu'elle permet de connaître les premières idées de Méchain sur la prolongation. Le grand triangle sur la mer aurait ses sommets au Puig de la Morella, au sud de Barcelone, Mola-cime de Montsià, à l'extrémité sud de Catalogne, et Silla-Torrellas (le Puig major d'aujourd'hui) à Majorque.

Mais la mesure dut lui sembler déjà, dès le début, un travail plus complexe et long qu'on le pensait à Paris. Les six mois de travail prévus se révélaient une durée trop courte. Méchain soumet au Bureau des Longitudes la possibilité qu'un autre astronome vienne le remplacer dans ce travail.

Cette idée surprenante se renforce beaucoup dans une autre lettre du 5 brumaire an XII (28 octobre 1803), datée de la butte de Matas, sur le Mont Alegre. Méchain, affirme, qu'il est prêt à retourner directement à Paris sans "le plus léger regret". C'est l'avis de Laplace qui décidera, affirme Méchain, et il l'attend. Mais il ne peut pas savoir que les lettres qu'il envoie à Delambre ne suivent pas vers le Bureau des Longitudes.

La troisième lettre, écrite depuis Barcelone le 7 décembre nous apprend un changement de plan : Il envisage d'aller directement à Ivice, plus au sud, pour tenter d'y appuyer son grand triangle. Faute de renseignements précis, il a dessiné de nouveaux plans. Toujours depuis Barcelone, empêché d'aller à Ivice, il écrit une autre lettre à Delambre, datée du 17 décembre. Pour la première fois il ouvre la possibilité de continuer la chaîne continentale vers le sud. La jonction par Ivice, moins éloignée du continent, devrait être plus assurée que la mesure du grand triangle sur Majorque, dont les difficultés semblaient accrues. La réponse était à Ivice.

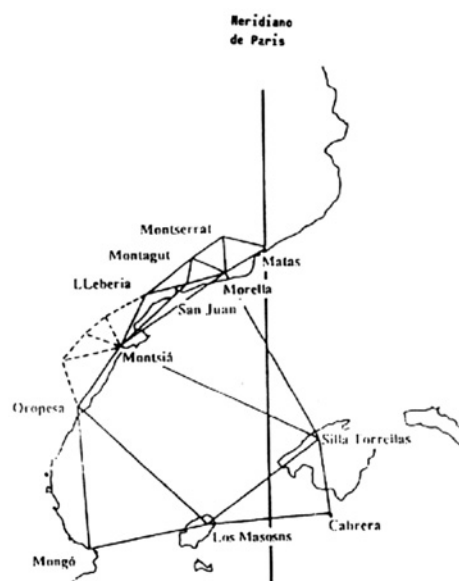
Le 8 janvier 1804, prêt pour embarquer finalement vers Ivice, Méchain écrit sa cinquième lettre à Delambre. C'est un résumé. Deux possibilités sont ouvertes : la jonction nord, Catalogne- Majorque, et le sud Valence-Ivice, avec une troisième plus douteuse : joindre aussi Ivice à la Catalogne. Trois triangles sur la mer !

Datée d'Ivice le 25 de janvier 1804, la sixième lettre est un trésor de détails humains. Mais il s'agit de la géodésie. Après avoir parcouru les montagnes de l'île, la conclusion s'impose :

Elles n'ont pas une hauteur suffisante. On ne peut pas lier Ivice à la Catalogne. Par contre, on voit parfaitement les montagnes de Valence. La jonction sud est parfaitement possible. Avant de reconnaître les montagnes de Majorque, les deux projets possibles semblent bien établis : jonction Catalogne-Majorque, avec triangulation interne des îles et mesure d'une base à Majorque, ou prolongation de la chaîne continentale vers le sud de Valence, jonction avec Ivice et, si nécessaire, triangulation des îles, étant donné que la chaîne dévierait beaucoup vers l'ouest du Méridien de Paris.

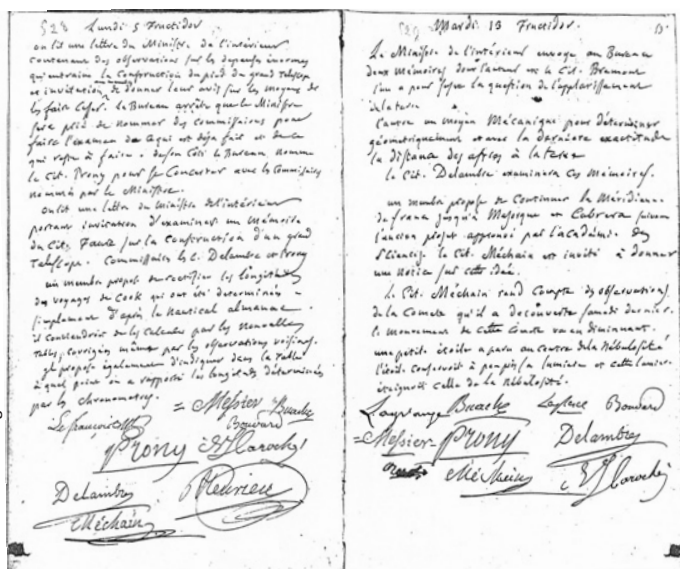
De Palma, le 16 pluviôse an XII (8 février 1804) Méchain écrit une lettre à son épouse, à laquelle il ajoute une feuille destinée évidemment à Delambre. La feuille, écrite avant d'avoir reconnu les montagnes, revient sur les jonctions possibles. La préférence revient à la jonction nord mais Méchain dessine un grand projet avec toutes les possibilités : le grand triangle du nord, Morella-Montsia-SillaTorrellas, pourrait être complété d'un autre dont le succès soit assuré, le triangle Montsia-Desierto de las Palmas-SillaTorrellas, pour appuyer sur lui un triangle avec ses sommets au Desierto, à SillaTorrellas et à Los Masons, qui permettrait de relier Ivice à la chaîne. Le réseau pourrait se compléter par un triangle s'appuyant sur Cabrera ou, si besoin était, un autre triangle sur la mer pour relier Los Masons aux montagnes au sud de Valence, Cullera ou le Montgó. Un projet bien ambitieux tracé avant de reconnaître les montagnes de Majorque. Mais ce n'est pas tout ! Méchain, toujours incertain sur la mesure de grands triangles sur la mer, arrive même à proposer de renoncer aux îles ! Les triangles pourraient simplement descendre vers le sud tout au long des côtes de Valence, et projeter leurs côtés sur la méridienne, malgré la grande déviation de la chaîne vers l'ouest. L'idée constitue une complète révolution en ce qui concerne tous les plans tracés antérieurement.

Mais le temps passe. Sans nouvelles du Bureau, après tant d'hésitations, fatigué, Méchain se décide pour le plus court chemin : la jonction nord. On mesurerait après un triangle sur Ivice et Cabrera et une base de vérification. Le temps, fin de l'hiver, était



Projet de Méchain pour rejoindre Majorque. In "Medir el Metro" de A. Ten.

(3) Ten, Antonio E. (1986). Medir el metro. Valencia, IEDHC.



Page 53 du volume I des procès verbaux du Bureau des longitudes. On trouve ici la proposition de recommencer les opérations en Espagne.

favorable à la mesure du grand triangle sur la mer. Pour commencer les mesures, il envoie ses collaborateurs allumer des feux sur les sommets de Morella et Montsia.

C'est à ce moment, le 13 mars 1804, qu'il lui arrive de Paris une lettre de Delambre, la seule qui semble conservée, datée du 25 février. La lettre est démolissante. Delambre, malade pendant plusieurs mois, n'a lu au Bureau les lettres, avec les projets, doutes et demandes de Méchain, qu'à la fin de février. Après délibération, Le Bureau des longitudes décide que la meilleure option est le sud ! Méchain devrait aussi mesurer une nouvelle base sur les côtes de Valence, non de vérification mais équivalente aux deux autres déjà mesurées à Melun et à Perpignan. Très affaibli, Méchain n'ose pas discuter. Dans sa réponse à Delambre, datée de Palme de Majorque le 6 avril, il accepte les ordres, après être monté finalement au Puig Major pour s'assurer que ses plans de mesurer le seul triangle Morella-Montsia-Silla Torrellas, rejeté par le Bureau, étaient parfaitement faisables et que, sauf des impondérables dans la mesure sur la mer, cela était beaucoup plus simple que d'entreprendre ceux qu'on lui demandait d'exécuter. Méchain quitte les îles vers Valence, où il arrive à la fin d'avril 1804 où il n'était pas attendu. En attendant les permis, l'été, avec les brumes sur la mer, s'approche...

La lettre suivante qui parvient à Delambre est un extrait, de la main de M<sup>me</sup> Méchain dans une lettre datée de Vinaroz, près du Montsia, le 23 juin 1804. Obligé de laisser les mesures sur la mer pour octobre ou novembre, ou même février ou mars de 1805, Méchain compte employer ce temps à la mesure de la base et à achever les travaux de la chaîne continentale. Méchain doit annoncer cet énorme retard à son épouse. Une année perdue et encore une autre année de travail ! Mais Méchain lui cache son état de désespoir. Deux longues lettres cependant, adressées à un ami de Perpignan, M. Jaubert, (Cullera 2 juillet), et à un collaborateur espagnol, le Baron de la Puebla Tornesa, (Puig, 9 août), permettent de connaître ce que la lettre du 23 juin, ne pouvait pas raconter.

Cette lettre à Jaubert, à un confident, est impressionnante. On écoute un Méchain complètement démolì : "[...] *sans désirer la mort, je suis loin de la craindre [...]*" ; "[...] *Cette malheureuse commission dont le succès est si éloigné [...]* sera plus que probablement ma perte [...]" ; l'astronome est à la limite de ses forces. La lettre au Baron de la Puebla Tornesa, de son côté, passe en revue ses malheurs avec certains des collaborateurs espagnols. Maladies, abandons, erreurs... il est presque seul !

Finalement, la lettre à Delambre, datée du Puig le 29 août, la dernière qu'il lui écrira, est une sorte de résumé de toutes les difficultés que Méchain a exprimées depuis son arrivée à Valence. Déjà à la limite de ses forces, toujours mesurant sur les montagnes, Méchain a une seule demande au Bureau : qu'on le remplace ! Il a à peine de forces pour continuer à affirmer que la solution nord aurait été plus facile et rapide, et pour expliquer les décisions qu'il continue à prendre. Le panorama de futur qu'il dessine est affreux.

## La mort

La fin est proche. Au Puig, Méchain dut être atteint du paludisme. Les cahiers de mesure le montrent au travail le 2 septembre dans le pic d'Espadan, à l'ouest de Castellón. La maladie se déclenche. Dix jours après, Il est descendu de la montagne et le jeudi 13, nous le trouvons à Castellón, au manoir du Baron de la Puebla. Les extraits du journal de son aide Dezauche, heureusement conservés<sup>4</sup>, permettent de suivre ses derniers jours. Entre ses bras l'astronome expire à 5 heures 20 minutes du jeudi 20 septembre 1804.

Les funérailles de Méchain furent un événement à Castellón. Y assistèrent les premières autorités civiles et militaires, accompagnées des aides espagnols qu'il eut et de la noblesse de la ville. Le 25 septembre il fut enterré dans le "cimetière neuf" de Castellón, dans un cercueil de bois qui contenait à son tour un cercueil de plomb. Dezauche avait pris cette précaution en vue de son possible transport à France. Mais le destin voulait que ses ossements reposassent pour toujours en terre espagnole. Dans la guerre contre la France qui éclata en 1808, son cercueil fut déterrè, le plomb fondu pour faire des balles contre les Français et ses ossements perdus dans une fosse commune d'un cimetière qui n'existe plus.

Loin de l'histoire officielle, l'ensemble des lettres échangées avec Delambre, complétées par quelques autres documents d'archives, nous a permis de comprendre l'esprit de Méchain au milieu de ses travaux, ceux d'un géodésien dans le travail sur le terrain. Il s'agit là d'une des occasions rares que l'histoire nous a permis d'apprécier sur des doutes, des projets constamment en changement, des difficultés, des erreurs... Mais aucun résumé ne peut arriver à transmettre toute la charge dramatique que distille les lettres elles-mêmes. C'est là le grand mérite de la correspondance qui, prochainement, doit être publiée par la Municipalité de Barcelone et l'Observatoire de Paris en commémoration du bicentenaire de la mort de Méchain. ●

(4) Anonyme (1891). La dernière mission de l'astronome Méchain (1804). Revue rétrospective, XV, 145-168.



# Le premier nivellement géodésique de la France à partir des mesures faites par Delambre et Méchain sur la méridienne de Paris

■ Robert VINCENT

*Si la méconnaissance de la forme de la France avait été levée dès le XVIII<sup>e</sup> siècle par les travaux des Cassini, une ignorance analogue régnait encore pour les altitudes, au moment de la Révolution, bien que les déterminations barométriques en aient donné une première approximation.*

*Delambre et Méchain, lors de leurs travaux observés de 1792 à 1798, sur la méridienne de Paris, ont mesuré simultanément les angles des triangles et les angles zénithaux des visées. Les altitudes des sommets de la chaîne furent ainsi déterminées avec une exactitude inégalée jusqu'alors. En 1817, il fut décidé d'établir une nouvelle carte de France à l'échelle de 1/80 000, dite carte de l'Etat-Major, dotée de cotes d'altitude, avantage considérable sur sa devancière, la carte de Cassini, avec une figuration du relief. Pour mener à bien cette entreprise, sur le modèle de la méridienne de Paris de Delambre et Méchain, un ensemble de chaînes méridiennes et parallèles, avec une géodésie complémentaire primordiale, va constituer le canevas observé de 1818 à 1850, afin de servir d'ossature aux levers. Par cette même méthode, la hauteur du Mont-Blanc fut déterminée d'une façon précise en 1828-29.*

## ■ mots clés

nivellement géodésique,  
altitudes sur la carte de France  
du XIX<sup>e</sup> siècle,  
altitude du Mont-Blanc

**L**a forme exacte de la France avait été révélée au XVIII<sup>e</sup> siècle par les travaux de la célèbre carte des Cassini. Mais cette carte ne comportait pas d'indications altimétriques. Une ignorance régnait encore pour les altitudes au moment de la Révolution, bien que les déterminations barométriques en aient donné une première approximation. Les premiers nivellements géométriques de l'abbé Picard, exécutés au XVII<sup>e</sup> siècle afin d'étudier la possibilité d'amener les eaux à Versailles, pour connaître les altitudes relatives de la Loire à Briare et de la Seine à Paris, étaient restés sans suite.

Delambre et Méchain, lors de leurs travaux observés de 1792 à 1798, sur la méridienne de l'Observatoire de Paris entre Dunkerque et Barcelone pour déterminer la longueur de l'arc de méridien, ont mesuré simultanément les angles des triangles et les angles zénithaux des visées.

L'appareil utilisé est un cercle répétiteur conçu par Borda. Il ne comporte qu'un seul cercle gradué, mais celui-ci peut être basculé. Il peut ainsi être mis

- dans le plan passant par le point de station et les deux points visés, pour mesurer les angles plans,
- dans le plan vertical méridien pour observer la hauteur des étoiles. Cette disposition était essentielle pour la mesure des distances zénithales (angle vertical que fait une visée avec le zénith) et a été utilisée pour déterminer des latitudes astronomiques en 7 stations dites astronomiques de la chaîne méridienne, afin d'étudier la variation de la courbure terrestre.
- dans le plan vertical d'un point visé pour en mesurer l'angle zénithal. De telles mesures des "distances zénithales", entre les sommets des triangles d'une chaîne géodésique avaient deux buts : le principal est de permettre de rabattre sur le plan horizontal par le calcul, les angles plans mesurés en une station dans le plan des deux points visés, et aussi de permettre d'en déduire, puisque les distances aux points visés sont

déterminées, les dénivelées et de calculer ainsi de proche en proche les altitudes. En particulier, la connaissance des altitudes des bases géodésiques de Melun et de Salces était nécessaire pour leur réduction au niveau de la mer.

## Le nivellement géodésique de la méridienne

Entre les sommets de la chaîne, les mesures des angles zénithaux entre deux stations sont presque toujours réciproques. Par contre elles ne peuvent être simultanées faute d'un deuxième instrument. Elles sont exécutées aux heures médianes de la journée, lorsque la réfraction de l'air reprend chaque jour à peu près la même valeur, bien qu'en contrepartie les images soient alors soumises à une agitation préjudiciable à la commodité du pointé. Ces mesures réciproques permettent de tenir compte expérimentalement du "niveau apparent", somme des effets de la sphéricité et de la réfraction atmosphérique.

Voici ce que disait Delambre, à propos de ces mesures d'angles zénithaux : "Ces observations de hauteurs n'étaient pour nous, que des objets très secondaires; elles ne devaient nous servir qu'à réduire nos bases au niveau de la mer, et nous les connaissons avec plus d'exactitude qu'il n'en faut pour cet objet. Si nous avions été chargés de faire un nivellement très exact, nous aurions pris d'autres précautions: nous aurions divisé les intervalles; nous aurions tâché que les observations réciproques des deux signaux eussent été simultanées et faites vers le milieu du jour et par beau temps; mais ces précautions eussent coûté trop de temps, de dépenses et de peines, et, malgré tant de soins, l'incertitude des réfractions est telle, que nous aurions pu bien difficilement répondre de deux pieds au lieu de dix ou de douze, dont on est en droit de dire que nos élévations au-dessus des deux mers peuvent être en erreur."

Tout est dit et bien dit dans le style de l'époque. La précision des altitudes obtenues est ainsi estimée par Delambre à 3 ou 4 mètres, et il est bien conscient que pour obtenir mieux, il eut fallu passer par une triangulation à plus petits côtés. C'est bien là l'inconvénient du nivellement d'un réseau géodésique, où le premier ordre est le moins précis !

La somme algébrique des dénivelées réciproques moyennes des trois côtés d'un triangle, théoriquement nulle, donne une bonne idée de la précision des opérations. Sur la chaîne méridienne de l'Observatoire de Paris, ces fermetures sont en moyenne de 3 mètres, ce qui laisse augurer une précision de la moyenne des dénivelées réciproques entre deux sommets de 1,80 m. Cela est faible en regard des imprécisions inhérentes aux mesures d'angles zénithaux sur des distances souvent longues des côtés géodésiques (de 20 à 40 km).

Comme on le sait, Delambre observa la partie Nord de l'arc, de Dunkerque à Rodez et Méchain la partie sud de Rodez à Perpignan et Barcelone. Delambre se référa au niveau moyen de la mer du Nord à Dunkerque et de proche en proche, détermina ainsi l'altitude du sommet du Clocher de la cathédrale de Rodez : 362,73 toises (706,98 m). Méchain fit de même à partir du niveau de la Méditerranée près de Perpignan et trouva 362,26 toises (706,06 m). Cette différence de 0,47 toise (0,92 m) est très honorable, et même heureuse, compte tenu des précisions annoncées ci-dessus.

## La carte de France dite de l'État-Major et ses altitudes

En 1817, il fut décidé d'établir une nouvelle carte de France à l'échelle de 1/80 000, un peu plus grande que celle dite de Cassini qui venait d'être achevée (à l'échelle d'une ligne pour 100 toises, c'est-à-dire au 1/86 400). Cette carte des Ingénieurs-Géographes dite "Carte de l'État-major", sera dotée de cotes d'altitude, avantage considérable sur sa devancière, et elle comportera un figuré du relief.

Pour mener à bien cette entreprise, sur le modèle de la méridienne de Paris de Delambre et Méchain, un ensemble de chaînes méridiennes (dites de Dunkerque, Sedan, Bayeux) et parallèles (dites d'Amiens, de Paris, Bourges, parallèle moyen ou de Clermont, Rodez et chaîne des Pyrénées et chaîne méditerranéenne), avec la géodésie complémentaire primordiale, va constituer le canevas de la géodésie primordiale française. Il sera observé de 1818 à 1850, pour servir d'ossature aux levés de la nouvelle carte.

Pour définir l'altitude du Panthéon à Paris, choisi comme point fondamental de ce nivellement géodésique de la France, en 1820-1821, les distances zénithales réciproques et simultanées,

ont été mesurées sur la partie ouest de la chaîne du parallèle de Paris, entre Brest, Cancale et Paris, sous la direction du Colonel Bonne. Ces mesures ont été exécutées au moyen de deux cercles répétiteurs construits l'un par Bellet, l'autre par Richer. Elles se réfèrent au niveau moyen de la mer à Brest et à Cancale (rocher du Herpin), et forment une polygonale empruntant certains côtés de la chaîne. Ces mesures ont eu un succès considérable, et ont donné pour la hauteur du Panthéon au-dessus du niveau moyen de l'Océan : 143,84 mètres pour le sommet de la lanterne, soit 60,54 mètres pour le pavage intérieur de l'édifice. L'erreur moyenne, celle dont la probabilité d'être dépassée est de 1/2, a été estimée à 9 centimètres. Cette donnée, point fondamental les altitudes, a permis de recalculer les altitudes de la méridienne de Paris de Delambre et Méchain, puis d'arrêter les altitudes de l'ensemble du canevas primordial. Ainsi, toutes les altitudes portées sur cette carte, ont été déterminées à partir des altitudes géodésiques des points du canevas primordial.

À Bourges, sur la face Est du pilier intérieur Sud-est de la tour Nord de la cathédrale, point de la méridienne, un trait à 3,50 mètres au-dessus du dallage fait office de repère d'altitude géodésique et est daté de 1818. Sa cote compensée est de 159,360 m. Elle a servi de point origine des altitudes pour Paul-Adrien Bourdalouë lorsqu'il entreprit son "Nivellement du Département du Cher" en 1850, nivellement géométrique de précision au niveau à lunette, avec des portées courtes entre appareil et mires limitées à 125 mètres. Quelques années plus tard, quand ce même Bourdalouë fit son "Nivellement Général de la France" par la même méthode de nivellement géométrique de précision, en se référant au niveau moyen de la Méditerranée à Marseille, et après avoir compensé son réseau en 1862, il constata à Bourges que les altitudes de son nivellement de 1850 étaient trop élevées de 2,487 mètres. C'est dire aussi que les altitudes géodésiques issue des mesures zénithales de la chaîne méridienne de Delambre et Méchain étaient trop élevées de cette quantité. Cela donne une indication sur la précision des altitudes géodésiques.

Il suffit aujourd'hui de comparer les altitudes portées sur la carte du XIX<sup>e</sup> siècle avec les altitudes de la carte moderne issues du nivellement géométrique, pour constater la précision du nivellement géodésique. Cet écart est bien de 2 à 3 mètres dans les environs de Bourges.



Le repère du nivellement géodésique de la cathédrale de Bourges



La polygonale du nivellement géodésique à visées réciproques et simultanées entre Cancale et Paris



■ ■ ■ **L'altitude du Mont-Blanc:** À la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, une "compétition" apparue pour savoir quel était du Mont-Rose ou du Mont-Blanc, le sommet le plus élevé des Alpes. Faute de pouvoir y amener des instruments géodésiques pour une grandiose visée zénithale – le Mont Blanc venait d'être gravi pour la première fois le 8 août 1786 – il a bien fallu déterminer leur altitude indépendamment l'un de l'autre et par l'intersection de visées venant de stations bien moins élevées. Pour ce faire, en 1803-1804, une triangulation de la Savoie, rattachée récemment à la France sous le nom de département du Mont-Blanc, fut entreprise en s'appuyant sur la chaîne "parallèle" de la triangulation de Cassini, à 180 000 toises au sud du parallèle de Paris. Le sommet du Mont-Blanc fut intersecté depuis deux stations, par deux visées formant entre elles un angle de 55 grades: l'une de 44 km depuis Le Môle (alt 1 866 m), sommet dominant la vallée de l'Arve, à 5 km au Nord-Est de Bonneville, et l'autre de 35 km depuis Le Mont Chervin (alt 2 414 m), sommet de la partie Sud de la chaîne des Aravis, à 5 km au Nord d'Ugine. Les altitudes se référaient à la hauteur du lac de Genève, connue elle-même par des observations barométriques. Les deux visées sur le Mont-Blanc ne furent évidemment pas réciproques, le sommet n'ayant pas été stationné.



## L'enchaînement des triangles ayant permis de déterminer l'altitude du Mont-Blanc

Une nouveau calcul de ces triangles de Savoie fut entrepris 25 ans plus tard (1827-1829) en partant cette fois, des nouvelles chaînes parallèles. Pour connaître précisément les longueurs des visées, les deux stations ont été reliées aux deux sommets du "Parallèle Moyen" de Clermont: Le Granier, à 12 km au Sud de Chambéry, et Le Colombier (sommet Sud dit Le Cuerme) à 4 km au Nord de Culoz, par une triangulation avec un point intermédiaire: Le Salève (grand Piton), à 12 km au Sud de Genève.

Pour les altitudes, le niveau des eaux moyennes du lac de Genève à la sortie du Rhône, fut arrêté à l'altitude 374,80 mètres:

- par le nivellement géodésique du "Parallèle de Bourges" (1818-1824) depuis l'île de Noirmoutier jusqu'à la frontière suisse, au sommet de La Dole (repère sol) à 1 680,85 m, en accord à Bourges avec les altitudes des points de la Méridienne de Dunkerque,
- par la détermination géométrique de la hauteur de la Dole au dessus du lac de Genève, obtenue en 1812, par le Génie suisse.

La correction de réfraction fut déterminée par l'étude des visées zénithales réciproques entre les points de ce canevas. Le nivellement du Salève fut rattaché par une station intermédiaire située à l'Observatoire de Genève, au niveau des eaux moyennes du lac de Genève

L'altitude du Mont-Blanc fut trouvée à:

- 4 812,42 mètres par la visée depuis Le Môle (dist zénith 95,76 grades)
  - 4 809,36 mètres par la visée depuis le Mont Chervin (dist zén 95,93 gr)
- et fut ainsi arrêtée à la moyenne de 4 810,89 mètres.

On peut mentionner qu'en 1821-1823, à l'occasion de la mesure d'un arc de parallèle exécuté en Piémont et en Savoie, par des officiers et astronomes piémontais et autrichiens, l'altitude du Mont-Blanc fut déterminée par Carlini et Plana, par de longues visées zénithales directes du Colombier (51 km) et du Granier (82 km). L'altitude trouvée alors de 4 802 mètres fut reconnue trop faible par suite d'une sous-estimation des altitudes du Colombier et du Granier.

Les livres de géographie du XIX<sup>e</sup> siècle portèrent donc cette altitude de 4 810 mètres. Plus tard, des mesures géodésiques plus fines et rattachées aux repères du Nivellement Général de la France, nivellement géométrique de précision, lui affectèrent l'altitude de 4 807

mètres. Aujourd'hui, la carte IGN édition 2002 porte à nouveau l'altitude 4 810 mètres déterminée par GPS.

La détermination des altitudes des sommets des Pyrénées fut l'objet de travaux géodésiques remarquables de 1825 à 1829. Le lecteur se reportera à l'article de Raymond D'Hollander paru dans XYZ n° 98. ●

## Bibliographie

*Nouvelle Description géométrique de la France* par L. Puissant (volume I: 1832 - volume II: 1840)

*Mesurer la Terre, 300 ans de Géodésie française*, par Jean-Jacques Levallois (Chapitre v) (édition AFT 1988)

Revue XYZ n° 68 (3<sup>e</sup> trim 1996): Biographie

de Paul-Adrien Bourdalouë, par Robert Vincent

Revue XYZ n° 98 (1<sup>er</sup> trimestre 2004): Les premières déterminations d'altitudes des sommets des Pyrénées, par Raymond D'Hollander.

## ABSTRACT

*While the ignorance of the outline of France had come to an end as early as the eighteenth century thanks to the work of the Cassinis, the same lack of knowledge still prevailed, at the time of the french Revolution, for altitudes, although barometer measures already gave a first approximation. Delambre and Mechain, during their surveys, studied from 1792 to 1798, on the Paris meridian, simultaneously measured the triangle angles and the zenithal angles of shots. The altitudes of the survey marks of the chains were thus determined with a accuracy unequalled till then. In 1817, a new map of France was planned on the scale of 1/80000 and called "carte de l'État Major", showing altitude marks, which was a substantial advantage compared to its predecessor, Cassini's map, which pictured the relief. To achieve this task, on the example of the Paris meridian by Delambre and Mechain, a set of meridian and parallel chains, along with a complementary geodesy of prime importance, was to form the framework observed from 1818 to 1850, in order to serve as a basis for the surveys. Thanks to the same method, the height of the Mont-Blanc was precisely determined in 1828-1829.*

# Plaidoyer pour la géodésie

■ André FONTAINE

*En rendant hommage à Méchain, on rend hommage à un homme, à ses collègues et à toute une époque où la détermination de la forme et des dimensions de la Terre restait un problème scientifique même si les travaux des "Cassini" en avaient déjà donné une application cartographique. Cette fin du XVIII<sup>e</sup> siècle est une charnière: la nouvelle observation de la méridienne de France en vue de l'obtention d'une référence universelle pour l'unité de longueur est sans doute la dernière mission à but avant tout scientifique.*

**L**e passage de la science à la technique s'est ensuite opéré en douceur et on est resté fidèle à la méthode de Delambre et Méchain, en oubliant presque de la justifier plus en détail. Je reprendrai donc l'exposé du principe du calcul de la méridienne, puis j'évoquerai la justification et l'intérêt de la géodésie, enfin nous verrons les conséquences de l'abandon actuel de cette méthode.

La commission "Borda, Lagrange, Laplace, Monge, Condorcet" avait fixé l'objectif: *"..Nous proposons donc de mesurer immédiatement un arc de méridien depuis Dunkerque jusqu'à Barcelone ce qui comprend un peu plus de 9° 1/2... A ces avantages se joint celui d'avoir les deux points extrêmes au niveau de la mer..."*<sup>1</sup>. Il s'agit bien d'un arc de méridien de la surface équipotentielle proche du niveau de la mer, on dirait aujourd'hui du géoïde. A cette époque, les altitudes précises n'existaient pas, d'où le principe des mesures:

si on suppose que la surface équipotentielle de la Terre est rigoureusement un ellipsoïde de révolution, quelle que soit l'altitude des stations, la mesure d'un angle horizontal sera égale à la valeur de l'angle à la surface de cet ellipsoïde,

à ces mesures d'angles horizontaux, il suffit d'ajouter une ou plusieurs bases proches du niveau de la mer et on obtiendra la mesure rigoureuse d'un arc de méridien par observation d'une chaîne de triangles.

C'est ce que firent Delambre et Méchain avec le bonheur et les difficultés qu'on connaît. C'est ce que feront les géodésiens jusqu'à l'apparition des mesures sur satellite.

Pourtant, on sut rapidement que la Terre n'était pas rigoureusement un ellipsoïde de révolution et Delambre lui-même écrivait, dès 1804, *"..Le système des irrégularités locales*



Bibliothèque de l'Observatoire de Paris.

**Portrait de Delambre (1749-1822) des Collections de l'Observatoire de Paris, également représenté avec "Base du Système...". Sa main droite tient un mètre; un kilogramme est placé sur la table.**

*explique tout, et par conséquent n'explique rien; il rend tout possible mais il rend tout incertain..."*<sup>2</sup>. Malgré ce pessimisme, la méthode de la géodésie est définitivement fixée:

les mesures sur la surface topographique sont corrigées pour obtenir les valeurs qu'elles auraient eues si elles avaient été effectuées sur le géoïde, ces mesures corrigées sont reportées sur un ellipsoïde de révolution.

Les instruments s'adaptent avec l'emploi du théodolite, la mesure des altitudes se généralise et la méthode donne satisfaction. Pourquoi ce succès? Delambre a raison: les irrégularités du géoïde n'autorisent plus l'hypothèse que la verticale en tout point de station se confond avec la normale à un ellipsoïde de révolution. Il y a ce qu'on appelle des déviations de la verticale. Mais sa méthode est plus exacte qu'il semble le croire.

(1) J.-J. Levallois - Mesurer la Terre (page 61)

(2) J.-J. Levallois - Mesurer la Terre (page 81)



En effet, si on considère qu'en un point de station on détermine les azimuts d'un point visé en tournant autour de deux verticales, différentes mais proches l'une l'autre, on montre que l'écart entre ces deux azimuts est donné par la formule :

$$dA = dM \sin L - \operatorname{tg} s (\cos A \cos L dM - \sin A dL)$$

M et L longitude et latitude du point de station

dM et dL écarts des deux verticales exprimés en écarts de longitude et latitude

s et A site et azimut du point visé

L'écart d'azimut d'une direction dû à un écart des verticales dépend de deux termes : le premier est indépendant du point visé, le deuxième, en raison du facteur  $\operatorname{tg} s$ , reste très petit et indissociable des erreurs d'observation dans le cas de stations assez éloignées et situées sur les points hauts. L'angle horizontal entre deux directions peut donc être reporté sans correction sur le géoïde et rien n'est changé dans le calcul de la Méridienne tel qu'il fut fait par Delambre et Méchain.

Il faut aussi dire un mot des longueurs sur le géoïde car elles sont aussi touchées par ses irrégularités ; pour le calcul de la correction en fonction de l'altitude, on suppose que ces irrégularités sont faibles et, dans la zone de travail, on prend une surface régulière approchée (sphère ou ellipsoïde de révolution). Ces conditions sont réalisées en géodésie où on se borne à des cotés qui n'excèdent pas quelques dizaines de kilomètres.

On a donc pu adopter la méthode de Delambre et Méchain, mise au point au XVIII<sup>e</sup> siècle sur l'hypothèse fautive que le géoïde était rigoureusement une surface mathématique, car, malgré les irrégularités du géoïde, on construit un modèle sur lequel la position d'un point n'est pas liée à celle du point associé sur la surface topographique mais sur lequel sont, par définition, conservés les angles horizontaux et les longueurs sur le géoïde. Ce sont ces deux dernières qualités qui ont assuré le succès de la géodésie qui, remarquons le, fait, à partir d'observations sur la surface topographique, des calculs précis sur un modèle, alors qu'on ne connaît ni la forme du géoïde ni sa position exacte par rapport à cette surface topographique. On procède par report des mesures sur le modèle.

Lorsque les mesures à partir des satellites donnèrent les coordonnées cartésiennes dans l'espace des points de la surface topographique, ce fut un grand progrès scientifique. Naturellement, il était normal d'essayer d'utiliser les coordonnées nouvelles très précises de la surface topographique pour tester la validité de la Nouvelle Triangulation de la France.

Mais, tout calcul pour passer de ces coordonnées cartésiennes aux coordonnées obtenues précédemment par la géodésie ne seront toujours que des recettes plus ou moins justes, puisqu'on sait que, en géodésie, on ne connaît pas la position mathématique sur la surface topographique du point dont le modèle donne les coordonnées. Voilà pourquoi, depuis des années, je m'insurge contre certaines idées reçues :

- non, la méthode de la géodésie traditionnelle n'est pas moins précise que les méthodes satellitaires : les résultats sont plus imprécis parce que les mesures étaient plus imprécises,
- les comparaisons générales des coordonnées de la NTF avec les coordonnées nouvelles résultent de recettes qui faussent les résultats, il faut le dire.

Puisqu'on commémore le deuxième bicentenaire de la mort de Méchain, je souhaite qu'on s'inspire de la ténacité et de la rigueur scientifique des savants de cette époque qui se sont attachés malgré les difficultés à fournir les résultats les meilleurs possibles avec les moyens dont ils disposaient. La première rigueur scientifique, c'est de parler clairement. Linné a fort justement écrit : *"La première étape de la science consiste à distinguer une chose d'une autre. Cela permet de connaître leurs traits particuliers ; mais pour que ce savoir puisse être fixé et demeurer permanent, des noms doivent être attribués et retenus."*

Chacun distingue bien les caractères particuliers des coordonnées calculées par la géodésie et de celles obtenues par projection de la surface topographique sur un ellipsoïde de révolution. Il serait donc scientifique de réunir quelques spécialistes pour attribuer des noms différents à ces deux types de coordonnées.

J'ai à maintes reprises proposé d'appeler les unes géodésiques et les autres géométriques, puisque l'étymologie de ces deux adjectifs indique qu'il s'agit de questions terrestres. D'autres propositions peuvent être formulées, les questions de vocabulaire n'ont qu'un objectif : désigner par des mots différents appropriés les choses différentes.

L'emploi de recettes pour comparer les nouvelles coordonnées aux anciennes n'est pas en soi très répréhensible : on fait ce qu'on peut. Mais en l'occurrence, il est facile de faire mieux. L'impossibilité de recettes exactes vient de la nature différente des coordonnées à comparer ; il suffit donc de calculer des coordonnées de même type. Les observations de la NTF ne permettent pas d'obtenir des coordonnées cartésiennes dans l'espace. Mais, les observations GPS peuvent facilement être traitées par la méthode de la géodésie pour obtenir des coordonnées du type de celles de la NTF. Les moyens de calcul sont tels actuellement que la compensation géodésique des observations GPS, par exemple du réseau de 1<sup>er</sup> ordre, est une tâche sans commune mesure avec la somme des calculs exécutés par Delambre et Méchain. On disposerait alors de deux systèmes géodésiques de même nature dont on sait qu'ils sont facilement comparables par la méthode préconisée par Monsieur Dufour.

Pourquoi employer des recettes alors qu'on peut utiliser une méthode plus rigoureuse ?

Le meilleur hommage à rendre aux savants français, qui ont ouvert la voie du développement de la géodésie, serait que les "Journées Méchain" aboutissent à une approche scientifique des problèmes créés par le changement de méthode de calcul des coordonnées de points à la surface de la Terre. ●





- les angles en Espagne (Fig. 1) et il commence les observations astronomiques. Il a le projet d'étendre les triangles jusqu'à l'île de Cabrera au sud de Majorque, pour avoir un arc de 12° depuis la latitude 39° jusqu'à 51° d'où milieu à 45°.

Interruption du travail : Après l'exécution du roi Louis XVI, la guerre est déclarée entre la France et l'Espagne et Méchain est empêché de repasser les Pyrénées. Il étudie des triangles pour aller dans les îles, mais il a un accident qui l'immobilise deux mois. Chaix continue ce travail. Finalement, Méchain décide de partir lorsqu'il obtient un passeport, en 1794, pour se rendre en Italie. Il passe à Livourne puis Gênes d'où il gagne Marseille et enfin Perpignan en 1795.

## Le retour en France 1795-96

### ■ Les difficultés qui retardent Méchain

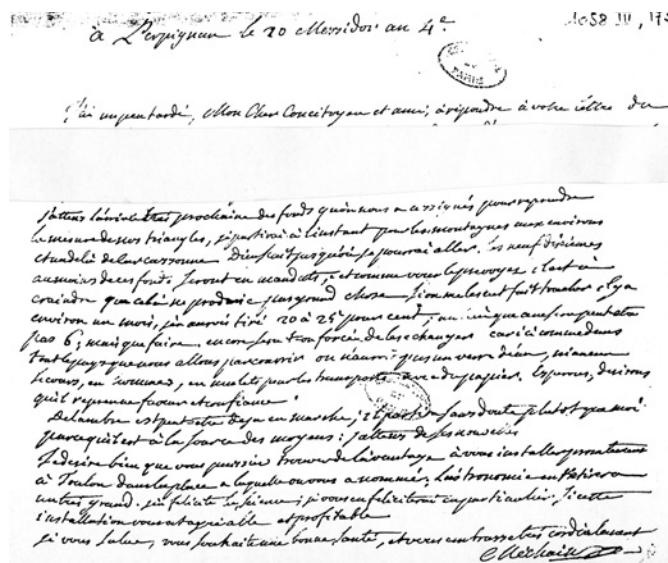
Récit de Lalande dans *Histoire de l'Astronomie pour 1795* (d'après des lettres de Méchain) : "Le C. en Méchain, après avoir été, pour ainsi dire, prisonnier en Espagne et en Italie, revint enfin du côté de Perpignan, pour continuer les triangles qu'il avait faits depuis Barcelone : mais les difficultés le désolaient. Il nous écrivait, le 8 brumaire, du pic Bugarach, où l'on ne gravit qu'au risque de la vie. Il avait porté une tente pour y coucher : mais le pic a tout au plus l'étendue nécessaire pour les étais du signal ; il n'y a rien au-dessous que des précipices [...] Cependant il n'y a pas d'autre endroit où l'on puisse avoir un signal qui corresponde à quatre triangles principaux, et d'où l'on puisse voir six signaux différents. Il était donc obligé d'y gravir tous les jours..."

Autres difficultés, d'après Méchain, lettre à Flaugergues, de Perpignan le 20 Messidor an IV ou 8 juillet 1796 : "J'attends l'arrivée très prochaine de fonds qu'on nous a assignés pour reprendre la mesure de nos triangles. Je partirai à l'instant pour les montagnes aux environs et au delà de Carcassonne. Dieu sait jusqu'où je pourrai aller, les neuf dixièmes au moins de ces fonds seront en mandats ; et comme vous le prévoyez il est à craindre que cela ne produise pas grand chose. Si on me les eut fait toucher il y a environ un mois, j'en aurais tiré 20 à 25 pour cent ; au lieu que ce ne peut être pas 6 ; mais que faire. Encore sera-t-on forcé de les échanger car ici comme dans tout le pays que nous allons parcourir on n'aurait pas un verre d'eau, ni aucun secours, en hommes, en mulets pour les transports avec du papier..."

## Deuxième expédition 1803-1804

### ■ Les premières opérations en Catalogne

Méchain est parti le 26 avril 1803 pour l'Espagne, pour continuer la méridienne jusqu'à la latitude 39° (îles Baléares). Il est accompagné de M. le Chevalier, Augustin Méchain son fils cadet, Dezauche fils. De plus, Chaix s'est joint à lui. Lalande, secrétaire du Bureau des longitudes, a sans doute été chargé des préparatifs, car il écrit dans son *Histoire de l'Astronomie pour 1803* : "Je lui ai remis un excellent cercle de 19 pouces, fait par M. Lenoir ; on y a ajouté des lunettes à grande ouver-



Extrait de la lettre de Méchain du 20 Messidor an IV. Archives de l'Observatoire de Paris.

ture ; il y a douze grands réverbères, et il est en état de mesurer ses triangles sur Majorque et Ibiza, quoiqu'à 93 milles de distance de la côte de Catalogne, dans les mois de janvier, février, mars qui sont les plus favorables à ces observations ; en attendant il a formé six triangles subsidiaires entre Barcelone et Tortose, comme on le voit en détail dans le Moniteur du 15 novembre. [...] il était le 27 octobre, au plus élevé des pics du Montserrat, pour son dernier triangle. Le 13 novembre, tout était fini. [...] Enfin, le 8 janvier, il est parti pour Ibiza, où il va commencer..."

### ■ Fin de l'expédition, mort de Méchain

A la fin de l'été 1804, Méchain est atteint du paludisme mais il continue son travail sur la montagne. Lorsqu'il descend à Castellon de la Plana, il est trop tard et il meurt le 20 septembre 1804. ●

## Références

Les lettres de Méchain à Flaugergues sont dans les Archives de l'Observatoire de Paris, ms 1058 III.

Honoré Flaugergues (1755-1830), astronome et juge de paix à Viviers (Ardèche), a été nommé associé non résidant de l'Institut national en 1796.

## ABSTRACT

Having in charge the measurements of the Méridienne de France from Barcelona to Rodez, Méchain left Paris in June 1792. His work is quickly made in Spain. But his return to France is delayed by the war. The works began again in 1795 and will be only achieved in 1798. The proposal to enlarge the measures up to Baleares Islands is decided in 1802. Méchain departed in 1803 : he died in 1804, on september 20, his work being not completed. The events are presented in using letters written by Méchain.

# Les progrès des méthodes géodésiques : instruments ou moyens de calcul ?

■ Michel KASSER

*Un retour en arrière est intéressant à mener en matière de Géodésie, afin d'identifier comment se sont manifestés les progrès de cette science. Tout d'abord on peut recenser les raisons qui ont pu exister pour que des évolutions se produisent. Ensuite, on voit aisément que les progrès ont été extrêmement irréguliers, et qu'entre quelques innovations majeures se sont généralement écoulées de très longues périodes où les évolutions ont été soit pratiquement indiscernables, soit du domaine du détail. Et enfin dans cette discipline la place des calculs est d'importance majeure, les grands scientifiques de ce domaine ayant été, d'abord, d'excellents calculateurs, et de ce fait ont beaucoup contribué aux progrès des mathématiques.*

## La Géodésie, pourquoi ?

L'ensemble Géodésie, Topographie et Astronomie a longtemps utilisé un capital de compétences assez voisines, et donc a reposé sur les mêmes personnalités scientifiques. Les attentes des différentes sociétés vis-à-vis de la Géodésie, et donc les moteurs de ses progrès, ont pratiquement toujours été issus des applications suivantes : les cadastres, le génie civil, et les besoins militaires.

L'activité cadastrale, c'est-à-dire l'enregistrement des différentes natures de droits sur le sol, est la base d'une bonne coexistence au sein de toute société. La "paix foncière", obtenue lorsque chacun peut connaître ses droits et ceux des autres, et les accepte, a toujours été la base première de la paix sociale. Et bien évidemment, de tels enregistrements ne se font pas sans un ensemble de mesures géométriques locales (c'est l'étymologie même du mot qui le rappelle), qui elles-mêmes exigent des éléments de géodésie. Un excellent exemple est donné par l'activité annuelle des géomètres dans l'ancienne Égypte, qui après chaque crue du Nil, étaient chargés d'établir de nouveau les limites de chaque parcelle, les limites de l'année précédente étant devenues invisibles sous les couches de limon déposées durant l'inondation. On retrouve également cette activité dans toutes les redistributions de terres, issues par exemple des activités de colonisation. C'est ainsi que les centuriations romaines (terres distribuées aux anciens combattants) sont encore bien visibles dans certaines zones du paysage de Provence.

Le domaine du génie civil (pour de grands ouvrages) a aussi eu de fortes exigences vers la géodésie, et certains ouvrages hydrauliques ont représenté de véritables prouesses compte tenu des instruments disponibles, et ils sont bien connus (p. ex. tunnel d'adduction d'eau percé à Samos par Eupalinos de

Mégare, pont du Gard...). Et les grands ouvrages ont été essentiellement des manifestations issues du pouvoir, militaire ou civil.

Enfin les besoins militaires ont été eux-mêmes un moteur devenu de plus en plus puissant au fil des siècles, pour faire évoluer ce domaine scientifique. C'est ainsi que Napoléon I<sup>er</sup>, pourtant à l'origine du système cadastral français moderne, en a fortement retardé le démarrage en mobilisant toutes les capacités françaises disponibles en géodésie et en cartographie pour l'assister dans les guerres du début du XIX<sup>e</sup> siècle. Et le GPS actuel, si nécessaire à nos travaux modernes, est un dispositif purement militaire...

Un superbe exemple des interactions entre le pouvoir et la Géodésie a été donné par la France au XVII<sup>e</sup> siècle, lors de la création de l'Académie des sciences : parmi les tâches les plus importantes confiées aux nouveaux académiciens, on trouve la mission de faire venir de l'eau en quantité au château de Versailles. Les premiers grands travaux de nivellement sont issus de cette mission ! On note donc que la Géodésie est depuis longtemps un des outils techniques du pouvoir politique, et ne peut pas bien se comprendre en dehors de cette analyse.

## Les évolutions technologiques

Les grandes évolutions de la Géodésie sont toutes liées à la disponibilité de nouvelles technologies, dont subitement une personnalité s'est aperçue qu'elles permettaient de profondes améliorations. De ce fait, ces évolutions se sont traduites par de grands à-coups, entre lesquels les évolutions ont soit été inexistantes, soit simplement à la marge par de petites trouvailles permettant une amélioration de l'ergonomie, du coût ou de la rapidité du travail. Au cours des trois derniers millénaires, qui seuls nous ont laissé des traces d'activités en matière de géodésie, nous pouvons identifier des phases majeures dans les évolutions technologiques : Le travail du métal de l'école d'Alexandrie (II<sup>e</sup> et I<sup>er</sup> siècles av. JC), le travail du verre (Pays-Bas, Venise) à la fin du XV<sup>e</sup> et début du XVI<sup>e</sup> siècle, puis développements mondiaux de l'électronique au XX<sup>e</sup> siècle.

L'école d'Alexandrie (II<sup>e</sup> et I<sup>er</sup> siècles av. JC) a vu des développements extraordinaires dans le travail du métal, et dans la connaissance des lois de la mécanique. Le premier vrai théodolite, appelé "dioptré", apparaît à cette époque, conçu par Héron d'Alexandrie. La finesse du travail



Le "dioptré", de Héron d'Alexandrie, reconstitution exposée au Congrès de la FIG à Athènes, mai 2004.

© M. Kasser



# Métrologie de la Terre, systèmes de référence : aspects historiques et modernes

■ Géraldine BOURDA - Nicole CAPITAINÉ

*Dans la première partie de cet exposé, on évoque les campagnes d'observations géodésiques et astronomiques des XVII<sup>e</sup> et XVIII<sup>e</sup> siècles liées au méridien de Paris, ainsi que les progrès scientifiques majeurs qu'elles ont apportés. Dans la deuxième partie, on présente le prolongement actuel de tels travaux par les déterminations relatives aux systèmes de référence, à l'orientation de la Terre dans l'espace et au champ de gravité terrestre à l'aide des méthodes modernes d'astrométrie et de géodésie spatiale.*

## ■ MOTS CLES

Systèmes de référence, méridien, rotation terrestre, champ de gravité, géodésie spatiale.

## Aspects historiques

Les campagnes d'observations géodésiques et astronomiques des XVII<sup>e</sup> et XVIII<sup>e</sup> siècles ont apporté des progrès scientifiques majeurs relatifs à la "métrologie" de la Terre. Le méridien de Paris, axe de symétrie du bâtiment de l'Observatoire de Paris construit en 1667, a été tout naturellement choisi comme méridien origine de cet ensemble de mesures.

### ■ Mesure de la "taille de la Terre" par Picard au XVII<sup>e</sup> siècle

Au XVII<sup>e</sup> siècle, les opérations de mesure de méridien par l'Académie Royale des Sciences ont eu deux objectifs : une meilleure cartographie de la France et la détermination de la "taille" de la Terre que l'on supposait sphérique.

La mesure d'un arc de méridien consiste à déterminer la distance terrestre qu'il faut parcourir le long du méridien pour que la latitude augmente de l'amplitude de cet arc. L'abbé Picard fut l'initiateur d'une méthode de mesure basée sur une triangulation géodésique rigoureuse. La mesure de méridien qu'il effectue entre Sourdon (près d'Amiens) et Malvoisine (au Sud de Paris) utilise de nouveaux instruments mis au point par lui-même et de nouvelles horloges à pendule de Huygens. Son ouvrage "La mesure de la Terre" donne, en 1671, une valeur du degré de méridien qui fournit la première mesure précise du rayon de la Terre. Cette mesure, associée à une campagne de

détermination de longitudes astronomiques par rapport au méridien de Paris permit la réalisation de la première Carte de France rapportée à ce méridien rectifiant de façon sensible les côtes de France. Le prolongement des mesures de l'arc de Picard par J.-D. Cassini, la Hire et Cassini II jusqu'aux Pyrénées, puis jusqu'à Dunkerque, fournit, en 1720, la première "Méridienne de France".

### ■ Mesure de la "forme" de la Terre au XVIII<sup>e</sup> siècle

Au milieu du XVIII<sup>e</sup> siècle les mesures de méridien ont eu pour principal objectif la mesure de la "forme" de la Terre, c'est à dire de son aplatissement.

En effet, les prévisions théoriques de Newton et Huygens, ainsi que les observations de Richer de la longueur du pendule battant la seconde à l'équateur préoyaient un aplatissement de la Terre aux pôles. Or, Cassini II en comparant les mesures d'arc de méridien au nord et au sud de la Méridienne de France concluait dans "De la grandeur et de la figure de la Terre", en 1720, à un allongement de la Terre aux pôles. Un long débat commence alors au sein de l'Académie Royale des Sciences qui décide, pour trancher, l'organisation de campagnes de mesures d'arcs de méridien en Laponie (1736-1737) et au Pérou (1735-1745). Ces missions, ainsi que la réalisation, en 1740, de "La Méridienne vérifiée" par de nouvelles mesures plus précises de Lacaille, Cassini III et Maraldi II, ont définitivement permis de conclure à l'aplatissement de la Terre aux pôles et ont fourni une valeur réaliste de ce paramètre.

### ■ Mesure du "mètre", dix-millionième partie du quart du méridien terrestre

A l'époque de la Révolution Française, les nouvelles opérations de mesure de méridien ont pour objectif la définition d'une nouvelle unité de longueur, le mètre.

En effet, à la suite des cahiers de doléances envoyés aux assemblées, l'Assemblée nationale ordonne par le décret du 8 mai 1790, la réforme des mesures en France, puis adopte, par le décret du 30 mars 1791, suivant le choix de l'Académie des Sciences, la grandeur du méridien terrestre comme base du nouveau système décimal de mesures. Les académiciens Delambre et Méchain sont chargés des nouvelles mesures d'arc du méridien de Paris, entre Dunkerque et Barcelone ; ils mènent ces opérations, de 1792 à 1798, avec une très grande rigueur scientifique et en utilisant une instrumenta-

■ ■ ■ tion entièrement nouvelle. En 1793, puis 1795, la Convention adopte le système métrique et confie sa réalisation à des commissions successives, impliquant l'Académie des Sciences, puis l'Institut et le Bureau des longitudes dès leur création en 1795. La loi du 10 décembre 1799, sanctionne définitivement le système métrique des poids et mesures et définit le mètre comme "la dix millionième partie de l'arc de méridien terrestre, compris entre le pôle Nord et l'équateur". La longueur du mètre "définitif" est fixée par le résultat des mesures de Delambre et Méchain en référence à la toise du Pérou.

## ■ Evolution des références relatives à la forme de la Terre et au positionnement

Le méridien de Paris a été le premier méridien fondamental pour une cartographie précise à l'échelle d'un pays aussi étendu que la France. Toutefois, c'est le méridien de Greenwich qui a été adopté en 1884 comme méridien international par la conférence internationale de Washington fixant le système des fuseaux horaires. Actuellement, les techniques modernes d'observation permettent la construction de systèmes de référence terrestres avec une précision centimétrique à l'échelle globale. L'ITRS, système de référence terrestre adopté au niveau international, est réalisé par le "Service international de la rotation de la Terre et des systèmes de référence" (IERS), auquel participent l'Observatoire de Paris, et l'Institut Géographique National (IGN). Dans ce système, le méridien origine, déterminé statistiquement par le traitement de l'ensemble de mesures d'une centaine de stations, se trouve à environ 100 mètres du méridien de Greenwich.

Par ailleurs, la première approximation d'une Terre sphérique, au XVII<sup>e</sup> siècle, exigeait la détermination d'un seul paramètre, le rayon de la Terre. La deuxième approximation d'une Terre sphéroïdale, au XVIII<sup>e</sup> comme au XIX<sup>e</sup> siècle, exigeait la détermination de deux paramètres: le rayon équatorial et l'aplatissement de l'ellipsoïde. Les méthodes actuelles de géodésie spatiale permettent une détermination globale de la forme réelle de la Terre (ou géoïde) exigeant plusieurs milliers de paramètres. Le Groupe de Recherches en Géodésie spatiale (GRGS), auquel appartiennent l'Observatoire de Paris, le Bureau des longitudes,

l'IGN et des équipes du CNES, est actuellement l'un des fournisseurs du géoïde terrestre le plus précis.

## Aspects modernes

Les systèmes de référence terrestre (ITRS, International Terrestrial Reference System) et céleste (ICRS, International Celestial Reference System) sont des notions théoriques dont les représentations pratiques sont les repères terrestre (ITRF, International Terrestrial Reference Frame) et céleste (ICRF, International Celestial Reference Frame). Le repère céleste est caractérisé par les coordonnées d'un ensemble de quasars (quasi-stellar objects), objets extragalactiques très lointains dont les directions peuvent être considérées comme fixes dans l'espace. Le repère terrestre est représenté par un ensemble de positions et vitesses de stations situées sur la croûte terrestre.

## ■ Détermination des systèmes de référence et de la rotation terrestre

L'orientation du système terrestre par rapport au système céleste est fonction de la rotation terrestre dont l'observation est coordonnée au niveau mondial par l'IERS à partir des mesures obtenues par différentes techniques de géodésie spatiale. La connaissance de la rotation de la Terre est indispensable pour traiter les observations astrométriques ou positionner les satellites artificiels autour de la Terre. Cette rotation est étudiée sous trois aspects: (1) les variations de la vitesse de rotation, (2) le mouvement de l'axe de rotation dans l'espace (appelée précession et nutation) et (3) le mouvement de l'axe de rotation dans la Terre (appelé mouvement du pôle). Pour cela on utilise les cinq paramètres d'orientation terrestre (EOP, Earth Orientation Parameters), comprenant: (1) l'angle de rotation (directement lié à UT1), ou bien l'écart (noté LOD) de la longueur du jour par rapport à la valeur nominale de 86400 secondes (Figure 1), (2) les écarts  $\text{dpsi}$  et  $\text{deps}$  (respectivement en longitude et en obliquité) entre modèles de précession-nutation et observations (Figure 2), et (3) les composantes équatoriales  $x_p$  et  $y_p$  du mouvement du pôle de rotation dans la Terre (Figure 3). Ces

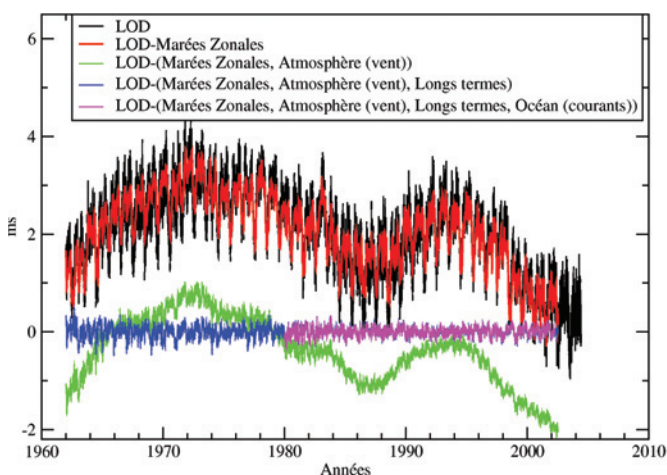


Figure 1 : longueur du jour (source IERS).

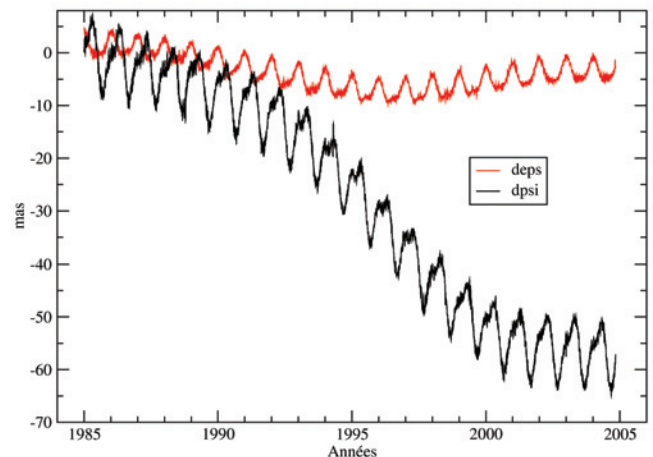
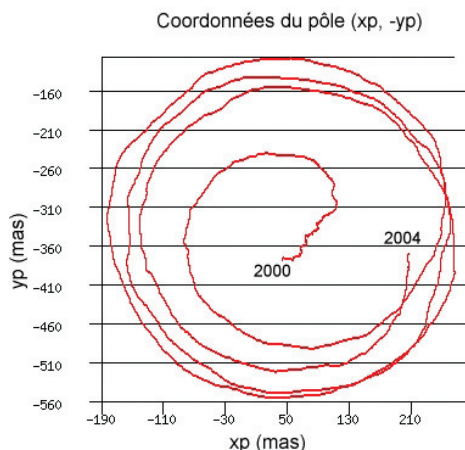


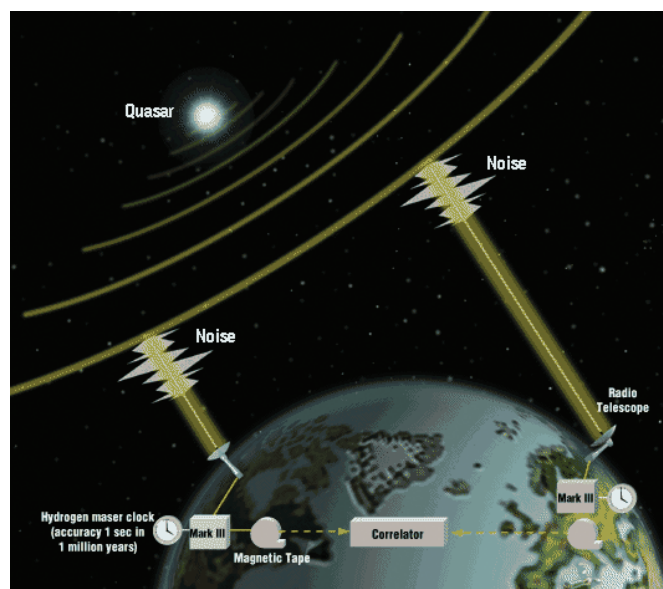
Figure 2 : écarts  $\text{dpsi}$  et  $\text{deps}$  au pôle céleste, par rapport au modèle IAU 1980 (source IERS).





**Figure 3 : mouvement du pôle (ou polhodie) entre 2000 et 2004 (source IERS).**

paramètres sont déterminés par l'IERS grâce aux observations de géodésie spatiale. La télémétrie laser sur satellite (respectivement sur la Lune) consiste en l'envoi d'une impulsion laser depuis une station terrestre, qui est réfléchi vers cette station par des réflecteurs sur le satellite (respectivement sur la Lune). Le système GPS (Global Positioning System) est une constellation de 24 satellites en orbite autour de la Terre, qui envoient des signaux dans le domaine radio. Le système DORIS (Détermination d'orbites et de Radiopositionnement Intégrés par Satellite) consiste en un ensemble de balises terrestres émettant des signaux sur deux fréquences dans le domaine radio vers des satellites équipés de récepteurs. Enfin, le système VLBI (Very Long Baseline Interferometry) utilise un ensemble d'antennes radio-astronomiques terrestres qui reçoivent les signaux de quasars, le même signal reçu en deux antennes distantes de plusieurs milliers de kilomètres étant ensuite corrélé (Figure 4). Les mesures ainsi obtenues par ces différentes techniques contribuent à la réalisation des systèmes de réfé-



**Figure 4 : méthode de détermination de l'orientation terrestre par le VLBI (source IVS).**

rence terrestres et célestes et à la détermination des EOP ; les observations satellitaires sont particulièrement adaptées à la détermination du repère terrestre et du mouvement du pôle, tandis que les observations VLBI permettent de déterminer avec une très grande précision le repère céleste ICRF et les variations en vitesse et direction de l'axe de rotation de la Terre par rapport à ce repère. Le modèle de précession-nutation UAI 2000, déduit du VLBI et adopté par l'UAI en 2000, a une précision meilleure que 0.001".

## ■ Détermination du géoïde

L'étude de la forme de la Terre correspond de nos jours à l'étude du "géoïde". Le géoïde terrestre (Figure 5) est une surface équipotentielle du champ de pesanteur (somme du champ de gravité de la Terre et de l'accélération due à la rotation terrestre), coïncidant avec le niveau moyen des mers et se prolongeant sous les continents ; en d'autres termes, la force de pesanteur est partout normale au géoïde. La détermination du géoïde utilise les techniques de géodésie satellitaire par télémétrie laser et systèmes GPS ou DORIS. Plus précisément, la comparaison de ces observations avec une modélisation de l'orbite des satellites artificiels prenant en compte l'ensemble des forces agissant sur les satellites permet d'ajuster les paramètres du modèle.

## ■ Champ de gravité terrestre statique et variable: mesures et modélisations

Le champ de gravité terrestre caractérise la répartition des masses à l'intérieur de la Terre. La force de gravité dérive du potentiel de gravité que l'on modélise sur la sphère terrestre suivant la base des harmoniques sphériques. Il est donc déterminé par un ensemble de coefficients, appelés coefficients de Stokes, dépendant d'un degré et d'un ordre. Le coefficient de degré 2 et d'ordre 0 ( $C_{20}$ ) caractérise l'aplatissement terrestre. Ce sont ces coefficients que l'on cherche à déterminer grâce aux techniques de géodésie spatiale, afin d'obtenir le champ de gravité terrestre.

La méthode de télémétrie laser sur satellite permet d'obtenir les variations temporelles de certains coefficients harmoniques sphériques, grâce à la détermination de la précession du nœud ascendant de l'orbite du satellite. Cependant, l'accélération ainsi induite du nœud dépend d'une combinaison linéaire des variations des coefficients de Stokes qui ne peuvent être décorellées que par l'utilisation de satellites ayant des orbites de caractéristiques variées. Une nouvelle possibilité de détermination du champ de gravité variable est basée sur l'utilisation des données de la mission GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment), lancée en mars 2002 (Figure 6). Deux satellites sont sur la même orbite basse (~ 400 km) afin de mieux mesurer les coefficients du champ de gravité et sont équipés d'accéléromètres embarqués mesurant avec précision et en temps réel les forces surfaciques (dus par exemple au frottement atmosphérique). De plus, une mesure inter-satellite de grande précision (10  $\mu$ m) nous permet d'obtenir la variation de distance entre les satellites co-orbitaux, et ainsi de déduire les variations de masses (i.e. de gravité) sous-jacentes.

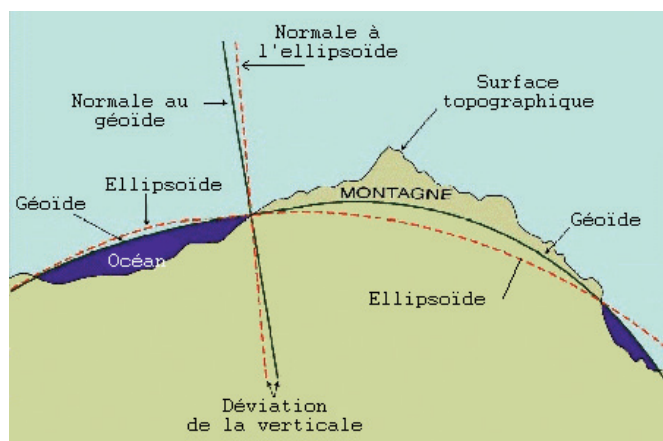


Figure 5 : géoïde terrestre (source SHOM).

## ■ Détermination de l'aplatissement terrestre

La Terre étant un corps déformable en rotation, elle comporte un bourrelet équatorial dû à la force centrifuge, correspondant à un aplatissement aux pôles. Cet aplatissement a tendance à diminuer, autrement dit la Terre tend à être moins aplatie, ce qui s'explique par le rebond post-glaciaire, réaction a posteriori de la Terre (anélastique) à un effet de surcharge dû à une calotte glaciaire polaire qui a diminué depuis la période glaciaire. Ceci montre l'intérêt de mesurer les variations de cet aplatissement grâce aux mesures astrométriques ou bien de géodésie spatiale. La détermination astrométrique par VLBI de la précession terrestre engendrée par le couple exercé par la Lune, le Soleil (et dans une moindre mesure les planètes)

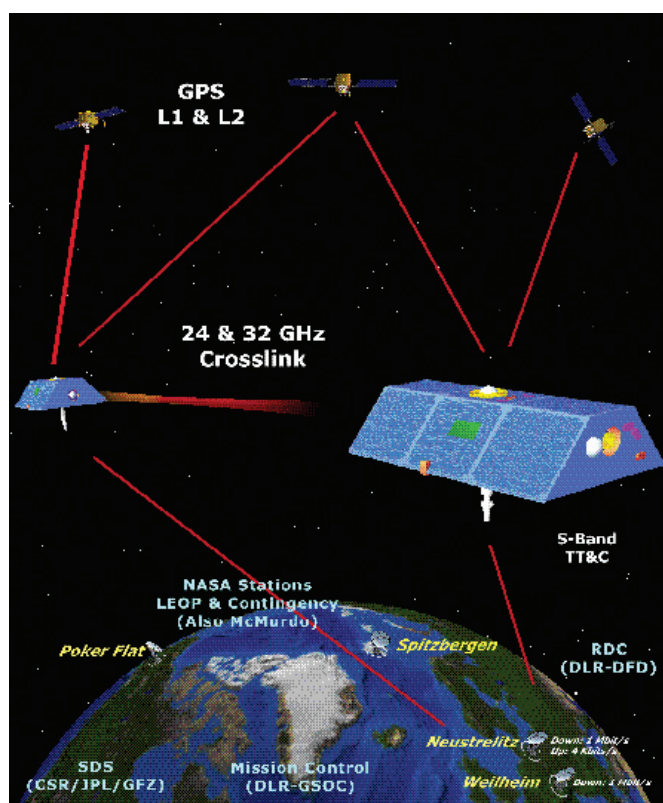


Figure 6 : configuration de vol des deux satellites de la mission GRACE (source GFZ).

sur le bourrelet équatorial, est directement liée au paramètre  $H = (C-A)/C$  d'ellipticité dynamique de la Terre ( $A$  et  $C$  étant les moments d'inertie respectivement équatorial et polaire). D'autre part, les mesures par géodésie spatiale du champ de gravité terrestre donnent les coefficients harmoniques sphériques du potentiel gravitationnel, dont celui de degré 2 et d'ordre 0,  $J_2 = -C_{20}$ , qui est relié (i) à l'aplatissement dynamique  $H$  par la relation :  $C/(MR_e^2) = J_2/H$  ( $M$  et  $R_e$  étant respectivement la masse et le rayon équatorial terrestres) et (ii) à l'aplatissement géométrique ( $f = (R_e - R_p)/R_p$ ;  $R_p$  étant le rayon polaire terrestre) par la relation  $J_2 = (2/3) f - (1/3) m$ ,  $m$  étant le rapport de la force centrifuge à la force de gravité, à l'équateur. Les valeurs admises actuellement sont telles que :  $H = 0.0032737949 = 1/305.455910$ , correspondant au modèle IAU 2000 de précession,  $1/f = 298.25642 \pm 0.00001$  (IAG 1999) et  $(dJ_2/dt)/J_2 = -2.7774 \times 10^{-6}$ , valeurs déduites de la géodésie spatiale.

## Conclusion

Dans la continuité des travaux menés depuis le 17<sup>e</sup> siècle, les techniques actuelles de géodésie spatiale contribuent, avec la technique VLBI, à la détermination des systèmes de référence et à celle de la forme réelle de la Terre. Une grande avancée scientifique a été faite ces dernières années dans ce domaine, d'une part grâce au modèle de précession-nutation de précision meilleure que  $0.001''$  fourni par le VLBI et d'autre part, grâce à la détermination précise du champ de gravité statique et variable par la géodésie spatiale, concourrant ainsi à une meilleure détermination de l'aplatissement de la Terre. Les missions actuelles telles que GRACE, ainsi que les missions futures telles que GOCE, devraient mener à des résolutions spatiale et temporelle encore meilleure des modèles géophysiques, notamment au niveau des océans. ●

## Contacts

Géraldine BOURDA, Nicole CAPITAINÉ,  
Observatoire de Paris, SYRTE/UMR 8630  
61, avenue de l'Observatoire, 75014 Paris  
Tél. : 0140512211 - Fax : 0140512291  
Email : Geraldine.Bourda@obspm.fr

## ABSTRACT

**Key-words:** Reference systems, meridian, Earth rotation, gravity field, space geodesy.

*In the first part of this presentation, we recall the geodetic and astrometric campaigns which were organized during the 17th and 18th centuries associated with Paris meridian, as well as the major scientific progresses they induced. In the second part, we discuss the current development in this field, especially for the determination of reference systems, Earth's orientation, and Earth's gravity field, thanks to modern astrometric and space geodetic techniques.*



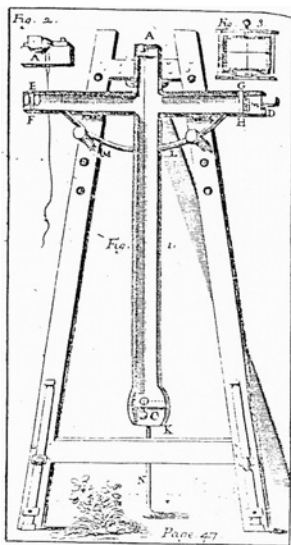
du bronze permet des graduations angulaires d'une précision suffisante (la limitation de précision est due au pointé dans l'alidade à pinnules et à l'œil humain, soit de l'ordre de 1 milliradian environ). Beaucoup d'autres instruments sont créés à cette époque, sphère armillaire, compteurs de tours de roue pour mesurer des distances...

**Travail du verre :** C'est au XV<sup>e</sup> que, simultanément, ont été obtenues des coulées de verre ayant une bonne homogénéité d'indice et quasiment pas de défauts, et que les techniques de polissage de surfaces sphériques ont permis d'atteindre des qualités satisfaisantes. Les premières lentilles étaient évidemment destinées à aider la vue (il y avait certainement à cette époque autant de personnes ayant une mauvaise vue que maintenant), et assez rapidement a été conçue la lunette d'approche, sans doute vers 1590, avec des applications militaires et nautiques évidentes. Deux scientifiques de tout premier plan marquent cette étape majeure, Galilée qui vers 1603 développe une grande lunette pour mieux observer le ciel et comprendre les lois de l'Astronomie et qui est bien connu (lunette = collecte d'un flux lumineux beaucoup plus important, amélioration considérable du pouvoir séparateur de l'œil). Ensuite et beaucoup moins bien connu, l'abbé Picard, quelques dizaines d'années plus tard, construit une variante de lunette avec un réticule, ce qui permet de pointer une direction avec une précision bien meilleure qu'avec les pinnules employées jusque là. En très peu de temps, c'est d'un facteur de plusieurs dizaines que s'améliore la précision des mesures, en astronomie comme en géodésie.

On ne détaillera pas les progrès récents qui sont apparus avec l'électronique au milieu du XX<sup>e</sup> siècle, avec le tube à vide puis les semi-conducteurs, en grande partie à cause de la Deuxième Guerre mondiale. C'est là qu'est le troisième choc technologique évident, qui entre 1960 et 2000 a fait gagner un facteur d'au moins 1000 dans la précision de la géodésie.

Mais entre ces périodes, que s'est-il passé ? En fait, assez peu de choses, des progrès réguliers dans la facture des instruments qui a permis d'en réduire les coûts et la facilité d'emploi. J.-J. Levallois, reprenant en 1984 les mesures effectuées par Picard pour sa mesure du méridien de Paris trois siècles auparavant, a montré que la précision de ses mesures était sensiblement égale à celle des mesures effectuées pour la triangulation française encore employées au milieu du XX<sup>e</sup> siècle. Ce sont les progrès des calculs qui seuls avaient fait la différence. Des constatations presque équivalentes sont d'ailleurs possibles avec le nivellement sur cette même période de trois siècles.

Le niveau de précision de Picard (extrait de son *Traité du Nivellement*, Paris, 1684). Dans le coin supérieur droit, le dessin présente le réticule, invention majeure exposée à cette occasion.



## La place historique des calculs dans la Géodésie

La Géodésie a toujours exigé des calculs numériques considérables, et l'exemple précédent sur les calculs de Picard montre clairement que tant que les calculs se sont fait à la main, ils ont représenté une véritable limitation. D'ailleurs, les personnalités scientifiques de ce secteur ont toutes été, à la base, d'excellents calculateurs. Et plusieurs d'entre elles ont fait faire de gros progrès aux mathématiques, en grande partie pour permettre de traiter de façon plus efficace ces calculs : Maupertuis au milieu du XVIII<sup>e</sup> siècle pour la mesure de l'aplatissement terrestre, plus tard Legendre pour la triangulation de la Méridienne de France de Méchain et Delambre, Choleski au début du XX<sup>e</sup> pour la géodésie de Tunisie. Cet obstacle n'a disparu que depuis l'avènement des ordinateurs, et de nombreux choix techniques faits autrefois ne reposaient que sur un objectif lié aux calculs, soit pour retrouver plus facilement une faute (de lecture, de retranscription...), soit pour avoir des calculs plus faciles à effectuer. Un exemple évident peut être trouvé dans le choix d'une hiérarchisation en ordres successifs des triangulations, procédé utilisé systématiquement autrefois, alors qu'aujourd'hui on n'hésiterait plus devant un calcul en bloc par moindres carrés de toute la triangulation française : ces ordres successifs ont été rendus nécessaires à l'époque pour que les calculs soient raisonnablement faciles à effectuer. A titre d'illustration, on peut rappeler que dans les années 1960 à l'IGN, la compensation d'un bloc de dix points triangulés, effectuée à la main, prenait plusieurs mois de travail à l'opérateur, ce qui donnait un calendrier fort simple : en été, on observe, en hiver, on calcule...

## Conclusion : la Géodésie et ses limites physiques

Les évolutions très rapides des dernières décennies ont conduit à une amélioration extraordinaire de la Géodésie, mais nous nous interrogeons volontiers maintenant sur la possibilité de poursuivre cette évolution. La référence mondiale a une précision de l'ordre de 1 cm. La précision du millimètre sur des coordonnées est sans doute atteignable en terme de technologie de mesures et de calculs. Mais a-t-elle un vrai sens physique à la surface de la Terre, où rien n'est réellement rigide, et où les effets thermiques, les battements de nappes phréatiques, les effets barométriques... induisent des effets perturbateurs très larges ? Le point soulevé ici n'est pas de prédire l'avenir, mais trois siècles après Méchain, il n'est pas certain que la précision de positionnement à l'échelle de la Terre ait encore de gros progrès en vue. Les progrès se feront donc sur la base de concepts nouveaux : une connaissance approfondie du champ de pesanteur terrestre, par exemple ? ●

## ABSTRACT

*The progress of the geodesic methods since the antiquity did not happen in a regular way. One may note a few rare major technological ruptures permitting every time the set up of a new measure process, followed by innumerable small improvements to the margin in the decades or the centuries that have followed. Otherwise, the major importance of the mastery of numeric calculations, obviously more and more forgotten today, is to be put in parallel with the instrumental improvements.*

# Métrologie de fréquence dans le domaine optique à l'Observatoire de Paris

■ Giovanni Daniele ROVERA

*A l'occasion du bicentenaire de la mort de Pierre Méchain, qui est parmi les pères du mètre, un juste hommage me conduit à présenter les dernières techniques qui ont été développées pour la réalisation pratique du mètre moderne. Cette partie technique, qui s'éloigne beaucoup des thèmes habituels de la revue, sera précédée d'une introduction historique expliquant le rôle que les astronomes de l'Observatoire de Paris ont joué, et continuent à jouer, dans la définition et la réalisation du mètre. L'interprétation de l'histoire n'est peut-être pas très rigoureuse, car mon domaine d'activité est la réalisation d'expériences physiques et je manque d'expérience dans la manipulation des données historiques.*

**A**dater de la Conférence Générale des Poids et des Mesures de 1983, le mètre est défini comme la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une fraction précise de seconde. La raison de ce dernier changement, comme pour les changements précédents d'unité, provient du fait que, dans la limite du possible, les unités doivent être basées sur des quantités universellement accessibles qui donnent les meilleures garanties de stabilité et de reproductibilité. Or, si cette formulation convient bien si l'on considère des distances astronomiques pour lesquelles le temps de parcours est mesurable en secondes ou en années, elle n'est pas du tout pratique pour des distances à échelle humaine comme l'est le mètre. Pour la réalisation pratique de l'unité de longueur nous sommes donc obligés de considérer la nature ondulatoire de la lumière. En effet, si l'on prend en considération une radiation monochromatique, la distance entre deux fronts d'onde successifs est parcourue (dans le vide) exactement en une période de l'oscillation de la radiation. En pratique l'on peut matérialiser la position des fronts d'onde successifs avec un interféromètre, et donc réaliser une règle avec des traits espacés exactement d'une longueur d'onde. Nous arrivons donc à la formule qui est le départ de notre histoire:  $\lambda = c/v$ . (1)  
La longueur d'onde  $\lambda$  d'une radiation électromagnétique est le rapport entre la vitesse de la lumière  $c$  et sa fréquence  $v$ .

## L'histoire

### ■ Quelques dates à propos de la vitesse de la lumière $c$

- 1676 Olaf Roemer met en évidence pour la première fois la vitesse de la lumière, à l'Observatoire de Paris, utilisant les satellites de Jupiter [1].

- 1728 James Bradley améliore le résultat utilisant une autre technique basée sur l'aberration de la lumière provenant de l'étoile Gamma Draconis.
- 1799 Naissance du mètre et du système métrique moderne.
- 1842 Christian Doppler découvre l'effet Doppler sur le son. Peu après Fizeau découvre, indépendamment, le même effet sur la lumière et explique correctement le phénomène.
- 1849 Hippolyte Louis Fizeau mesure pour la première fois la vitesse de la lumière avec une expérience de physique sur une base de 8 km entre Paris et Suresnes.
- 1862 Léon Foucault perfectionne la mesure et la réussite en laboratoire, dans la grande salle de l'Observatoire de Paris.
- 1892 Michelson et Benoît mesurent la longueur d'onde de la raie rouge du cadmium au Bureau International des Poids et Mesures à Sèvres.

### ■ Quelques dates à propos de la métrologie moderne

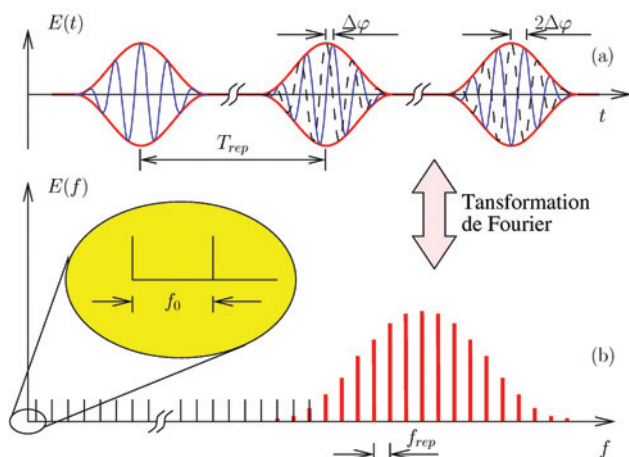
- 1740 Lacaille mesure la Méridienne de France et synchronise, avec des signaux optiques, deux horloges entre Sète et Aix-en-Provence pour la mesure de la longitude.
- 1790 Décision de l'Assemblée Nationale de mettre en place un système d'unité basé sur le système décimal.
- 1791 Méchain et Delambre sont chargés d'améliorer la mesure de la Méridienne de France, de Dunkerque à Barcelone, afin de définir le mètre.
- 1799 Réalisation du Mètre des Archives, représentant la longueur de la dix-millionième partie du quart du méridien terrestre. Réalisation du Kilogramme des Archives, représentant la masse d'un décimètre cube d'eau.
- 1872 Décision de fabriquer une série de mètres prototypes.
- 1875 Signature de la Convention du mètre.
- 1889 Les prototypes internationaux du mètre et du kilogramme sont déposés au BIPM, les autres sont distribués aux états membres de la Convention du mètre.
- 1952 Création du Comité Consultatif pour la Définition du Mètre (CCDM) pour étudier la possibilité de redéfinir le mètre.
- 1960 Nouvelle définition du mètre fondée sur la longueur d'onde dans le vide d'une transition de l'atome de krypton 86 émise par une lampe spectrale.
- 1960 Th. Maiman réalise le premier laser pulsé.
- 1960 Ali Javan réalise le premier laser HeNe continu à 3,39  $\mu\text{m}$ .
- 1969 Naissance du Bureau National de Métrologie BNM.
- 1972 Première mesure absolue de la fréquence d'un laser HeNe stabilisé sur méthane à 3,39  $\mu\text{m}$  au NBS (USA), aujourd'hui NIST, avec une chaîne de multiplication la reliant à l'horloge à césium qui définit la seconde.
- 1975 La CGPM recommande pour la vitesse de la lumière dans le vide une valeur résultant des mesures de longueur d'onde et de fréquence du rayonnement d'un même laser.
- 1976 Naissance du Laboratoire Primaire du Temps et des Fréquences à l'Observatoire de Paris, aujourd'hui BNM-SYRTE (Systèmes de Référence Temps Espace).

- ■ ■ - 1983 Nouvelle définition du mètre fondée sur la valeur de la constante fondamentale  $c = 299792458$  m/s.

Finalement on revient à la case de départ, c'est-à-dire que désormais l'équation (1) est utilisée pour la réalisation pratique de l'unité de longueur. Pour la traçabilité des mesures aux unités fondamentales, les cales étalon qui sont utilisées comme étalon de transfert dans la métrologie dimensionnelle doivent être mesurées avec un interféromètre piloté par un laser. La fréquence de ce laser doit, à son tour, être mesurée directement ou indirectement par une chaîne de multiplication de fréquence qui la relie à la définition de la seconde. Les chaînes de multiplication classiques, comme celle du NBS et celle qui a été utilisée à l'Observatoire de Paris jusqu'à la fin des années 90, étaient des dispositifs très lourds en moyens matériels et humains et s'appuyaient sur des techniques très diverses, optiques et électroniques, à mettre en œuvre simultanément [2].

## La technique moderne

L'introduction d'une technique révolutionnaire depuis le tout début des années 2000 a permis la démocratisation de ce type de mesures. Elle est basée sur l'utilisation d'un peigne de fréquence constitué de raies spectrales dont l'écart est asservi sur l'étalon primaire de fréquence à césium. Ce peigne est équivalent à une règle qui permet de mesurer l'écart entre deux fréquences en comptant le nombre non entier de traits qui les sépare. L'idée n'est pas nouvelle car, depuis l'année 1980, des mesures d'écart entre fréquences optiques ont été réalisées avec des peignes issus de lasers picosecondes ou des modulateurs de fréquence à très fort indice. Mais ces systèmes avaient une bande passante trop limitée pour mesurer directement une fréquence optique. Le pas décisif a été franchi grâce au développement conjoint et indépendant d'une part de lasers femtosecondes mode-bloqués à taux de répétition élevé et d'autre part de fibres dites à cristaux photoniques permettant d'élargir le spectre du rayonnement issu de ces lasers femtosecondes sur plus d'une octave [3]. Pour comprendre le fonctionnement du système de mesure femtoseconde et des techniques utilisées, on fait référence à la figure 1. La sortie du laser est un train d'impulsions, séparés d'un temps  $T$  qui est l'inverse de la fréquence de



**Figure 1:** Train d'impulsions émis par un laser mode-bloqué (a) et spectre correspondant (b).



**Figure 2:** Spectre de la lumière à la sortie d'une fibre à cristaux photoniques, visible sur la gauche de la figure.

répétition  $f_{\text{rep}}$ . Dans la figure a été mis en évidence le fait que deux impulsions successives ne sont pas tout à fait identiques car  $f_{\text{rep}}$  n'est pas forcément une sous-harmonique de la fréquence centrale du laser  $\nu_L$ .

Il en résulte un déphasage de la porteuse dans l'enveloppe de  $\Delta\varphi$  entre chaque impulsion. Une analyse spectrale du signal en sortie du laser (autrement dit sa transformée de Fourier), fait apparaître un peigne de fréquence dont les dents sont espacées de la fréquence de répétition des impulsions  $f_{\text{rep}}$ . On peut montrer que le déphasage  $\Delta\varphi$  induit un décalage de l'extrapolation du peigne à l'origine de  $f_0 = \Delta\varphi / (2\pi T)$  appelé communément offset du peigne. Ainsi, la fréquence de la  $n^{\text{ème}}$  raie du peigne s'écrit:  $f_n = f_0 + n \times f_{\text{rep}}$ . Cette relation simple qui relie deux radio-fréquences  $f_0$  et  $f_{\text{rep}}$  à une fréquence optique  $f_n$  est à la base des mesures de fréquence optique. Dans le cas pratique la mesure de  $f_{\text{rep}}$  est très simple, par contre la mesure de  $f_0$  qui n'a pas d'existence physique est un peu plus compliquée, mais réalisable par une technique dite de l'auto-référence [4]. Cette technique peut être mise en œuvre lorsque le peigne de fréquence s'étend sur plus d'une octave, comme celui présenté en figure 2 à côté de la fibre optique à cristaux photoniques qui est utilisée pour le produire. Lorsque la fréquence de chaque dent du peigne est déterminée, afin de mesurer la fréquence d'une radiation laser, il suffit de mesurer la fréquence du battement qui se produit sur une photodiode entre la radiation inconnue et la raie la plus proche du peigne. Pour avoir plus de détails et une présentation des premiers résultats obtenus voir [5]. ●

## Contact

**Giovanni Daniele ROVERA** - BNM-SYRTE, UMR 8630  
Observatoire de Paris - 61, av. de l'Observatoire, Paris France  
daniele.rovera@obspm.fr

## Références

- [1] J. Vrin ed., 1978.
- [2] G. D. Rovera and O. Acef, IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 48, no. 2, pp. 571-573, 1999.
- [3] T. A. Birks, al., Optics Letters, vol. 22, no. 13, pp. 961-963, 1997.
- [4] S. A. Diddams, al., Phys. Rev. Lett., vol. 84, pp. 5102-5105, May 2000.
- [5] G. D. Rovera, al., Meas. Sci. Technol., vol. 13, pp. 918-922, 2002.

## ABSTRACT

*The first part of this contribution summarizes the history of frequency measurements at the Observatoire de Paris. In fact the activity in this field has started several centuries ago with the discovery of the speed of light by Olaf Roemer. The second part describes the new technique based on a femtosecond laser. With this technique it is possible to perform routine measurements on wavelengths ranging from 1200 nm to 500 nm (250-600THz).*



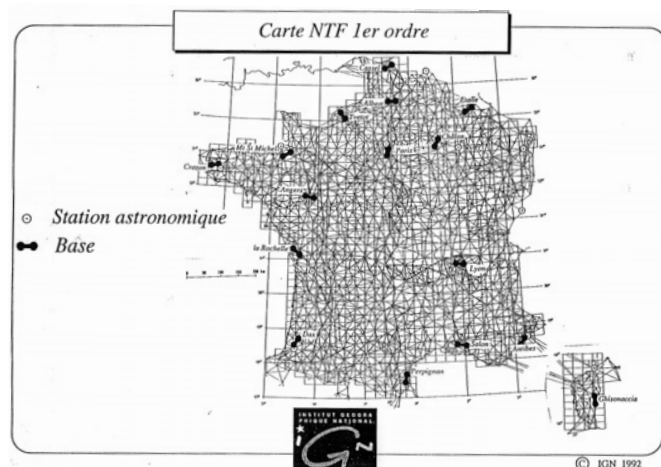
# Evolution de la géodésie en France

■ **Françoise DUQUENNE** Chef du service de la géodésie et du nivellement IGN

## La Nouvelle triangulation Française:

La NTF est le réseau Géodésique Français établi entre 1898 et 1991 et qui a été le réseau National officiel jusqu'en 2000. Ce réseau a été observé par ordre successifs. C'est un réseau bi-dimensionnel, les coordonnées des points sont soit la longitude et la latitude sur l'ellipsoïde Clarke1880IGN, soit les coordonnées planes en projection Lambert I, II, III, IV.

Structure	Densité	Nombre	Précision
Réseau Principal	1 <sup>er</sup> ordre	30 km	800
	2 <sup>e</sup> ordre	10 km	5000
	3 <sup>e</sup> et 4 <sup>e</sup> ordres	3 km	60000
			10 <sup>-5</sup>
Réseau complémentaire	5 <sup>e</sup> ordre		20000
			divers



La croix du Panthéon est le point fondamental c'est à dire que les coordonnées issues de l'astronomie ont été prises comme coordonnées géodésiques. La conséquence est qu'en ce lieu la normale à l'ellipsoïde et la verticale sont confondues. A partir de ce point d'autres points sont déterminés par triangulation. Tous les trois cents kilomètres un points Laplace est déterminé et consiste à réorienter le réseau par astronomie et mettre à l'échelle par mesure de longueur au fil invar. Les observations de triangulation se font par ordre: le 2<sup>e</sup> ordre s'appuie sur le 1<sup>er</sup>, le 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> sur les ordres supérieurs. Jusqu'en 1960 les mesures sont uniquement des angles, à partir des années 1970 des mesures de distances sont incluses de plus en plus systématiquement pour simplifier les schémas d'observations. Les calculs sont opérés soit sur l'ellipsoïde, soit en projection. Au début les calculs de compensations et en particulier le 1<sup>er</sup> ordre comporte de petits blocs avec peu de points mais à la fin des blocs d'environ 1000 points sont compensés. Les ordres inférieurs s'appuient sur les ordres supérieurs qui sont fixés. Pour calculer sur l'ellipsoïde ou sur le plan il faut réduire les observations à l'ellipsoïde et (éventuellement) à la projection.

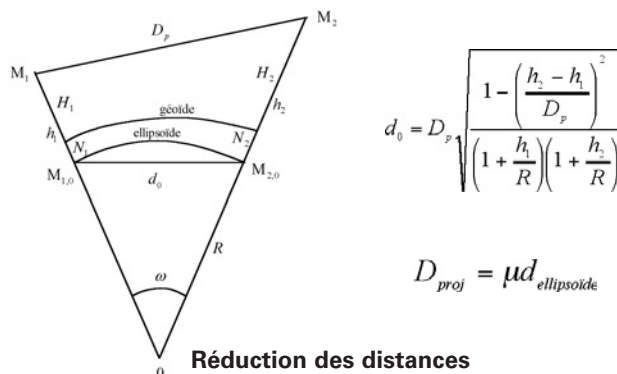
Sur les angles horizontaux une correction est due à la déviation de la verticale: l'axe du théodolite est vertical, et il faut le ramener sur la normale par la relation entre les azimuts géodésique  $Az_g$  (normale) et astronomique  $Az_a$  (verticale) en fonction des composantes de la déviation de la verticale ( $\eta, \xi$ ) et de la distance zénithale de la visée ( $Dz$ ).

$$Az_g - Az_a = -\eta \tan \varphi + (\eta \cos Az - \xi \sin Az) \cot Dz$$

Pour un angle on fait la différence entre les deux directions, on voit que le premier terme qui est indépendant de la direction va s'éliminer et que le deuxième terme s'annule pour une visée presque horizontale. Cette correction n'a donc pas été faite dans la NTF, car il était impossible de connaître la déviation de la verticale sur tous les points, mais cela ne pose problème qu'en montagne.

Une autre correction intervient sur les angles lorsqu'on projette sur le plan, c'est le  $dV$  qui permet de tenir compte de la courbure de l'image de la géodésique: cette correction a bien été appliquée pour la NTF.

Enfin, à partir des années 70, les mesures de distances ont été réduites: au niveau zéro, puis à l'ellipsoïde, puis au plan. Pour la réduction au niveau zéro on a utilisé l'altitude et non la hauteur au dessus de l'ellipsoïde provoquant au maximum une erreur de  $2.10^{-6}$ .



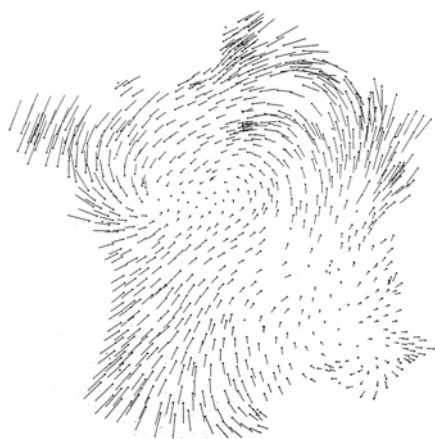
La dernière mission de triangulation a lieu en 1991 dans les Landes. L'établissement de la NTF aura mis un peu moins de cent ans.

Dans les dernières missions de plus en plus de mesures de distances sont pratiquées et mettent en évidence des problèmes de mises à l'échelle du réseau NTF.

## Un nouveau réseau le RGF

En parallèle des mesures de géodésie spatiale sont pratiquées depuis les années 80 et mettent en évidence les problèmes à la fois d'orientation et mise à l'échelle.

La NTF qui était tout à fait satisfaisante lorsqu'on faisait des mesures classiques à courte distance devenait insuffisante pour les techniques nouvelles en particulier GPS. En observant



## Déformations de la NTF par rapport à RGF93



entre Marseille et Brest avec GPS, on pouvait trouver un écart de 5 m avec la NTF. Le RGF (Réseau Géodésique Français) est donc créé sous recommandation du CNIG.

Il est composé de trois réseaux

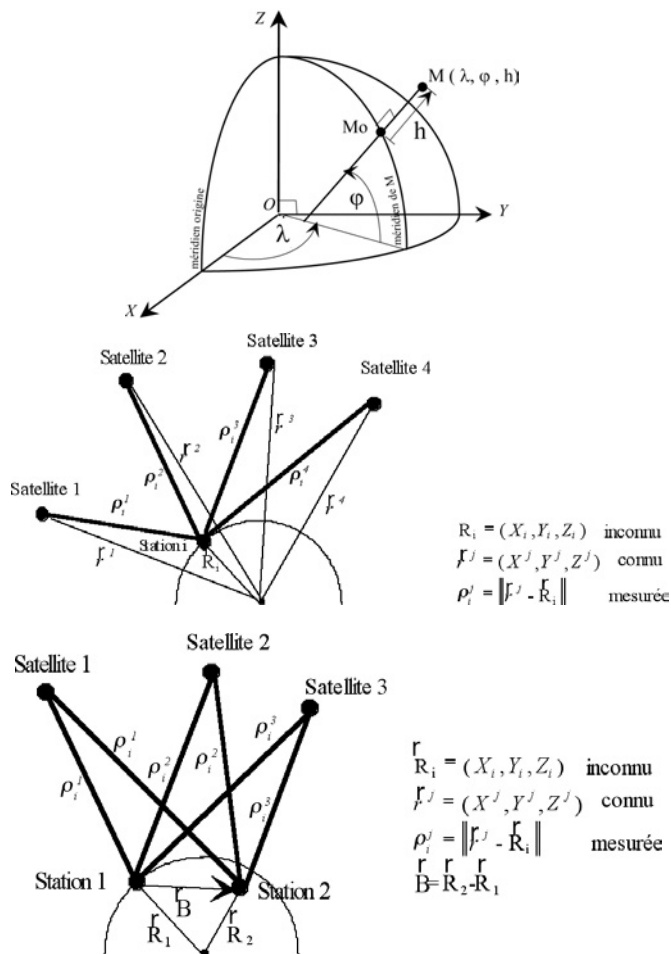
- RRF: Réseau de Référence Français (24 points) géodésie spatiale: VLBI, Laser, GPS (1989-1993)
- RBF: Réseau de Base Français (environ 1000 points GPS)(1994-1996)
- RDF: Réseau de Détail Français: points de la NTF qui ont été convertis en RGF par transformation (grille).

Les éléments de définitions:

- système géodésique: RGF93 (densification en France du système Européen ETRS89)
- ellipsoïde GRS80
- projection Lambert 93

Les observations GPS permettent de positionner un point sur terre dans un repère géocentrique:

- en absolu par l'intermédiaire des positions de satellites dans ce repère
- en différentiel en se rattachant à des points connus dans le référentiel. Les coordonnées sont tridimensionnelles:  $X, Y, Z$  ou  $\lambda, \varphi, h$ .



## Evolution des objectifs de la Géodésie

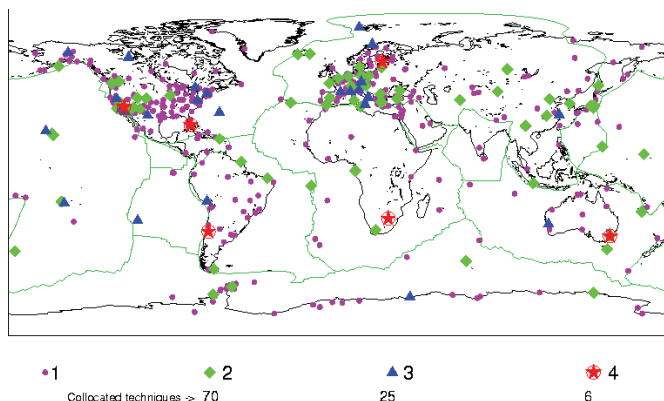
La triangulation a permis de définir la forme de la Terre et d'en déterminer les dimensions par mesures géométriques. Au début de la géodésie spatiale de nouveaux ellipsoïdes ont été définis à partir du champ de pesanteur: GRS67, GRS80, WGS66, WGS72, WGS84...

Les objectifs actuels sont de définir le plus précisément possible des systèmes de référence. La notion de systèmes de référence apparaît dans les années 80. Il s'agit de positionner par rapport à la Terre un trièdre dont l'origine  $O$  est proche du centre de gravité de la Terre,  $OZ$  proche de l'axe de rotation de la Terre, et le plan  $XOZ$  proche du méridien de Greenwich.

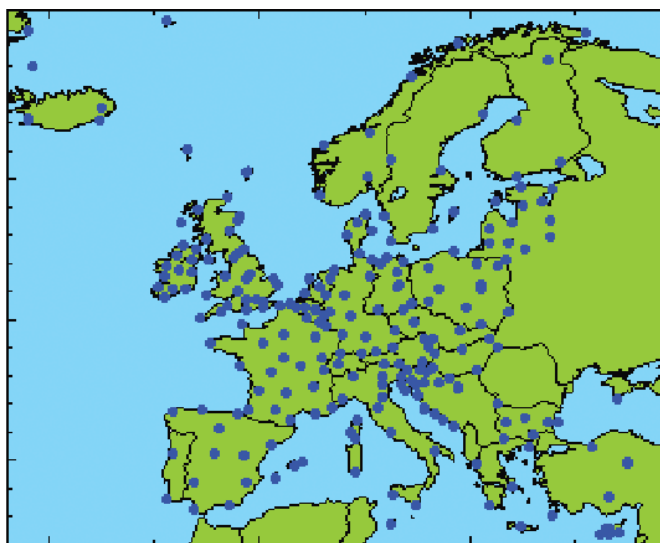
On réalise un système géodésique par un réseau de points, sur lesquels on observe par géodésie spatiale et dont on déduit les coordonnées par un processus de calcul. Le fait de faire un nouveau calcul avec de nouvelles coordonnées constitue une nouvelle réalisation. Le réseau mondial ITRF a été réalisé au début par des campagnes de mesures internationales de VLBI, Laser satellite, GPS et est en majorité maintenant composé de station permanentes (GPS, DORIS). En 2000 ce réseau comporte plus de 500 sites. Dans le système ITRS les plaques tectoniques sont mobiles et donc dans ce système les points sont représentés par leurs positions et vitesses.

Le réseau Européen est une partie densifiée du réseau ITRF. Les deux systèmes étaient confondus en 1989 mais l'ETRS89 suit la plaque tectonique Eurasie et donc dans ce système les points n'ont pas de vitesse due au mouvement de plaques.





ITRF : IERS Terrestrial Reference Frame (IGN/LAREG)



EUREF : Européen Reference Frame

## Le réseau GPS Permanent

La première réalisation du RGF93 a été faite par campagnes de mesures GPS sur le RBF. On sait maintenant que son exactitude est de l'ordre de 2-3 cm. Pour accéder à la référence nationale l'utilisateur doit stationner avec GPS quelques points du RBF (4 entre 5 et 20 km suivant la précision et fiabilité requise). Le RGP, mis en place par l'IGN et de nombreux partenaires, est constitué d'une cinquantaine stations GPS qui observent en continu et dont les observations sont mises à disposition gratuitement sur Internet. L'utilisateur peut en utilisant ses observations et celles de stations RGP accéder à la référence Nationale précisément sans se déplacer. La réalisation RGF issues des stations permanentes a une exactitude d'environ 5 mm

## Les références verticales

Que ce soit la triangulation ou le GPS les mesures géodésiques ne permettent pas d'atteindre les précisions du nivellement de précision et donc dans les deux cas un réseau de nivellement reste nécessaire (NGF-IGN69, NGF-IGN72). En triangulation on a attribué une altitude à la plupart des points du réseau NTF, pour quelques un par rattachement au réseau de nivellement et pour la plupart par mesure d'angles verticaux. En moyenne l'altitude a une précision de l'ordre de 10 cm.

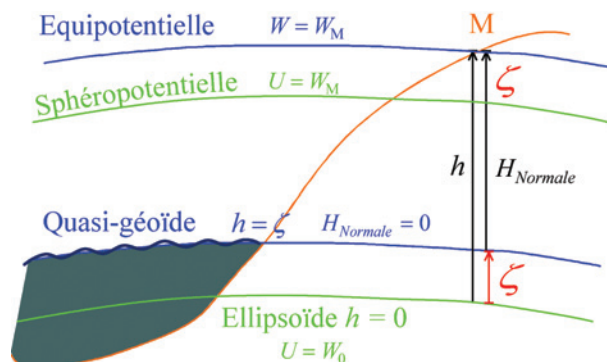


Schéma des différentes hauteurs (H. Duquenne)

En GPS la quantité déduite des observations est la hauteur au dessus de l'ellipsoïde. L'altitude cependant reste une nécessité pour de nombreuses applications (génie civil, VRD,...). Pour avoir une altitude normale il faut connaître la hauteur du quasigéοïde au dessus de l'ellipsoïde.

La grille RAF98 issue de l'adaptation du quasi-géοïde QGF98 à environ 900 points RBF nivelés précisément permet de transformer la hauteur au dessus de l'ellipsoïde GRS80, système RGF93 en altitude IGN69 avec une précision entre 2 et 3 cm. Cette précision est déduite de tests sur de nombreux chantier, répartis sur toute la France.

Avec cet outil, si les observations et calculs GPS sont bien référencés dans le RGF93, les seules observations GPS donnent à la fois un positionnement géométrique tridimensionnel précis mais aussi une altitude (donc dans le champ de pesanteur) avec une précision entre 2 et 3 cm.

## Conclusions et perspectives

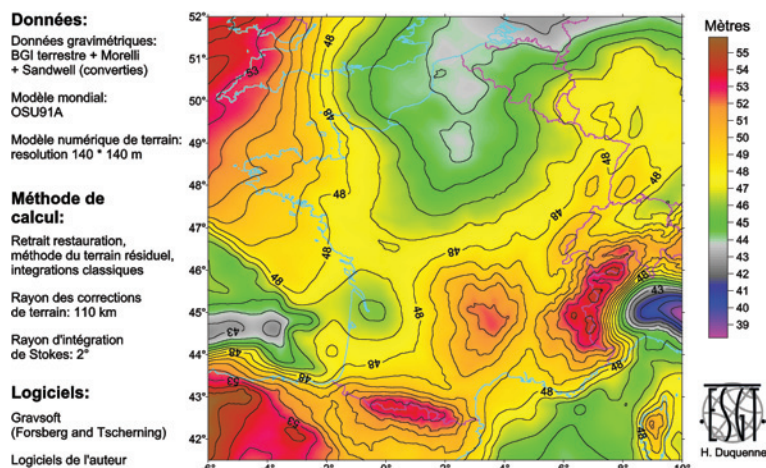
Les objectifs de la géodésie sont donc :

- la réalisation précise des références nationales
- la fourniture à l'utilisateur GPS des moyens d'accéder à ces références le plus précisément et le plus rapidement possible.

Les perspectives :

- amélioration du quasi-géοïde et de la grille RAF98
- accès aux références en temps réel. ●

### Le modèle de quasigéοïde QGF98





# Le Réseau GPS Permanent

■ Thierry DUQUESNOY Institut Géographique National

*Dans le cadre de sa mission de service public, l'IGN fédère l'installation d'un réseau de stations GPS permanentes en partenariat avec des organismes du secteur public et des entreprises du secteur privé.*

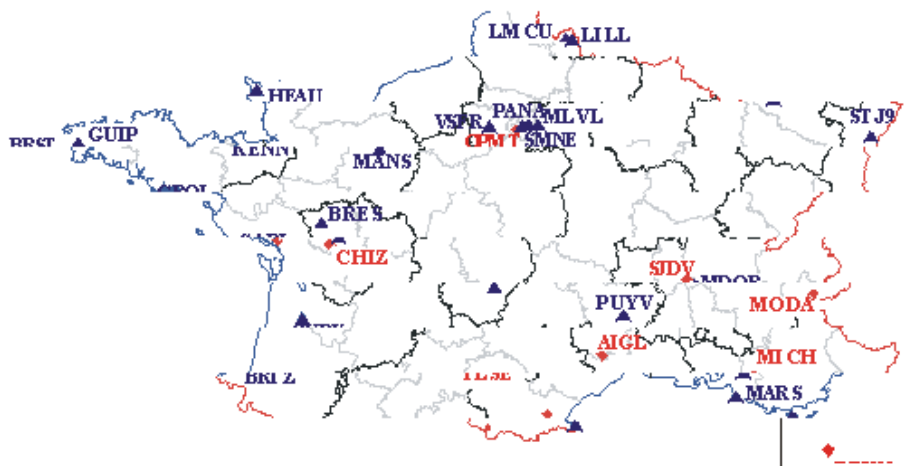


Figure 1 : le réseau Permanent à la date du 10 juin 2004

Un tel réseau de stations a pour double objectif de donner un accès facile et peu coûteux au système de Référence National en matière de coordonnées (le RGF93) et de favoriser l'utilisation des techniques spatiales. En effet, le GPS (Global Positioning System) est en constante évolution, et le nombre de ses applications et de ses utilisateurs augmente régulièrement.

Un inconvénient du GPS étant la nécessité, pour obtenir une localisation précise, de placer un récepteur sur un point de coordonnées connues et un autre sur les positions à déterminer, l'utilisation de deux récepteurs pour un seul qui effectue les mesures sur un chantier est obligatoire. L'incidence sur le coût des opérations est alors non négligeable. Le remplacement de la station située sur le point de coordonnées connues par des stations fixes permanentes utiles à la communauté des utilisateurs, et dont les données sont mises à sa disposition par l'intermédiaire du réseau Internet, permet ainsi une mutualisation des moyens et par conséquent une baisse sensible du coût des opérations.

A ce jour, le Réseau GPS Permanent comprend une cinquantaine de sites, composée pour un tiers de stations implantées et gérées par l'IGN et pour deux tiers de stations appartenant à des organismes partenaires. Si le maintien et l'accès à la Référence Nationale peut se satisfaire des seules stations gérées par l'IGN, l'utilisation de techniques de détermination des points rapides ou en temps réel nécessite une densité de stations plus importantes. C'est ce qui a incité l'IGN à développer sa politique partenariale initiée dès l'expérience pilote de 1997. En contrepartie d'une mise à disposition gratuite vers l'ensemble des utilisateurs des données enregistrées par chaque station permanente, l'IGN propose une éventuelle aide technique, la mise en référence et le contrôle en continu

de la stabilité de la station, ainsi que l'archivage à long terme des données.

Le réseau de stations GPS permanentes présente pour l'utilisateur un autre avantage majeur sur les réseaux de points matérialisés, celui de disposer de coordonnées d'appui recalculées chaque jour. Les coordonnées publiées des points matérialisés datent en effet de l'époque de leur détermination et ne présentent donc pas les mêmes garanties de stabilité dans le temps malgré des visites régulières.

Les enregistrements collectés par les stations permanentes, par fichiers de 1 heure échantillonnés à la seconde ou de 24 heures échantillonnés à 30 secondes, sont transmis dès la clôture du fichier vers les deux centres opérationnels du RGP situés à Saint-Mandé et à Marne-la-Vallée et mis à la disposition des utilisateurs sur deux serveurs ftp aux adresses suivantes :

<ftp://rgpdata.ign.fr> pour le site de Saint-Mandé

<ftp://lareg.ensg.ign.fr> pour le site de Marne-la-Vallée.

Les données des stations permanentes disponibles sur ces sites le sont dans un format standard (RINEX) accepté par la quasi-totalité des logiciels de traitement GPS, et doublement compressées afin de minimiser les temps de transfert. Des outils interactifs de décompression des fichiers sont disponibles sur le site web du RGP :

<http://geodesie.ign.fr/rgp/index.htm>

La présence des fichiers des stations permanentes sur les serveurs est contrôlée en permanence, et la page d'accueil du site web du RGP indique cette disponibilité aux utilisateurs comme aux partenaires. D'autres outils ont été développés afin de renseigner au mieux et le plus rapidement possible les utilisateurs. Toutes ces informations sont également accessibles sur le site web du RGP. ●

# Conclusion en forme d'épilogue

■ Suzanne DÉBARBAT Observatoire de Paris - Bureau des Longitudes

**L**e colloque "Méchain et la longueur du mètre" qui, sur deux journées, a réuni au total près d'une cinquantaine de participants inscrits, ne semble pas avoir déçu ceux qui y ont participé. Il était organisé, à l'Observatoire de Paris, s'y tenant pour partie, et pour une autre dans l'Amphithéâtre de l'Institut d'Astrophysique de Paris situé sur le Campus de l'observatoire. Cette rencontre "Méchain et le Mètre" a débuté, le mercredi 22 septembre par l'accueil des participants à partir de 14 heures avec remise des dossiers contenant, notamment, tous les résumés des communications. A partir de 16 h 30, a eu lieu une visite de la présentation d'objets et de documents traitant des travaux des prédécesseurs de Méchain et de ses activités menées, pour la campagne de mesures de la Méridienne de France de 1792-1798, en parallèle avec Delambre, de Dunkerque à Barcelone. Les participants étaient accueillis en musique dans la Grande galerie de l'Observatoire de Paris par M. Heintzen, agrégé de mathématiques qui s'est intéressé au Système métrique, notamment, dans le cadre de son enseignement. Puis il interprétait, en s'accompagnant de la vielle, instrument dont les facteurs d'autrefois se trouvaient tous à Jenzat dans le Bourbonnais, une de ses compositions "La Commission du Mètre" en hommage aux fondateurs du Système métrique décimal.

Après accueil et présentation générale par le Conservateur, M<sup>me</sup> Bobis, la visite de la galerie permettait à chacun d'examiner plus particulièrement tel ou tel document ou objet. De l'ensemble des mesures de Méchain et de Delambre est issue la décision du choix de la longueur du mètre, mètre dont plusieurs exemplaires étaient présentés. Enfin venait la seconde campagne de Méchain achevée sur l'annonce de son décès, le 20 septembre 2004, reçue d'Espagne. Outre des instruments de cette opération, étaient exposés, entre autres objets, la "Toise du Nord" et la "Toise du Pérou", cette dernière ayant servi de référence pour la longueur du mètre de 1799, à 3 pieds 11.296 lignes de cette toise, deux des quatre "Règles de Borda" employées pour la longueur des bases...

A 18 h 30, le président de l'Observatoire de Paris, Daniel Egret, accueillait à son tour les personnes présentes, rappelant les activités de l'Établissement qui n'a cessé et ne cesse de s'intéresser aux problèmes métrologiques de différents domaines

de l'astronomie, en particulier à la "Longueur du Mètre" de notre époque, héritée de découvertes, de recherches et de développements menés depuis plusieurs siècles. D. Egret conviait alors à une réception, dans l'actuelle Salle du Conseil où, sous l'œil de Méchain, mais aussi de Delambre et de quelques autres, M. Heintzen interprétait une autre chanson de sa composition intitulée "La Méridienne", en hommage à ces géodésiens, Delambre n'ayant pu manquer, en venant au centre de la France, sur le Méridien de l'Observatoire de Paris, d'entendre des airs interprétés à cet instrument.

Ce Colloque bénéficiait d'une collaboration avec l'Institut Géographique National qui avait accepté de prêter trois instruments prestigieux de ses collections : un cercle de Borda du constructeur Lenoir, lequel est probablement, à l'origine de la réussite de cet instrument, un cercle du constructeur Bellet, un de ses collaborateurs et celui de Delambre, un graphomètre à lunettes du type de celui employé sur le terrain par Méchain et par son collaborateur Tranchot, pour déterminer les conditions de visibilité des points hauts de la triangulation en Espagne. La collaboration de l'Association Française de Topographie a permis d'inviter Antonio Ten, de l'Université de Valencia, à venir présenter la correspondance de Méchain des années 1803-1804, sujet sur lequel il travaille depuis vingt ans, ses recherches l'ayant conduit à des découvertes de textes inédits qui éclairent d'un jour nouveau le comportement de Méchain dans les années qui ont précédé son décès à Castellon de La Plana.

La revue XYZ de cette Association a bien voulu prendre en charge l'édition des actes de cette rencontre dans une de ses livraisons qui suit le Colloque. Le Bureau des longitudes, auquel Méchain a appartenu dès sa création par la Loi du 8 messidor an III, avait tenu à s'associer à cette manifestation. A ce titre il a fourni les affiches comportant, à côté de la signature de Méchain, celles de nombreuses célébrités, ainsi que les badges avec cette même signature.

Le voyage qui avait été envisagé le 24 octobre 2004 n'a pas été organisé en raison du nombre restreint de participants. Une autre proposition sera faite pour le 1<sup>er</sup> semestre 2005.

Que tous ceux et toutes celles qui ont contribué à ces différentes actions trouvent ici l'expression de la gratitude qui leur est due. ●



M. Heintzen interprétant une chanson de sa composition intitulée "La Méridienne"

© M. Bailly

## Introduction du cahier “Méchain et la longueur du mètre”

■ Michel KASSER

*Méchain (1744-1804) est, avec Delambre, un des grands noms de la géodésie française. Dans une coopération qui, en raison des événements du temps, a duré plusieurs années, ils ont conjointement été chargés de la mesure d'un arc de méridien s'étendant, d'une mer à l'autre, de Dunkerque à Barcelone.*

**C**e Méridien s'étendant au long du Méridien de Paris, fixé le 21 juin 1667, est celui qui a servi de fondement au système métrique décimal, décidé dès après la Révolution française, en choisissant de retenir comme étalon fondamental la longueur équivalente à la dix-millionième partie du quart du méridien terrestre.

De ce mètre est issu le kilogramme correspondant, sous certaines conditions, à la masse d'un décimètre cube d'eau. Même le franc et les précédentes monnaies multiples et sous-multiples avaient alors des dimensions et une masse issues du mètre et du kilogramme.

Rapidement adopté au niveau de plusieurs pays, 15 ou 20 ans après sa mise en place en 1799, le système métrique décimal a dû attendre 40 années avant de s'imposer en France. Il présentait pourtant de multiples avantages. Si bien qu'après la Convention du Mètre de 1875, le système métrique deviendra, encore près d'un siècle plus tard, le système international d'unités (le SI) en 1960. A notre époque il y a peu de pays à ne pas avoir reconnu la supériorité d'un tel système dont la principale qualité est d'être un système décimal.

L'année 2004 marquant le bicentenaire de la mort en Espagne de Méchain, le 20 septembre 1804, méritait bien de voir organiser un colloque “Méchain et la longueur du Mètre”. Ce colloque a été organisé, par collaboration entre l'Observatoire de Paris, l'Institut Géographique National et l'Association française de Topographie. Le Bureau des Longitudes a tenu à s'associer à cette manifestation.

**A l'Observatoire de Paris**, où il est venu habiter dès 1783, Méchain s'est employé à la publication de la *Connaissance des temps*, étant responsable des volumes correspondants aux années 1788 à 1794. Cette éphéméride étant publiée, à l'époque, deux années en avance, Méchain interrompt cette tâche en 1792 quand il part pour Barcelone afin de prendre en charge les opérations devant le mener jusqu'à Rodez. A son retour en 1798, après différentes péripéties, tant en Espagne qu'en Italie et nommé – dans l'intervalle – à l'organisme créé en 1795 sous le



Bibliothèque de l'Observatoire de Paris.

**Portrait de Méchain (1744-1804) des Collections de l'Observatoire de Paris ; il est représenté tenant, en main gauche, l'ouvrage “Base du Système...” publié (après sa mort) sous son nom et celui de Delambre.**

nom de Bureau des Longitudes, il est chargé à partir de 1800, de la délégation pour ce bureau qui nomme un “Capitaine concierge” (sic : expression de Delambre) de l'Observatoire de Paris. Mais en 1803, il repart en Espagne afin de prolonger la Méridienne de France, de part et d'autre du parallèle de 45°, jusqu'au Baléares. Sa position, à la tête de l'Observatoire de Paris, lui est conservée jusqu'à son décès en 1804.

**L'Institut Géographique National** est depuis 1940, l'organisme chargé de la géodésie et de la cartographie française, prenant alors le relais du dépôt de la Guerre. Depuis quelques décennies, il oriente de plus en plus ses activités vers l'établissement, l'entretien et la mise à disposition des bases de données géographiques nationales de référence, tout en restant le pivot de la Géodésie française et un acteur important de la géodésie mondiale. De son côté, Méchain a débuté sa carrière de géo-

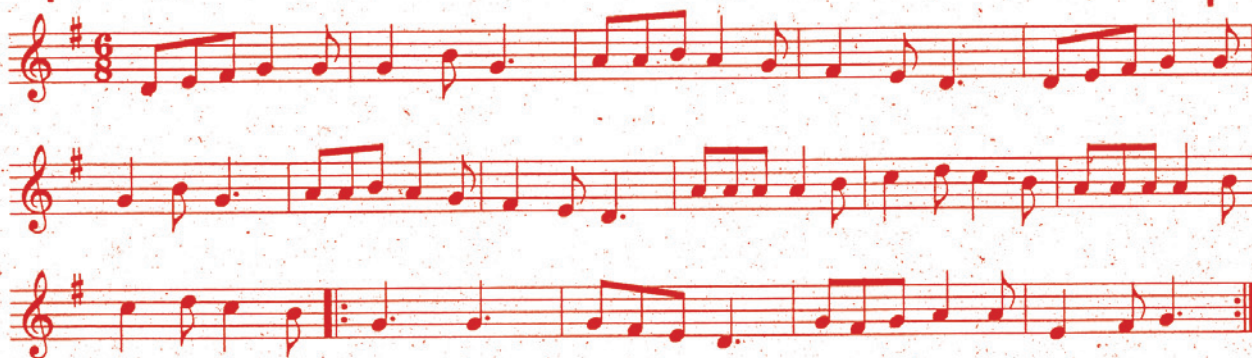




# La Méridienne



*chanson nouvelle*



1.  
Écoutez une chanson nouvelle  
Dessur' l'ait de Cadet Roussel (bis)  
Qui raconte les aventures  
Des deux héros de la mesure

Refrain  
Ah oui, ah oui vraiment,  
La méridienne c'est épatant ! (bis)

2.  
Voilà Delambre, voilà Méchain  
Qui viennent mesurer l'méridien (bis)  
Ah citoyens quelle drôle d'affaire  
C'est vraiment révolutionnaire !

3.  
C'est grâce à eux mes bons amis  
Que l'on voit à Bourges en Berry (bis)  
En plein milieu d'la cathédrale  
Passer comme une espèce de rail !

4.  
Ils montent en haut d'tous nos clochers  
Ils passent leurs journées à viser (bis)  
Pour trouver la distance exacte  
Du belvédère jusqu'à Mòrlac !

5.  
Le méridien à ce qu'on nous dit  
S'en va du nord jusqu'au midi (bis)  
J'savais pas qu'la forêt d'Habert  
Était au sud du belvédère !

6.  
C'est le p'tit vin d'Châteaumeillant  
Qui fait mesurer en tournant (bis)  
Les arpenteurs visent de traviole  
Dedans les régions viticoles !

7.  
Mais si leurs zigzags continuent  
Le méridien s'ra tout tordu (bis)  
V'là un sacré système métrique,  
Si l'étalon est élastique !

8.  
Pour en finir faut vous conter  
le souvenir qui est resté (bis)  
A une jolie petite brunette  
Qui a trop visé dans leur lunette

9.  
Une fois les topographes partis  
Sa taille a bien vite forçé (bis)  
Cet enfant du système métrique  
Fut baptisé Théodolite !

© M. Heintzen.

Imprimerie du merle moqueur

Texte original d'une chanson de M. Heintzen.