

Les grands arcs de méridien du XIX^e siècle et la forme de la Terre

■ James LEQUEUX

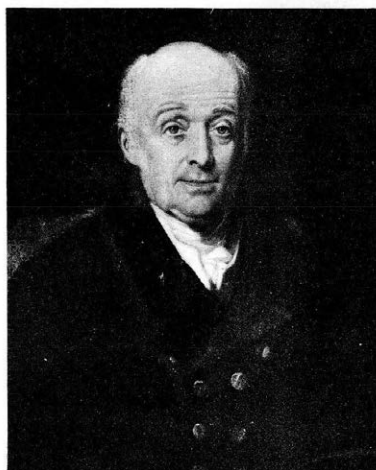
Trois grands arcs de méridien ont été mesurés pendant la première moitié du XIX^e siècle : en Inde, entre le nord de la Norvège et la Mer Noire et en Afrique du Sud. Avec d'autres mesures, ils ont servi à Bessel et à Clarke pour définir leurs ellipsoïdes de référence qui ont longtemps servi de base à la géodésie.

Dans cet article, l'auteur décrit les motivations, les instruments, la réalisation et les résultats des mesures des trois grands arcs.

La géodésie est née en France, et chacun connaît les grands travaux de triangulation menés au XVII^e et au XVIII^e siècles dans notre pays, au Pérou et en Laponie, qui ont montré que la Terre est aplatie et ont servi de canevas à la Carte de Cassini et à la Carte d'État-major au 1/80 000. Beaucoup moins connus sont les travaux de plus vaste envergure encore menés à l'étranger pendant la première moitié du siècle suivant : ils ont été conduits en Inde, en Europe et en Afrique du Sud par des géodésiens anglais et russes. Ce n'est donc pas par hasard que Jules Verne a intitulé son roman "géodésique" de 1872 : *Aventures de trois russes et de trois anglais dans l'Afrique Australe*. J'examinerai ces grandes triangulations, puis décrirai les conclusions que Bessel et Clarke en ont déduites concernant la forme et les dimensions de la Terre.

L'arc de méridien en Inde (22° 19', mesuré de 1805 à 1841)

Lorsque les Anglais terminent la conquête de l'Inde, à la fin du XVIII^e siècle, ils réalisent qu'ils devraient disposer de données géographiques et de cartes précises, pour des raisons militaires et administratives et pour



Wikimedia Commons, Shyamal

W. Lambton

Figure 1. William Lambton

percevoir les impôts. Il n'existe alors que des mesures disparates de longitude et de latitude et des cartes rudimentaires. En novembre 1799, le colonel William Lambton (1753-1823, Figure 1), géographe et géodésien, soumet aux autorités un plan pour la triangulation et la cartographie de l'Inde, sur le modèle de ce qui a été fait en France et en Angleterre. Lambton se met au travail en 1802. Une base est mesurée en avril-mai au Mont St. Thomas (aujourd'hui Chennai), non loin du méridien de Madras, et Lambton mesure là, en un an, un premier arc de méridien de 1° 35'. Puis il commence la mesure du grand arc du méridien, à 2° 37' à l'ouest de celui de Madras, ainsi que d'un arc de parallèle, et dirige une triangulation qui couvre une partie importante du sud de l'Inde. À partir de 1805, 10 bases sont mesurées par lui-même et des aides près du grand arc du méridien, avec une longueur moyenne de 9,5 km. Finalement, en 1818, Lambton a triangulé le méridien depuis le Cap Comorin, à l'extrémité sud de l'Inde (latitude 8° 10'), jusqu'à Bidar (ou Beder) au nord-ouest d'Hyderabad (latitude 18° 3'), soit sur une

différence de latitude de 9° 53' 45,2" et une longueur de 1 095 km. Selon Lambton, c'est le plus grand arc de méridien qui ait été mesuré d'un seul tenant : il oublie simplement l'arc Dunkerque-Formentera (12° 22'), mais il a des excuses car il trouve des incohérences dans l'analyse qu'en a faite Delambre.

Lambton compare ses mesures avec celle d'arcs de méridien en France, en Angleterre et en Suède, et en déduit un aplatissement de la Terre de 1/310. Puis il propose d'étendre l'arc indien vers le Nord. Ceci est réalisé par son adjoint George Everest (1790-1866, Figure 2), qui lui succède en tant que *Superintendent of the Great Trigonometrical Survey of India*. En 1823, Everest termine les mesures du grand arc de méridien entre les latitudes de Bidar (18° 3') et de Sironj (24° 7'), puis il tombe malade en 1824 et passe cinq années en Angleterre. Revenu en Inde, il refait les mesures précédentes dont il n'est pas satisfait, et complète entre 1832 et décembre 1841 les mesures du grand arc, qui s'étend maintenant du Cap Comorin jusqu'à Banog, près de Mussoorie au pied de l'Himalaya, à une latitude de 30° 29', soit une différence de 22° 19', près de 2500 km ; en combinant ses mesures avec l'arc Dunkerque-Formentera, Everest détermine un aplatissement de la Terre de 1/300,8, une valeur qui sera utilisée pour toutes les réductions anglaises jusqu'en 1870 au moins ; mais il réalise que la Terre n'est pas vraiment un ellipsoïde de révolution. Son collaborateur puis successeur Andrew Vaugh (1810-1878) mesure de 1843 à 1861 l'altitude de 79 pics himalayens, et donne au plus élevé le nom d'Everest... lequel ne le verra jamais !

Les principes des triangulations de Lambton et d'Everest ne diffèrent en

Wikimedia Commons Hephæstos

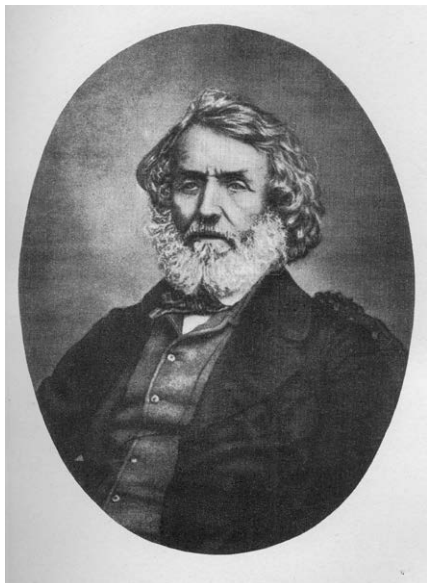


Figure 2. George Everest.

rien de ceux que Jean Picard a exposés en 1671 dans son célèbre ouvrage *Mesure de la Terre*. Mais, bien entendu, les instruments se sont considérablement perfectionnés. Les dix bases de Lambton sont mesurées avec des chaînes de 66 ou 100 ft (20 ou 30 m) reposant sur un support horizontal en bois ou même parfois directement sur le sol, et tendues par un poids. Everest, qui mesure plusieurs nouvelles bases, introduit à la place de ces chaînes peu précises la "barre de compensation" inventée par le Colonel Thomas Frederick Colby (1784-1852), dont le

principe sera expliqué plus loin. La *Figure 3* illustre le départ d'une mesure de base faite avec cette barre.

Les instruments sont, pour la mesure des latitudes un secteur zénithal de 5 pieds de rayon de Jesse Ramsden (1735-1800), utilisé de 1801 à 1825, et pour la triangulation proprement dite et les azimuts un grand théodolite (*Figure 4*) de William Cary (ou Carey, 1759-1825), copie de celui construit par Ramsden en 1790. Il servira de 1802 à 1866, avec des réparations après un accident survenu en 1808 et une rénovation en 1835. Il y a aussi un théodolite deux fois plus petit, deux cercles verticaux d'Edward Troughton (1753-1835), une lunette des passages, des chronomètres, etc. Everest utilise également avec ses aides deux nouveaux grands théodolites de 3 pieds, construits l'un par Troughton et l'autre par Henry Barrow (1790-1870) à Calcutta, un théodolite de 12 inches construit par Troughton et son associé William Simms (1793-1860), et quatre cercles verticaux de 18 inches de diamètre. Pour l'observation astronomique des latitudes, Everest utilise deux cercles verticaux doubles de 3 pieds de diamètre, dus aussi à Troughton & Simms, qu'il place dans des observatoires construits spécialement.

Lambton, qui travaillait de jour, ayant eu de grandes difficultés à apercevoir



Figure 4. Le grand théodolite de Cary. Son cercle horizontal a 36 pouces (91 cm) de diamètre et son cercle vertical 18 pouces. L'instrument avec sa boîte de transport pesait 500 kg. Remarquer au fond à gauche le portrait de Lambton, reproduit ici Fig. 1. D'après Fillimore, vol. 4.

les points géodésiques, repérés par des drapeaux ou de signaux divers, Everest utilise de nuit des moyens plus perfectionnés : des réverbères de Troughton & Simms avec lampes d'Argand, et surtout des signaux à poudre de couleur bleue allumés en haut de mâts toutes les quatre minutes pendant les observations. Il faut aussi construire des édifices en bambou, bois et quelquefois briques pour permettre les visées à grande distance. Il est clair qu'Everest travaille avec le plus grand soin : ses méthodes marquent un net progrès dans la géodésie.

Le grand arc indien sert de point de départ à une triangulation suivie d'une cartographie qui, à l'époque de Lambton, couvre déjà l'essentiel du sud de l'Inde, et qui s'étendra ultérieurement à toute la colonie (*Figure 5*). Pourtant, le travail sur l'arc est continuellement en butte aux critiques, voire à l'hostilité de certains administrateurs et même de scientifiques, si bien que Lambton doit, à de nombreuses reprises, en démontrer la qualité et l'intérêt pratique. Everest a moins de problèmes, car le projet a bien avancé quand il le prend en charge, mais il est critiqué pour s'intéresser davantage à



Figure 3. Une mesure de base par Everest en 1832, près de Calcutta, d'après Fillimore, vol. 4.

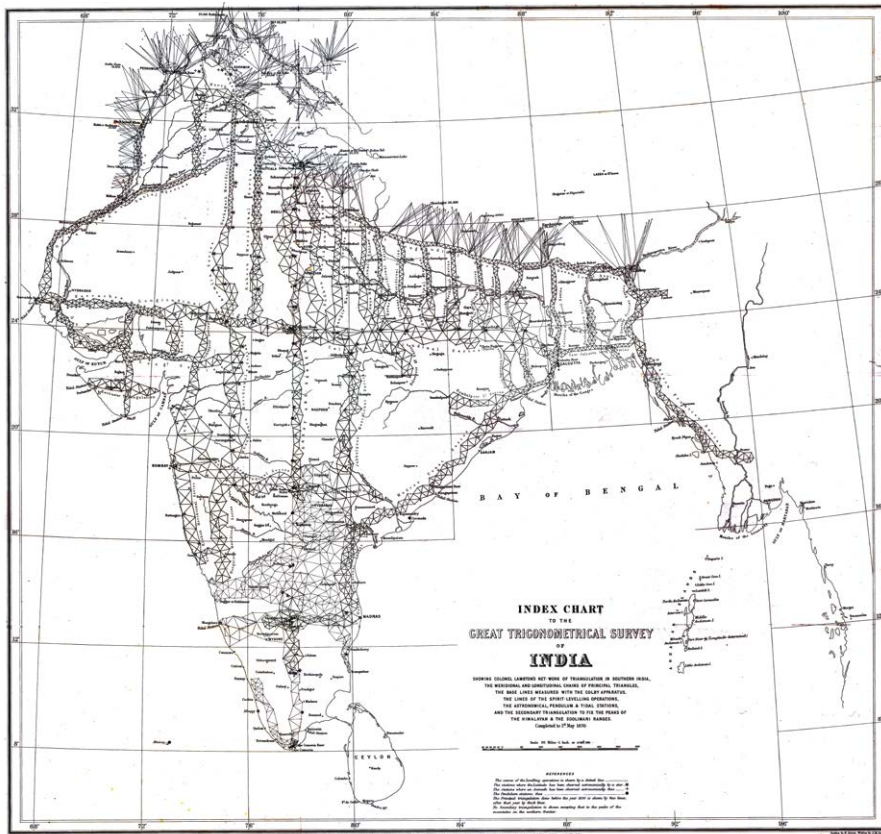


Figure 5. La triangulation de l'Inde en 1870. En plus du grand arc de méridien partant du Cap Comorin, à l'extrême sud de l'Inde, de nombreuses triangulations ont été réalisées avec une précision un peu moins bonne. C'est l'ossature d'une cartographie complète de l'Inde au 1/50 000. Les traits en haut de la carte figurent les visées qui ont permis d'obtenir la position et l'altitude des sommets de l'Himalaya.

la mesure de l'arc de méridien qu'il reste. Il se permet cependant d'envisager une prolongation de cet arc jusqu'au nord de la Sibérie, un projet qui ne sera jamais réalisé.

L'arc de méridien de Struve (25° 20', mesuré de 1816 à 1855)

Lors d'un récent voyage au nord de la Norvège, je suis tombé par hasard sur un monument érigé sur une colline peu élevée située au lieu-dit Flugenaes, dans la zone industrielle au nord de la ville d'Hammerfest, qui est la plus septentrionale de l'Europe (Figure 6). Comme on peut le lire sur l'inscription en latin sur ce monument, c'est l'extrémité nord d'un arc de méridien de 25° 20'. J'ignorais tout de cet arc et j'ai appris alors que sa réalisation avait été confiée par le tsar Alexandre 1er à l'astronome Friedrich Georg Wilhelm von Struve (1793-1864, Figure 7) et au

général russe Carl Friedrich Tenner (1783-1859), tous les deux d'origine allemande. Astronome moi-même, je n'ignorais pas que Wilhelm Struve était le deuxième des cinq générations d'astronomes qui se sont succédé de père en fils jusqu'au XX^e siècle, à l'instar des Cassini en France. Lorsque le tsar lui confie le travail en 1816, car il désire établir des cartes militaires précises dont l'arc représenterait un élément de l'ossature, Struve est professeur à Dorpat (aujourd'hui Tartu), dont il dirigera l'observatoire à partir de 1816. En 1839, il fondera l'observatoire de Pulkovo près de Saint-Petersbourg, le mieux équipé de l'époque avec celui de Greenwich.

Si le but initial de cet arc est militaire, Struve et Tenner vont bientôt envisager de l'utiliser pour une nouvelle mesure de la forme et des dimensions de la Terre. La nature plate du terrain et l'absence de montagnes qui pourraient occasionner des déviations de



Figure 6. L'auteur au pied du monument de l'arc de Struve, à Hammerfest (Norvège). Voici la traduction de l'inscription latine : "Extrémité nord de l'arc de méridien mesuré depuis l'Océan Arctique jusqu'au Danube, à travers la Norvège, la Suède et la Russie, par ordre et sous les auspices du très auguste Roi Oscar 1^{er} et des très augustes Empereurs Alexandre 1^{er} et Nicolas 1^{er}; retrace le travail ininterrompu de trois groupes de géomètres de 1816 à 1852. Latitude 70° 40' 11,3''." Les trois groupes sont sans doute le groupe russe de Tenner et Struve, le groupe norvégien de Hansteen et le groupe suédois de Selander. Un monument semblable se trouve à l'extrémité sud de l'arc.



Figure 7. Wilhelm von Struve



la verticale leur paraissent s'y prêter particulièrement bien ; par sa latitude élevée, le nouvel arc compléterait l'arc de France entre Formentera et Dunkerque et celui de l'Inde, déjà bien avancé. En 1827, une première phase de triangulation est terminée, et publiée en 1831 en langue allemande. Elle s'étend entre 52° et 60° de latitude, le long du méridien de Dorpat, dont l'observatoire (latitude 58° 25') en est une des stations principales. Puis les extensions vers le nord sont réalisées avec la collaboration des directeurs des observatoires de Stockholm, Nils Selander (1804-1870) et d'Oslo, Christopher Hansteen (1784-1873), et

vers le sud essentiellement par Tenner. L'arc final, terminé officiellement en 1852 mais en fait en 1855 en raison de nombreuses vérifications, s'étend du nord de la Norvège (latitude 70° 40') à la Mer Noire (45° 20'). Il couvre 25° 20' 08,29'' ou 2821,853 ± 0,012 km (Figure 8). L'ensemble contient 10 bases, 275 stations principales formant 258 triangles, et 13 points dont les coordonnées géographiques et l'azimut sont mesurés. Les opérations sont décrites en détail dans un ouvrage de 1860 en français intitulé *Arc du méridien de 25° 20' entre la Danube et la mer Glaciale*, publié à Saint-Petersbourg et signé des quatre personnes mentionnées ci-dessus ; il n'est malheureusement pas numérisé. L'histoire des mesures est racontée de façon très intéressante par Struve en 1852, dans un ouvrage également en français cité dans la bibliographie de cet article.

De nombreux témoignages matériels subsistent de cet arc, ce qui a conduit à les faire protéger par l'UNESCO qui l'a classé au patrimoine mondial de l'humanité en 2005. À l'époque des mesures, l'arc ne s'étendait que sur deux pays : la Suède-Norvège¹ au nord et la Russie au sud. Actuellement, il n'en traverse pas moins de 10 : Norvège, Suède, Finlande, Russie, Estonie, Lettonie, Lituanie, Biélorussie, Ukraine et Moldavie. Ainsi vont les choses...

Deux des bases de la triangulation ont été mesurées avec l'"appareil de Delambre à languettes mobiles", qui n'est autre que la règle de Borda, décrite par Delambre dans sa *Base du système métrique décimal*. Les autres bases ont utilisé l'appareil de l'observatoire de Pulkovo "à leviers de touche", dérivé de la règle de Borda, qui a servi en Russie jusqu'au XX^e siècle. Ces appareils ont été étalonnés indirectement sur la toise du Pérou, qui était l'étalon de la plupart des triangulations de l'époque.

Un instrument universel de Georg Friedrich von Reichenbach (1771-1826) et de son collaborateur et successeur

(1) De 1814 à 1905, les deux états ont le même souverain (Oscar 1er à l'époque de l'arc), mais chacun garde son gouvernement et ses lois.

Traugott Lebrecht von Ertel (1777-1858), puis un autre de Ertel seul, ont servi à la triangulation de l'arc de Struve, ainsi que des cercles répéteurs de Baumann à Stuttgart et de Troughton et divers théodolites de Reichenbach, Ertel et Johann Georg Repsold (1771-1830). Les latitudes et le nivellement ont été mesurés par une lunette méridienne de Peter Dollond (1731-1820) et deux cercles verticaux identiques de Reichenbach et Ertel, et par deux cercles verticaux dont un de Repsold. Le temps a été déduit d'observations avec divers instruments allemands, en particulier une lunette des passages de Carl Brauer. Donc presque tous les instruments étaient des constructeurs allemands, les autres étant anglais. Comme une grande partie de l'arc était couverte de forêts, de nombreuses tours et pyramides jusqu'à 10 m de hauteur ont dû être élevées, ainsi que des signaux atteignant 50 mètres.

Struve avait envisagé la prolongation de son arc vers le sud, et son fils Otto Wilhelm von Struve (1819-1905) a publié en 1868 un article décrivant une reconnaissance faite sous sa direction en vue d'une extension via la Roumanie, la Bulgarie, et la Turquie jusqu'à l'île de Kos, avec une prolongation possible jusqu'à la Crète.

La jonction de l'arc de Struve avec la Crète a bien eu lieu entre les deux guerres mondiales, mais via la Yougoslavie et la Grèce continentale (Smith 2004). De son côté, l'astronome du Cap de Bonne-Espérance David Gill (1843-1914) avait proposé en 1879 la mesure d'un arc de méridien à la longitude de 31° 16' Est (la longitude de l'arc de Struve est 23° 39' E), allant de Port Elizabeth en Afrique du Sud à l'Égypte, soit 7 120 km. Cette mesure a effectivement été réalisée en 75 ans, à l'exception d'une portion de 1 000 km au Soudan qui n'a été terminée qu'en 1954. Restait à réunir les deux triangulations entre la Crète et l'Égypte, ce qui aurait nécessité des visées directes de 300 à 400 km, pratiquement impossibles. Diverses solutions plus ou moins fantaisistes ont été proposées, jusqu'à ce qu'en 1953 l'US Air Force utilise une technique radio dite HIRAN



Figure 8. L'arc de méridien de Struve (UNESCO). Les 34 points géodésiques qui subsistent sont indiqués par des points rouges ; ils sont tous classés par l'UNESCO.



Figure 9. Thomas Maclear ; remerciements au Prof. Brian Warner.

(la version de haute précision de SHORAN = SHOrt RANge Navigation, qui mesurait des temps de trajets aller-retour d'impulsions radio) entre l'Égypte, la Crète et Rhodes pour réaliser enfin cette jonction. Cependant, il

ne semble pas que l'on ait déduit quoi que ce soit de cet immense arc en ce qui concerne la forme de la Terre.

L'arc de Maclear (4° 37', mesuré de 1841 à 1848)

Bien que l'étendue de cet arc soit bien plus petite que celle des précédents, il mérite d'être mentionné car c'est le seul arc mesuré dans l'hémisphère austral avant le grand arc de Gill dont je viens de parler. Comme je l'ai discuté dans un précédent article de cette revue (Lequeux 2015), Nicolas-Louis de la Caille (1713-1762) avait déjà triangulé en 1752 un arc méridien de 1° 13' en Afrique du Sud, mais ses mesures de latitude étaient faussées par l'attraction de montagnes aux deux extrémités, si bien qu'il en avait déduit que la Terre était en forme de poire. Ce résultat étant suspect, plusieurs géodésiens dont Everest ont proposé que la mesure soit refaite, ce qui sera accompli par Thomas Maclear (1794-1879, Figure 9),

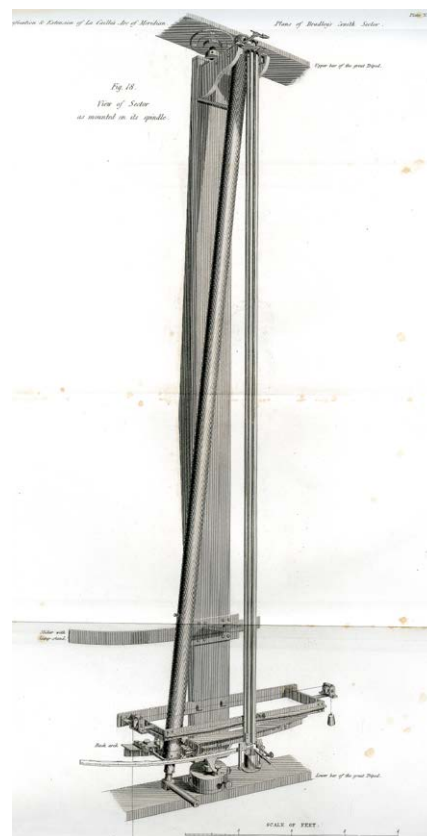


Figure 11. Le secteur zénithal de Bradley, de 12 ft ½ de rayon, utilisé par Maclear pour déterminer la latitude. Comme dans beaucoup d'instruments des XVII^e et XVIII^e siècles, la direction de la verticale était donnée par un fil à plomb protégé par un tube, et on lisait les graduations du limbe derrière le fil à plomb. D'après Maclear (1866) Vol. 1, Bibliothèque de l'Observatoire de Paris.

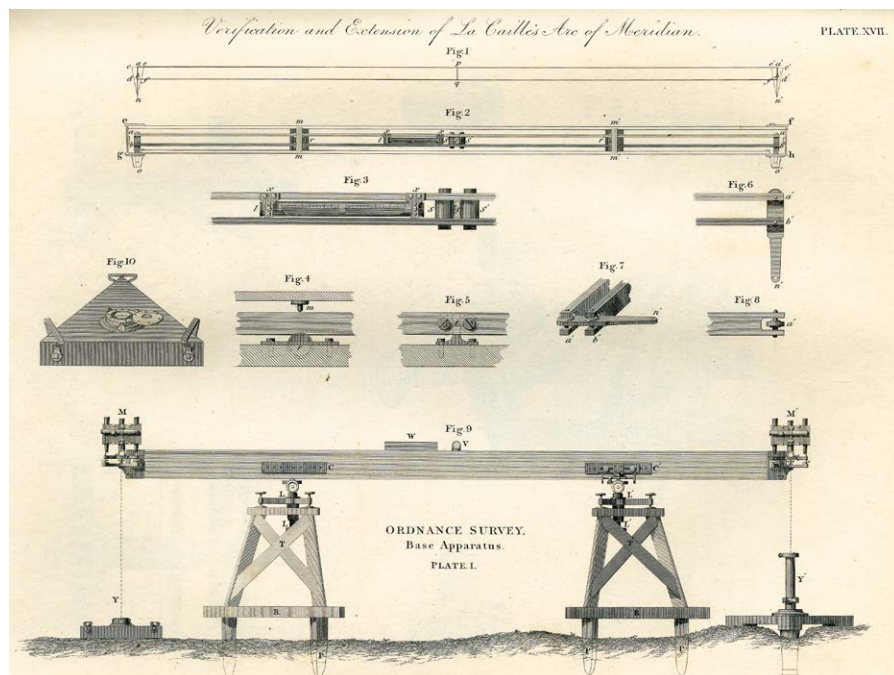


Figure 10. La barre de compensation de Colby. Elle est formée de deux barres d'environ 3 mètres de long, l'une en laiton et l'autre en fer (Figures 1 et 2), qui sont assujetties l'une à l'autre en leur milieu par les deux cylindres A' et A'' (Figure 2, détail Figure 3). À chaque extrémité libre se trouve un levier an et a'n' (Figures 1 et 6) qui s'incline plus ou moins avec la température en raison de la dilatation différente des barres, mais dont les paramètres calculés sont tels que le point n près de son extrémité a une position indépendante de la température. Une aiguille d'or y est insérée, et est alignée verticalement par le dispositif M' avec un repère au sol dont la position est réglable. Ce repère est le point de départ de la position suivante de la barre de compensation. D'après Maclear (1866) Vol. 1, Bibliothèque de l'Observatoire de Paris.

directeur de l'observatoire royal du Cap de Bonne-Espérance. Maclear a vérifié que la longueur de l'arc mesurée par La Caille était excellente et que seules ses mesures de latitude étaient fausses. Il en a profité pour étendre sa triangulation sur 4° 37'. Les circonstances étaient beaucoup plus favorables qu'en Inde, mais Maclear, moins expérimenté que La Caille, Lambton et Everest, a mis 6 ans ½ pour cette mesure, au demeurant très bonne, alors que La Caille n'avait mis que 2 mois pour faire la sienne !

Pour mesurer sa base, d'une longueur de 42 818,75 ft, proche de l'ancienne base de La Caille, Maclear a obtenu deux barres de compensation de Colby (Figure 10), appareils construits par Simms et dont d'autres exemplaires ont été utilisés systématiquement par



Everest en Inde. Elles avaient l'avantage sur les règles de Borda d'être insensibles à la température. Il a fallu 88 jours à Maclear pour mesurer la base avec pas moins de 7 autres astronomes et officiers et 18 autres personnes.

Les mesures d'angle sont faites avec un cercle répétiteur de Dollond, puis un théodolite de Fuller de 20 inches dérivé du théodolite de Ramsden, et un théodolite de Reichenbach & Ertel. Des héliostats sont installés aux points géodésiques pour les visées. La latitude est déterminée avec un instrument historique de George Graham (1673-1751), remis en état pour l'occasion par Simms, qui est celui-là même avec lequel James Bradley (1693-1762) avait étudié l'aberration de la lumière et la nutation à partir de 1727 (Figure 11).

Les grands arcs et les ellipsoïdes de Bessel et de Clarke

De nombreux géodésiens se sont employés à calculer l'aplatissement et les dimensions de la Terre à partir des mesures décrites précédemment, combinées éventuellement à d'autres. Deux ont marqué l'histoire de la géodésie : l'allemand Friedrich Wilhelm Bessel (1784-1846) et l'anglais Alexander Ross Clarke (1828-1914).

Grand astronome (il est le premier à avoir obtenu la distance d'une étoile) et mathématicien de génie, Bessel était familier des opérations géodésiques puisqu'il avait mesuré en 1831-1832 un arc de méridien de 1° 30' en Prusse orientale et connecté cet arc avec l'arc de Struve. Il a utilisé les arcs indiqués en caractères romains dans le tableau 1 pour calculer par la méthode des moindres carrés, encore assez nouvelle, les dimensions de l'ellipsoïde qui reproduit au mieux les observations.

Une des difficultés qu'il a rencontrées était l'homogénéisation des unités. Alors que la plupart des mesures se référaient à la toise du Pérou, les Anglais utilisaient le fathom (brasse). Bessel prend 1 toise = 1,065 765 42 fathom et donne ses résultats en toises. Je les ai converties en mètres à partir

Tableau 1 : Caractéristiques des principaux arcs méridiens avant 1850, classés par ordre de latitude décroissante. Les arcs en caractères romains sont ceux utilisés par Bessel (1841). Les longitudes sont approximatives. On remarque que l'arc de Laponie mesuré par Maupertuis n'est pas utilisé : il est remplacé par l'arc suédois mentionné ici, plus précis et plus long.

Arc	Longitude	Latitude moyenne	Longueur angulaire	Longueur linéaire (mètres)	Rayon de l'arc (km)
Suède	21° 15' E	66° 20' N	01° 37' 19,6"	180 827,65	6 387,15
Struve (3)	26° 43' E	65° 22' N	10° 35' 01,2"	1 180 109,67	6 388,64
Struve (2)	26° 43' E	56° 04' N	08° 02' 28,9"	895 315,18	6 379,24
Prusse	20° 31' E	54° 58' N	01° 30' 29,0"	167 962,06	6 381,40
Danemark	10° 32' E	54° 08' N	01° 31' 53,3"	170 416,99	6 375,68
Hanovre	09° 55' E	52° 32' N	02° 00' 57,4"	224 458,29	6 379,40
Angleterre	00°	52° 02' N	02° 50' 24,0"	315 891,87	6 372,98
Struve (1)	26° 43' E	48° 41' N	06° 42' 39,4"	746 370,82	6 372,26
France	02° 20' E	44° 51' N	12° 22' 12,7"	1 374 591,39	6 366,78
Inde (3)	77° 42' E	26° 49' N	05° 23' 42,3"	597 760,69	6 348,22
Inde (2)	77° 42' E	16° 08' N	15° 57' 40,7"	1 766 161,47	6 339,93
Inde (1)	80° 12' E	12° 32' N	01° 34' 56,4"	175 048,82	6 338,46
Pérou	79° 00' O	01° 31' S	03° 07' 03,5"	344 736,77	6 335,55
Maclear	19° 05' E	32° 03' S	04° 36' 48,6"	511 568,40	6 353,26

de la définition "le mètre vaut 443,296 lignes de la toise du Pérou" ce qui donne 1 m = 0,513 074 07 toise. Plus tard, Everest (Inde 3) et Maclear ont donné leurs longueurs en feet ; pour construire le tableau 1, je les ai converties en mètres en prenant 1 ft = 0,3048 m exactement.

Bessel est parfaitement conscient des limites de la géodésie, et affirme que l'on peut difficilement obtenir les latitudes à mieux que la seconde de degré en raison des anomalies de la verticale. Après une première publication (Bessel 1837), il découvre à la suite de Louis Puissant (1769-1843) une erreur dans la triangulation Formentera-Barcelone et corrige ses résultats. Son ellipsoïde définitif (Bessel 1841), qui servira longtemps de base à la géodésie européenne, a les caractéristiques suivantes :

Demi-grand axe : $a = 6\,377\,397$ m
 Demi-petit axe : $b = 6\,356\,079$ m
 Aplatissement : $f = 1/299,15$,
 le quart du méridien terrestre valant 10 000 856 mètres.

L'ellipsoïde de Bessel est très proche de l'ellipsoïde WGS84 ($f = 1/298,257\,223$).

Clarke n'était pas astronome, mais ingénieur géodésien. Il a proposé successivement deux ellipsoïdes pour représenter le géoïde. Le second (Clarke 1880) utilise les mêmes arcs que Bessel, mais plusieurs ont été prolongés depuis l'époque de ce dernier : l'arc français est maintenant connecté à l'arc anglais qui s'étend plus au nord, pour former un arc de 22° 09' au total. La totalité de l'arc de Struve (1+2+3, soit 25° 20') est utilisée, ainsi que la totalité de l'arc indien, qui est d'ailleurs rediscuté par Clarke. Clarke ajoute enfin l'arc de Maclear. Il parvient à la solution suivante, donnée en feet, que j'ai convertis en mètres en prenant 1 ft = 0,304 797 265 4 m :

$a = 6\,378\,249$ m
 $b = 6\,356\,515$ m
 $f = 1/293,46$,
 le quart du méridien terrestre valant 10 001 868 mètres.

Cependant, l'ellipsoïde de Clarke, qui a été longtemps adopté comme référence dans les pays anglo-saxons, n'est pas une meilleure représentation du géoïde que celui de Bessel, car la Terre n'est pas réellement un ellipsoïde de



révolution, ce que l'on avait d'ailleurs réalisé dès les premières décennies du XIX^e siècle et qui est maintenant bien connu grâce à la géodésie spatiale. Néanmoins les mesures des grands arcs ont représenté un progrès considérable pour la géodésie et pour la connaissance de la forme et des dimensions de la Terre. ●

N.D.L.R. : Dans cet article historique, les valeurs des paramètres des ellipsoïdes sont exprimées suivant une résolution cohérente avec les précisions de l'époque. Le lecteur trouvera dans la littérature les valeurs utilisées actuellement et exprimées au millimètre.

Contact

James LEQUEUX

Astronome émérite
à l'Observatoire de Paris
james.lequeux@obspm.fr

Bibliographie

ARC INDIEN

Everest, G. & assistants (1847) *An account of the measurement of two sections of the meridional arc of India bounded by the parallels of 18° 3' 15'' ; 24° 7' 11'' ; & 29° 30' 48''*, London, J. & H. Cox, accessible via <http://pahar.in/mountains/1847-account-of-measurement-of-meridional-arc-of-india-by-everest-s-pdf/> : article très détaillé

Fillimore, R.H. (1945, 1950, 1954, 1958) *Historical Records of the Survey of India*, vol. 1 (18th century), 2 (1800-1815), 3 (1815-1830), 4 (1830-1843), Dehra Dun (U.P.) India, Office of the Geodetic Branch Survey of India, accessible via <https://archive.org/details/>

Lambton, W. (1818) *An abstract of the results deduced from the measurement of an arc on the meridian*, extending from latitude 8° 9' 38'', 4, to latitude 18° 3' 23'', 6, being an amplitude of 9° 53' 45'', 2, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Vol. 108, pp. 486-517, accessible via <http://www.jstor.org/stable/107484>

Markham, C.R. (1878) *A Memoir on the Indian Surveys*, 2d ed., London, Allen & Co, accessible via <https://archive.org/details/memoironthindia025502mhb> : moins détaillé que Fillimore mais intéressant.

Rama Deb Roy (1986) *The Great Trigonometrical Survey of India in a Historical Perspective*, *Indian Journal of History of Science* 21, p. 22-32, accessible via http://www.new1.dli.ernet.in/data1/upload/insa/INSA_1/20005b5b_22.pdf

ARC DE STRUVE

Mazurova, E. (2014) *The Russian-Scandinavian Geodetic arc*, *Sitzungsberichte der Leibnitz-Societät der Wissenschaften zu Berlin* 119, p. 75-90, accessible via http://leibnizsozietat.de/wp-content/uploads/2014/05/12_mazurova.pdf : un résumé illustré très bien fait.

Smith, J.R. (2004) *The Struve Geodetic Arc and Its Possible Connections to the Arc of the 30th Meridian in Africa*, Workshop on History of Surveying and Measurement, Athens, Greece, May 22-27 2004, accessible via https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/athens/papers/wshs1/WSHS1_3_Smith.pdf

Struve, W. (1852) *Exposé historique des travaux exécutés jusqu'à la fin de l'année 1851 pour la mesure de l'arc du méridien entre Fuglenæs 70° 40' et Ismail 45° 20', Saint-Petersbourg*, Imprimerie de l'Académie impériale des sciences, accessible via <http://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=uc1.5c34490;view=1up;seq=5> ; Planches (1857) via <http://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=mdp.39015002006081;view=1up;seq=1>

Struve, W. (1852) *Sur la jonction des opérations astronomico-géodésiques exécutées par ordre des gouvernements russes et autrichiens*, *Bulletin de la classe physico-mathématiques de l'Académie impériale des sciences de Saint-Petersbourg*, 11, p. 113-136, accessible via google books : chercher Bulletin physico-mathématique : Volume 11 : Article technique.

UNESCO (2004-5) *Évaluation de l'arc géodésique de Struve au patrimoine mondial de l'humanité* : http://whc.unesco.org/archive/advisory_body_evaluation/1187.pdf

UNESCO (2005-6) *Classement de l'arc géodésique de Struve au patrimoine mondial de l'humanité* : <http://whc.unesco.org/fr/list/1187>

ARC DE MACLEAR

Glass, I.S. (2013) *Nicolas-Louis de la Caille, Astronome et Géodésien*, trad. J. Lequeux, Les Ulis, EDP Sciences

Lequeux, J. (2015) *Un grand géodésien du XVIII^e siècle : Nicolas Louis de La Caille*, *Revue XYZ* 142, p. 62-67.

Maclear, T. (1866) *Verification and extension of La Caille's arc of meridian at the Cape of Good Hope*, s.n. Vol. 1 accessible via <http://www.archive.org/details/cu31924012313437> ; Vol. 2 accessible via https://books.google.fr/books/about/Verification_and_Extension_of_La_Caille.html?id=Els_AAAAcAAJ&hl=fr

ELLIPSOÏDES DE BESSEL ET DE CLARKE

Bessel (1837) *Bestimmung der Axen des elliptischen Rotationssphäroids, welches den vorhandenen Messungen von Meridianbögen der Erde am meisten entspricht*, *Astronomische Nachrichten* 14, p. 333-346 (N° 333), accessible via <http://cdsads.u-strasbg.fr/abs/1837AN.....14..333B> : contient les principes et une première détermination de son ellipsoïde.

Bessel (1841) *Ueber einen Fehler in der Berechnung des französischen Gradmessung und seinen Einfluss auf die Bestimmung der Figur der Erde*, *Astronomische Nachrichten* 19, p. 97-116 (N° 438), accessible via <http://cdsads.u-strasbg.fr/abs/1841AN.....19...97B> : correction d'une erreur dans les mesures françaises et détermination finale de son ellipsoïde.

Clarke, A.R. (1880) *Geodesy*, Oxford, Clarendon Press, accessible via <https://archive.org/details/geodesy00clargoog> : contient la détermination de son second ellipsoïde. Le dernier des points à noter est que l'ensemble des données produites ont le mérite d'être librement accessibles via la plate-forme de webmapping, qui restitue ainsi à la société civile des savoirs produits dans les cercles scientifiques.

ABSTRACT

Three great arcs of meridian were measured during the first half of the 19th century: in India, from the North of Norway to the Black Sea and in South Africa. Together with other measurements, they were used by Bessel and by Clarke to define their reference ellipsoids, which were for a long time the basis for geodesy. In this article, the author describes the motivations, the instruments, the realization and the results of the measurements of the three great arcs.