

2.2 Le temps devient mesurable

Christiaan Huygens est un acteur incontournable dans la quête des longitudes, tant sur mer qu'à terre. Si pour Kant, le temps est une condition nécessaire de possibilité des phénomènes, pour Huygens, c'est une condition nécessaire à toute physique. Toute mesure s'inscrit dans le temps. C'est pourquoi le physicien hollandais s'attachera à des études aussi bien théoriques (isochronisme de la cycloïde⁸) que pratiques (les horloges) tout au long de sa vie. C'est lui qui reprendra l'idée de Frisius de régler une horloge sur l'heure du méridien origine et de transporter ce temps sur un vaisseau. Il est habité, dès 1659 par la certitude de produire par art un temps plus exactement mesuré que celui dont la nature elle-même donne des exemples. Son enthousiasme est rapidement partagé et confirmé par les essais en mer de ses premières horloges. Dans une lettre de Huygens au Major Holmes revenant d'un voyage atlantique vers les îles de Saint Thomas, il écrit⁹ :

" I did not imagine that the watches of this first structure would succeed so well, and I had reserved my main hopes for the new ones. But seeing that those have already served so successfully, and that the others are get more just and exact, I have the more reason to believe that the invention of longitude will come to its perfection. "

C'est cette confiance dans le pouvoir de la mécanique qui le fait se pencher sans discontinuer de 1660 à sa mort en 1695, sur cet espace marin dont l'instabilité constitue le caractère essentiellement non mesurable longitudinalement. L'épisode du refus de la méthode astronomique proposée par Galilée en 1635 pour la détermination des longitudes est bien connue de Huygens lorsqu'il confie¹⁰, en janvier 1657, son espoir de vaincre par le moyen de la technique, le problème de longitudes.

" J'ai trouvé ces derniers jours un nouveau modèle d'horloge qui mesure les temps avec tant de précision qu'il y a grand espoir que l'on puisse par son moyen trouver les longitudes surtout s'il suppose le transport en mer. "

Mais en 1657, Huygens est loin de maîtriser l'ensemble des obstacles qui s'opposent au transport d'un garde-temps en mer, et le souhait qu'il formule ici montre que l'adaptation de gardes temps aux conditions des grands voyages océaniques n'est pas encore pensée comme un véritable problème. Cette nouvelle horloge, dont il donne une description dans l'*Horlogium* de 1658 consiste dans l'adaptation d'un pendule dont les oscillations de faibles

⁸(Chareix, 2000)

⁹(phi, 1667) p. 33

¹⁰Lettre à Van Schooten, 12 janvier 1657, O.C. II, 5 cité dans (Chareix, 2000)

amplitudes sont interceptées par un mécanisme d'échappement à ancre. Il convient de noter que le problème de la détermination de longitudes est moins lié à la précision mathématique rigoureuse de l'oscillation qu'à la possibilité de maintenir, par un artefact, une oscillation pratiquement constante.

Après quelques essais en mer, Huygens s'attaque de front au problème de la houle, et en 1671, il propose un pendule triangulaire, immédiatement suivi de l'invention d'une suspension à cardan encore en usage plusieurs siècles après lui dans la suspension de chronomètres mécaniques. Au mouvement pendulaire, il substituera le ressort spiral qui arme les montres portatives. Bien que méfiant vis-à-vis de ce garde-temps, c'est cette invention (disputée par Hook) qui est à la base des chronomètres portatifs modernes¹¹ :

" La pendule était sans doute le moyen le plus facile et le plus certain pour connaître les longitudes en mer, si avec la perfection de l'égalité et de la justesse, elle n'eût point le défaut de n'être portative et de ne pas pouvoir être mue avec le corps auquel est attachée sans s'arrêter, en telle sorte que l'agitation des vaisseaux interrompt nécessairement son mouvement, qui est un inconvénient que l'on n'a pu éviter malgré toutes les précautions et tout l'art que l'on y a apporté jusqu'à présent. "

Huygens estime que le ressort a trop d'inconvénients pour la mesure du temps¹². Les tentatives qu'il réalise jusqu'en 1683, si elles n'aboutissent pas à la résolution définitive du problème de la longitude, et si elles n'aboutissent pas au remplacement pur et simple des vétustes horloges marines par la technique du ressort, contribue fortement à indiquer la voie de sa résolution. Cette invention est pour nous un des principaux acquis de la mesure du temps.

2.3 Les longitudes entre terre et mer

2.3.1 Splendeurs ...

La méthode des Immersions/Émersions des satellites de Jupiter est simple dans son principe¹³, mais fort complexe en pratique (même à terre). En effet, la connaissance de l'heure locale pouvait certes être précise, grâce aux nouvelles horloges, mais la régularité d'un jour à l'autre du pendule n'était pas pour autant assurée, loin de là. Bien que les tables de Cassini fussent suffisamment précises pour espérer trouver la longitude de points sur terre, l'observation d'une éclipse d'un satellite de Jupiter nécessitait de longues opérations de vérification des horloges afin de connaître leur marche exacte, leur avance ou leur retard. La première étape consistait à déterminer le midi

¹¹O.C. VII, 440 cité dans (Chareix, 2000) p.191

¹²(Chareix, 2000) p. 193-194

¹³(Cassini, 1722) p. 97-99

local par la méthode de la méridienne, et d'initialiser les pendules. Le comportement des horloges était ensuite soigneusement inscrit dans un registre pendant plusieurs jours, permettant d'apprécier les corrections à effectuer lors de l'observation. Les instructions générales pour de telles observations ont été rédigées par D. Cassini lui-même¹⁴ :

" Pour faciliter les observations astronomiques dans les voyages, avant que de partir on réglera les pendules à celles de l'observatoire et l'on marquera par un filet à plomb la situation dans laquelle il les faudra remettre. On marquera aussi la situation du petit poids qui règle la vitesse de la pendule, pour pouvoir le remettre en cas qu'il se déplace. On observera combien de secondes par jour avance ou retarde la pendule en avançant ou en reculant le petit plomb au-dessus ou au-dessous à la différence d'un pouce. Ayant mis [les pendules] en mouvement à l'heure estimée, on prendra quelques hauteurs du bord supérieur ou inférieur du Soleil [...] avant et après midi. On compare l'heure du matin avec celle du soir et on aura l'heure du midi. [...] Après avoir trouvé l'heure du midi, si elle est éloignée du point de douze heure, on peut avancer ou reculer l'aiguille des minutes [...] On fera les mêmes opérations le suivant et par là on trouvera le temps que l'horloge marque à midi. [...] S'il s'en faut beaucoup que la pendule soit d'accord avec le ciel au bout de 24 heures, on saura combien il faudra baisser le petit poids du pendule par la différence qu'on aura observé qu'il fait par jour le baissant ou haussant d'un pouce. [...] après qu'elle sera réglée, on pourra commencer à s'en servir. "

Une fois les horloges " étalonnées " (on en prend généralement plusieurs), il s'agissait d'observer les satellites entrer et sortir du cône d'ombre de Jupiter. Sur les quatre lunes pouvant servir au calcul de la longitude, on préfère souvent se baser sur la plus proche de Jupiter (période de révolution la moins longue). Notons enfin qu'il est plus facile de suivre un satellite et de noter l'heure de sa disparition, plutôt que de regarder dans la nuit sidérale et attendre qu'une vague lumière s'en dégage¹⁵ :

¹⁴(Cassini, 1729)

¹⁵(Cassini, 1729) p. 437

" Les observations les plus propres pour la détermination des longitudes , sont les immersions et les émerions du premier satellite de Jupiter dans son ombre. Avant l'immersion totale on le voit commencer à diminuer peu à peu. Si l'on peut on comptera les secondes de temps qui passent jusqu'à ce qu'il disparaisse entièrement. [...] Alors on soustraira ce que l'on aura compté [des minutes des Horloges] depuis la dernière fois que le satellite aura disparu. [...] Les émerions demandent une attention particulière parce qu'on ne voit rien quand on les attend. "

Cette méthode est maintenant en fait la seule permettant de trouver de manière précise et régulière la longitude du lieu d'observation par rapport au méridien origine (celui de Paris). Bien que la mise en place soit délicate, une telle précision n'avait jusqu'à présent pu être atteinte que lors de l'observation d'éclipses de Lune (qui ne sont pas visibles de toute part). C'est une aubaine pour le renouveau de la cartographie. L'Académie des sciences, en 1666, se voit attribuer la mission d'une cartographie précise de la France, notamment sous l'impulsion de Colbert¹⁶ (1619 – 1683). Une triangulation générale de la France est décidée, entreprise par Picard (1620 – 1682), puis continuée par D. Cassini, puis son fils Jacques (1677 – 1756). À partir de la mesure de la base d'un premier triangle et de la connaissance des coordonnées géographiques d'un des sommets de cette base obtenues par des observations astronomiques, on peut construire une série de triangles et connaître leurs caractéristiques. À la fin de la série, un autre point astronomique est effectué permettant de contrôler les erreurs éventuelles et de calculer les dimensions réelles d'un arc de méridien ou de parallèle. Pour la première fois, on disposait d'une technique rigoureuse pour mesurer les dimensions de la Terre, pour établir sa forme définitive (aplatie aux pôles ou à l'équateur ?) que la célèbre expédition de Bouguer et La Condamine au Pérou illustrera dans des conditions difficiles¹⁷.

La création de l'Observatoire de Paris (1667) en même temps que celle de l'Académie des sciences fait de la France un pays à la pointe du progrès scientifique. L'Académie invite de nombreux astronomes étrangers et les gratifie de pensions. On compte parmi eux Huygens de Leyden, Ole Römer de Copenhague et D. Cassini de Bologne. Ils travailleront aux côtés de Jean Picard, Adrien Auzout et Philippe de la Hire.

On constate un élan sans précédent pour la connaissance de la géographie précise de la terre en cette fin de 17^{ème} siècle. Les astronomes français, une fois le méridien de l'Observatoire de Paris bien établi, décident de relier les observatoires des différents pays voisins¹⁸. Picard part pour Uraniburd (1671-1672), Chazelles en Méditerranée (1693-1695), D. Cassini en Italie (1694-1696), J. Cassini en Flandre, Hollande et Angleterre (1697-1698). Des

¹⁶(Pelletier, 2001) chap. II

¹⁷(Trystram, 2001)

¹⁸(Débardat and Dumont, 1997)

projets encore plus ambitieux et des voyages plus lointains sont préparés très rapidement. Richer à Cayenne (1671-1673), d'autres aux Antilles, à l'île de Fer.

2.3.2 ...et misères des lunes de Jupiter

La méthode mise au point par Cassini semble porter ses fruits, à terre¹⁹. Mais on s'aperçoit progressivement d'imperfections. D'abord, les horloges ne sont pas transportables en l'état et nécessitent un étalonnage avant chaque mesure, comme nous venons de le voir. Le roulis d'un navire empêche pratiquement cette étape, le balancement du pendule étant directement influencé par la houle. D'autre part, nous avons vu que définir précisément l'instant d'immersion (dans le meilleur des cas) était parfois difficile à apprécier et pouvait varier d'un observateur à un autre, pour une même immersion. Le type de lunette utilisée peut aussi avoir une importance primordiale. En effet, l'instant de disparition d'un satellite ne sera pas le même à travers une lunette de 34 pieds et à travers une lunette de 18 pieds. On verra²⁰ les émer-sions plus tard de quelques instants par la seconde que par la première ! Si cette erreur est négligeable dans le cas de longues bases, elle est extrêmement gênante lorsqu'il s'agit de bases plus courtes. C'est pourquoi La Condamine proposera, dans le cadre de l'expédition du Pérou, une méthode alternative pour calculer la longitude entre deux points distants de 4 à 5 degrés en longitude²¹.

L'obstacle majeur à l'utilisation de cette méthode à bord d'un navire est l'encombrement de la lunette. Le fort grossissement et la faible ouverture des lunettes astronomiques de l'époque imposaient un socle stable afin de ne pas perdre de vue la planète. C'est une chose impossible sur le pont d'un navire que la houle fait osciller en permanence²² :

" Ce qu'il y aurait de mieux en mer pour avoir les longitudes par obser-vation céleste, ce seraient les satellites de Jupiter. Toute la difficulté est qu'il faut ordinairement pour les apercevoir des lunettes de 15 à 16 pieds, et qu'on n'en peut guère manier de mer de plus longues que de 5 pieds : car il faudrait qu'elles soient droites et sans se courber, toujours dirigées à l'astre, immobile, au mouvement près qui est nécessaire pour suivre l'objet, or on voit combien tout cela est difficile à de longues lunettes sur un vaisseau agité. "

Il s'avère donc que malgré des tentatives d'amélioration de la stabilité de la lunette (chaise suspendue, le celatone de Galilée), il n'est pas possible

¹⁹(de Barros e Vasconcellos, 1755)

²⁰(Cassini, 1730) p. 62

²¹(Condamine, 1735) p. 2

²²(Cassini, 1722) p. 105

d'appliquer l'observation de la régularité des mouvements des satellites de Jupiter à la détermination des longitudes en mer.

Huit ans après la création de l'Académie des sciences, le roi d'Angleterre, Charles II, signe un décret instituant la Royal Society en 1674. Les astronomes anglais sont trop au courant de l'inapplicabilité de la méthode de Cassini pour trouver les longitudes en mer. C'est autour de l'astronome John Flamsteed (1646 – 1719) et de sa conviction que la méthode des distances lunaires est la seule à pouvoir solutionner les longitudes en mer que la Royal Society crée l'Observatoire de Greenwich en 1676. En effet, l'application de la méthode des distances lunaires, nous l'avons vu, nécessite la connaissance de deux données fondamentales :

1. la position des étoiles fixes par rapport à la course annuelle du soleil (écliptique)
2. la position de la Lune au dessus d'un méridien de référence au moment où un navigateur fait une observation.

D'après ses propres observations, Flamsteed a prouvé que le meilleur catalogue d'étoiles disponible à l'époque était celui produit par Tycho Brahe (1546 – 1601), avec une erreur de 10 minutes ou plus, tandis que les tables de la Lune fournissaient sa position à 20 degrés près, soit une erreur potentielle sur la position terrestre de plusieurs centaines de miles dans les latitudes équatoriales. Les données nécessaires à la fabrication d'un nouveau catalogue prendraient des années. C'est en effet une activité qui occupera les astronomes du monde entier pendant plus de 150 ans.

2.3.3 Un bilan mitigé

Trouver les longitudes est au cœur des préoccupations des grands observatoires. On sait maintenant que la connaissance de la position des étoiles fixes avec précision est une des conditions nécessaires à toute entreprise astronomique de calcul des longitudes, ainsi que celle du mouvement de la Lune. On a vu que l'observation des éclipses de Lune furent pendant longtemps la seule méthode conduisant à la connaissance des longitudes²³ et c'est en effet celle qui le présente le plus naturellement²³. Nous connaissons les limitations de cette méthode. Les principales éclipses continueront à être observées pour valider les coordonnées géographiques de certains lieux remarquables.

Parallèlement, un certain nombre de méthodes sont mises au point. Il s'agit par exemple de l'occultation des fixes par la Lune, cas particulier des distances lunaires correspondant au moment de l'immersion de l'étoile par la Lune puis de sa réapparition de l'autre côté. Pour le Soleil également, on peut observer le début où les disques solaires et lunaires sont tangents extérieurement. C'est le début ou la fin de l'éclipse de Soleil. Au moment des

²³(Cassini, 1705a) p. 122

contacts, les centres des deux astres sont à une distance de l'autre égale à la somme de leur demi-diamètre. C'est une méthode développée par J. Cassini²⁴, en prolongeant les travaux de son père concernant les éclipses de Soleil ainsi que les intuitions de Edmund Halley (1656 – 1742) lorsqu'il propose²⁵ en 1683 :

" If therefore you happen at sea to observe nicely the time of an occultation or close application of a star to the moon, and can find a correspondent observation, about the same mean anomaly and distance of the moon from the Sun, especially near the aforesaid period of 18 years and 11 days, you may without sensible error, from hence pronounce in what Meridian your ship is tables. "

Un des avantages majeurs de cette méthode par rapport à celle des satellites de Jupiter, aux dires de M. Cassini, réside dans la possibilité d'observer les fixes de première, deuxième et troisième grandeur avec une lunette de 2 pieds au lieu d'une lunette de 10, 12 pieds. Une telle méthode nécessite la connaissance précise du cours de la Lune, ce que l'astronomie ne peut encore fournir²⁶. Mais on s'intéresse aussi à la topographie de la Lune^{27,28}

" Lorsque la Lune est en croissant ou en décours, on voit dans la partie obscure de son disque quelques points lumineux semés çà et là, mais tous peu éloignés du cercle qui sépare la partie éclairée d'avec l'obscur. Ce sont les sommets de montagnes élevées qui reçoivent les rayons du soleil plutôt que les plaines. "

Les immersions/émersions de ces sommets ne seront pas vues au même moment en deux lieux d'observation. La comparaison des deux heures locales fournira la longitude entre les deux points d'observation. Cette méthode nécessite cependant une sélénographie²⁹ qui ne peut manquer que de précision compte tenu de la qualité des télescopes.

2.4 La piste magnétique

La recherche de la longitude via des mesures magnétiques a une histoire propre, en général indépendante des autres méthodes de détermination des longitudes, mais mérite d'être signalée car c'est le premier phénomène auquel la recherche accorde une dimension planétaire.

²⁴(Cassini, 1705b)

²⁵Réflexion de 1683 (Halley, 1731) p. 189

²⁶(Bernoulli, 1789) et (Euler, 1747a)

²⁷(Cassini, 1730)

²⁸(HAR, 1733) p. 76

²⁹carte de la Lune extrêmement exacte, (HAR, 1733) p. 77

Nous avons vu que la boussole était utilisée par les marins pour indiquer le nord. C'est un instrument parfait par sa grande simplicité ; il n'a qu'un petit défaut ; il n'indique par réellement le nord et cette erreur n'est pas constante en fonction du lieu et varie dans le temps. En chaque lieu, il y a un angle entre la direction du Nord géographique et celle indiquée par la boussole. L'histoire de la découverte de cette déclinaison est longue, obscure et commence avec les remarques que fait Christophe Colomb dans son journal de bord le 3 septembre 1492³⁰. C'est cependant G. Mercator qui le premier aura l'idée de déterminer les longitudes en mesurant la déclinaison magnétique. Les lois régissant le champ magnétique terrestre ne sont pas connues à l'époque. Pourtant, un médecin londonien du 16^{ème} siècle, Guilielmus Gilbertus, dans son traité *De Magnete* publiera des tables de la déclinaison, en supposant que la Terre est un aimant géant.

On parlait d'expérimentation planétaire, il en s'agit effectivement d'une. L'étude du champ magnétique de la Terre nécessite des données réparties sur l'ensemble du globe. On sait qu'il faut travailler à grande échelle. Dès les premières années de la Royal Society, on encourage³¹ les navigateurs à récolter des observations de déclinaison :

" To observe declinaison and variations of the compass or needle from the Meridian exactly in as many places as they can and the same every several voyages. "

Ces observations, ainsi que celles relatives aux courants marins, aux vents, à la marche de pendules, à la profondeur de l'eau, à la salinité, à la nature du sol, doivent être consignées dans un registre à remettre à la Royal Society dès le retour en Angleterre.

Les résultats ainsi obtenus seront rassemblés par Halley qui entame lui-même un grand voyage pour effectuer des mesures au moyen d'une boussole semblable à celle de Stevin.

Il publie en 1702 la première carte globale de la déclinaison magnétique, sur laquelle il relie les points de mêmes valeurs et forme des lignes isogoniques. Ces lignes, selon Halley, pourraient être utilisées pour calculer³² les longitudes en mer. La solution proposée par l'astronome anglais consiste à couper l'isoligne magnétique correspondant à la valeur de la déclinaison trouvée à bord d'un navire avec une latitude observée par la hauteur d'un astre (on obtient un point). Cette méthode fait douter les meilleurs auteurs jusqu'au milieu du 18^{ème} siècle sans pour autant totalement l'exclure. Cassini le rappelle dans un article présenté en 1722 à l'Académie des sciences. On l'accepte faute d'avoir une méthode qui s'impose en pratique à toutes les

³⁰(Radelet-Degrave, 1982)

³¹(phi, 1667) p. 433

³²(Halley, 1683)

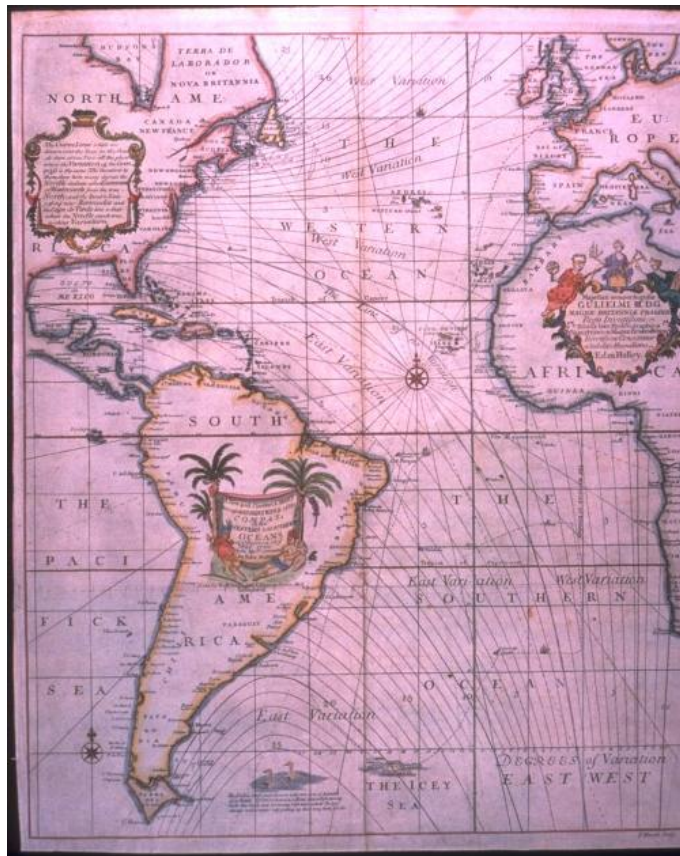


FIG. 2.1 – Extrait de la carte de déclinaison magnétique de Halley - 1702. Les lignes isogones apparaissent sur la surface de l'océan.

autres³³ :

" Il n'est pas encore à espérer beaucoup pour les longitudes du système de M. Halley sur la déclinaison de l'aiman. Tout y paraît jusqu'à présent dans un mouvement assez irrégulier, et selon des espèces de méridiens magnétiques assez bizarre. Mais peut-être tirera-t-on un jour pour les longitudes quelque méthode. "

Même Pierre Bouguer, trente et un ans plus tard (bien qu'il exprime clairement toutes les précautions à prendre avec cette méthode) ne rejette pas définitivement la mesure de la déclinaison magnétique comme le moyen de trouver sa distance au méridien origine³⁴ :

" Messieurs Mountain et Dodson ont entrepris de faire pour 1744 ce que M. Halley avait fait pour 1700. [...] Ils se sont trouvés en état de tracer les lignes courbes magnétiques tout autour de la terre, ce que n'avait pas fait M. Halley. Il m'a paru qu'il n'y avait qu'à joindre ensemble ces deux systèmes [...] pour pouvoir en retirer tout l'avantage possible [...] afin de voir le changement que souffre la déclinaison de l'aiman et de pouvoir juger à peu près de son progrès pour les années suivantes. [...] En plusieurs endroits ces mêmes lignes ne s'écartent pas extrêmement de la direction du méridien, et elles n'ont pas sensiblement changé de place depuis 1700 jusqu'en 1744. C'est principalement dans ces endroits qu'on peut employer avec succès la variation de l'aiman pour découvrir la longitude. "

2.5 Aspect de la navigation à l'aube du siècle des Lumières

Outre les bateaux d'émigrants, ce sont des navires chargés de marchandises qui sillonnent les mers du globe. Le 17^{ème} siècle a vu s'établir un nombre de comptoirs important sur les rives des colonies de toutes les nations européennes (France, Angleterre, Hollande, Allemagne, Espagne, Portugal). La forme définitive de la traite négrière en France est mise au point à Nantes au cours de la décennie 1720-1730 où seront affrétés jusque trente navires en 1765. Le commerce maritime au long cours a lieu essentiellement entre les métropoles et leurs colonies. Le Portugal développe fortement ses importations. En 1699, 765 kilos d'or étaient arrivés à Lisbonne ; ce chiffre passait à 9000 en 1714 et 25000 en 1720. À partir de cette date, la quantité d'or

³³(Cassini, 1722) p. 107

³⁴(Bouguer, 1792) p. 314-316

débarquée à Lisbonne dépasse chaque année 11000 kilos. Il faut y ajouter les diamants et autres pierres précieuses ou fines. En échange, le Portugal exporte au Brésil des produits fabriqués et des esclaves achetés en Afrique.

Le commerce espagnol a subi une profonde crise de 1622 à 1650. Il remonte ensuite, surtout avec la mise en exploitation des mines d'argent du Mexique : l'argent du Mexique prend, au milieu du 18^{ème} siècle, le relais de l'or brésilien.

Le commerce interlope³⁵, est un des traits les plus caractéristiques du commerce transatlantique du 18^{ème} siècle. Il se fait en partie par l'intermédiaire du Honduras britannique et s'exerce surtout au détriment de l'Espagne par les anglais. Le déclin de la Compagnie des Indes Occidental hollandaise font bientôt des anglais les maîtres du commerce atlantique.

Le commerce avec les colonies anglaises d'Amérique du Nord s'est très vite développé, bien que les treize colonies aient été, avant tout, des colonies de peuplement. Ces colonies produisent en abondance des céréales, de la viande, du poisson, du bois, du tabac, du coton. Ces produits sont exportés en Angleterre, mais aussi dans les pays d'Europe méridionale qui envoient, en échange, du vin et des fruits en Grande-Bretagne. Au retour, les bâtiments anglais vont acheter des esclaves en Afrique et les transportent en Amérique. Le commerce est également actif entre les îles anglaises des Antilles, les colonies du continent, et la Grande-Bretagne. Les Antilles expédient du sucre, des mélasses, du rhum et reçoivent en contrepartie des produits alimentaires ou des objets manufacturés.

Le siècle des Lumières est déjà bien entamé, la question de longitudes sur mer n'est toujours pas résolue. De toutes les méthodes proposées, aucune ne semble aboutie, bien que l'astronomie soit au service de la cartographie et de la navigation. En 1719, le père Louis Feuillée dans une lettre au Régent écrit :

" Les avantages que la géographie et la navigation retirent des observations astronomiques m'engagent toujours plus vivement à exécuter les ordres de Son Altesse Royale. La navigation serait encore dans son enfance si l'astronomie ne l'avait perfectionnée, et le commerce de pays étrangers n'aurait pas apporté en Europe des sommes immenses si l'astronomie n'avait pas tracé aux navigateurs et posé sur les cartes les situations des lieux d'où l'on a tiré ces grandes richesses. Les côtes de la mer du Sud étaient si mal jetées sur les meilleures cartes que leurs erreurs allaient à 160 lieues... "

Si la navigation n'est plus dans son enfance, elle n'a pas pour autant atteint sa maturité. Les tables de la Lune ont une précision insuffisante, les positions

³⁵contrebande

³⁶ cité dans (Froeschle, 1996) p. 243

des étoiles fixes ne sont pas encore connues, les instruments d'observation ne permettent pas de prendre les hauteurs des astres à moins de 5,6 ou 7 minutes, et enfin les horloges marines ne gardent pas la cadence, en général, plus de 24 heures. Il ne reste (toujours) au pilote guère que l'estime pour calculer sa longitude. En somme, cette période charnière d'entre deux siècles, ce couloir où l'impression que les horizons méthodologiques disparaissent, n'est en fait que le prélude aux grands développements théoriques et techniques du siècle des Lumières. Aux hésitations d'un Halley, s'ajoutent les prédictions d'un Cassini concernant le calcul des longitudes en mer où il écrit en 1722 que " Tout dépendra de l'Art de perfectionner les Lunettes et il n'est pas encore épuisé"³⁷.

Sans avoir tort, ce ne sera pas pour autant entièrement exact. C'est en effet sans compter la nouvelle conception des mouvements planétaires de Newton.

2.6 Le Longitude Act

Certain évènements ont marqué l'histoire des longitudes, la méthode d'Hipparque, les éphémérides de Cassini. D'autres, sans faire partie intégrante de cette histoire, ont pourtant grandement contribué à son évolution. Nous avons vu que les Anglais étaient très présents dans le commerce atlantique, et que la marine anglaise sillonnait allègrement cet océan. Même si ce n'est pas le seul, c'est sans doute un des plus fameux naufrages, celui d'une partie de la flotte de l'Amiral anglais Sir Clowdisley Shovel le 29 septembre 1707 sur les brisants des îles Scilly, au large de la pointe Ouest de l'Angleterre, emportant avec lui 2000 de ses hommes, qui fit prendre conscience aux autorités britanniques de l'urgence, et du sérieux de la situation concernant la pratique de la navigation en mer.

C'est ce qui a en partie motivé le *Longitude Act* signé par la Reine Anne le 8 juillet 1714 récompensant toute personne capable de fournir un moyen **pratique** pour calculer les longitudes en mer avec des conditions de précision impératives. Le gagnant recevrait 10000 livres si l'erreur au cours d'un voyage vers les Indes occidentales (d'une période minimum de six semaines) ne dépassait pas 60 miles, il recevrait 15000 livres si elle ne dépassait pas 30 miles, et 20000 livres si l'erreur finale était inférieure à 30 miles. Le *Longitude Act* désigna un jury, le *Board of Longitudes*, constitué de savants, d'officiers de marine et de fonctionnaires du gouvernement. Parmi eux l'Astronome Royal (Flamsteed) y figurait comme membre d'office, ainsi que les professeurs de mathématiques des universités d'Oxford et de Cambridge et le président de la Royal Society (Newton). L'attrait d'une telle récompense a suscité de nombreuses vocations, mais les projets proposés n'ont pas été jugés suffisamment réalistes.

³⁷(Cassini, 1722) p. 106

L'ambition de cette assemblée est a priori de ne privilégier aucune solution potentielle, pourvu qu'elle satisfasse aux conditions imposées de précision. En amont de l'*Act*, une commission d'experts dirigée par l'astronome royal Halley, et par le président de la Royal Society, Newton, avait rédigé un rapport sur la longitude³⁸ :

"One is, by a watch to keep time exactly : but by reason of the motion of a ship , the variation of heat and cold and dry, and the difference of gravity in different latitudes, such a watch hath not yet been made : Another is, by eclipses of Jupiter's satellites : but by reason of the length of telescopes, requisite to observe them, and the motion of a ship at sea, those eclipses cannot be there observed : A third is, by the place of the moon : but her theory is not yet exact enough for this purpose : it is exact enough to determine her longitude within two or three degrees, but not within a degree : ...in the three ways there must be a watch regulated by a spring, and rectified every visible sunrise and sunset, to tell the hour of the day...in the first day, there must be two watches, this and the other mentioned above. "

Dans ce rapport, c'est au nom de la Royal Society que s'exprime Newton. Celui-ci énumère un certain nombre de possibilités en vue de déterminer la longitude en mer " vraies en théorie mais difficile à exécuter " : par le biais d'une montre capable de garder le temps exactement, par celui des éclipses de Jupiter, ou par la position de la Lune. Décisif dans ce texte est le fait que les méthodes présentées, qu'elles mettent en jeu l'observation et le calcul astronomique ou bien l'élaboration de nouvelles machines, soient exposées sans jugement quant à leur faisabilité. Les savoirs auxquels elles font appel sont de nature différente. La première proposition suppose la construction d'une horloge inédite et relève essentiellement du domaine de l'atelier ; la seconde et la troisième nécessitent un dispositif d'observation adapté au déplacement nautique, mais surtout l'intermédiaire d'une discipline déjà mathématisée, l'astronomie, pour prévoir les mouvements des corps envisagés. Il n'y pas de hiérarchie dans cette énumération : les trois procédés sont, dans le texte de Newton, traités de la même manière sur le plan rhétorique. On voit cependant se profiler deux espaces privilégiés dans lesquels se trouvent les solutions : la terre (l'atelier), et les cieux (les observatoires astronomiques). Les deux branches de la résolution du problème vont cependant bientôt se faire face dans une sévère concurrence opposant le côté artisanal de la construction de nouvelles machines d'une part, et le côté savant de l'observation et du calcul mécanique de l'autre.

³⁸House of commons Journal 25 mai 1714, cité dans (Howes, 1980)

Chapitre 3

Science et Progrès

- *À quoi crois-tu ? demanda Francesco [...]*
- *Moi ? à presque rien. Au temps qui passe, peut-être, et au génie des hommes qui se succèdent les uns aux autres et qui n'en finissent plus d'inventer des choses nouvelles.*

J. d'Ormesson - Histoire du juif errant

L'institution du *Longitude Act* aurait pu, comme les prix précédents, ne jamais être un moteur suffisant pour l'écriture d'une solution au problème des longitudes en mer. Ce problème était en gestation depuis de nombreuses années, au moins dans sa forme la plus aboutie. On voit que la synthèse des solutions rapportée par Cassini en 1722 dans sa communication à l'Académie des sciences, ainsi que le texte de Newton présenté devant le parlement en 1714 sont bel et bien exhaustifs. Tout est déjà là, mais la science et la technique ne semblent pas être encore prêtes.

La raison dans l'art de naviguer. Nous entrons effectivement dans une ère d'utopie mathématique que l'on voudrait garante de la sécurité de la navigation et de la puissance. Les mathématiques s'épanouiront à travers la mécanique universelle puisque les mêmes lois régissent dorénavant la physique terrestre et céleste. On ne cessera de louer sa capacité de prédiction. Si le côté savant des méthodes astronomiques nécessite la prévision des déplacements lunaires, elles reposent aussi fondamentalement sur les moyens permettant l'observation précise des distances angulaires.

Le 18^{ème} siècle n'a pas inventé de nouveaux instruments de mesure, mais a essentiellement contribué à l'amélioration d'instruments optiques dont le principe avait été arrêté le siècle précédent. L'invention de la double réflexion par Hadley¹ en 1731, scellera le destin de la mesure astronomique de précision en mer. Par l'introduction d'un miroir dans l'appareil optique, on a pu faire coïncider l'image des deux points éloignés dont la distance angulaire

¹(Hadley, 1731)

est à mesurer. Ainsi, le problème du tangage du vaisseau est résolu : le mouvement ne vient pas perturber la mesure. Les premiers quadrants réflecteurs autoriseront une précision de deux minutes d'arc qui les qualifiera pour la méthode des distances lunaires. Ces instruments continueront à être améliorés au cours du siècle, notamment par l'ajout d'une visse micrométrique, puis par une augmentation du champ de visée, le huitième de cercle (octant) devenant le sixième de cercle (sextant) en 1770 permettant de mesurer des distances jusqu'à 120°.

Cette dernière période, dont la fin coïncide avec la résolution effective du problème des longitudes en mer, clôt la question qui occupa le devant de la scène scientifique européenne, notamment pour ses profondes implications avec l'astronomie et la mécanique naissante. Les équations de la gravitation introduites par Newton deviennent une des clés du problème de la détermination du mouvement de la Lune et donc de celui des longitudes. Parallèlement, les horloges de marine apparaissent et tentent de vaincre le lancinant roulis subi par les navires.

3.1 Entre Cartésiens et Newtoniens

Notre regard rétrospectif sur cette histoire suscite l'interrogation suivante : pourquoi fallut-il attendre près de 60 ans pour que les équations définissant le mouvement de la Lune soient résolues ? Outre les difficultés techniques, c'est l'intérêt du problème lui-même qui est en cause.

Quelles sont les forces mises en jeu dans le mouvement des astres ? Dans les années 1730, en France, la polémique s'installe. Pour les cartésiens, c'est l'impulsion. Pour les newtoniens, c'est l'attraction. En France, le cartésianisme domine encore les esprits grâce aux *Entretiens sur la pluralité des mondes* (1686) de Fontenelle. Celui-ci, cartésien convaincu, a voulu mettre à la portée du public mondain cultivé de son temps le système de Copernic : le soleil est immobile au centre du monde et la Terre est une planète mobile qui tourne autour de lui, contrairement aux théories d'Aristote et de Ptolémée. Dans un style légèrement précieux², il décrit ce nouveau système du monde mû, selon Descartes, par des " tourbillons de matière subtile " :

²(Fontenelle, 1686) p. 176-177

" Mais, interrompit la marquise, pourquoy y a t il des planètes qui ne valent pas mieux que [les satellites de Jupiter] ? Sérieusement il me paroîtroit plus régulier et plus uniforme que toutes les planètes, grandes et petites, n'eussent que le mesme mouvement autour du Soleil. Ah ! Madame, repliquay-je, si vous sçaviez ce que c'est que les tourbillons de Descartes, ces tourbillons dont le nom est si terrible, et l'idée si agréable, vous ne parleriez pas comme vous faites. La teste me dust-elle tourner dit elle en riant, il est beau de sçavoir ce que c'est que les tourbillons. Achevez de me rendre folle, je ne me ménage plus, je ne connois plus de retenüe sur la philosophie ; laissons parler le monde et donnons nous aux tourbillons. Je ne vous connoissois pas de pareils emportemens, repris-je ; c'est dommage qu'ils n'ayent que les tourbillons pour objet. "

La publication des *Principia naturalis* (1687) de Newton seulement quelques mois plus tard ne laissait pas présager le renversement latent qui n'attendait que quelques vérifications pour effacer définitivement la théorie des tourbillons. Si Newton, dans les *Principia*, fait une magistrale synthèse des connaissances de son temps et y énonce la célèbre loi de la gravitation cet ouvrage n'en reste pas moins très difficile à lire³ :

" il a été écrit d'une manière si fine, si savante et si peu à la portée du commun des géomètres, non seulement anglais, mais français, qu'il lui a fallut de nombreux commentateurs, et les plus habiles géomètres [...]"

Dans son pays, ses idées ne se propageront que lentement, la première édition des *Principia* n'ayant été tirée qu'à 250 exemplaires. En 1713, une deuxième édition de 750 exemplaires accélère leur diffusion en Angleterre, et bientôt sur le continent.

Au cours de ces années charnières où la physique est en pleine (r)évolution, l'apparition de nouveaux concepts sème le scepticisme et le doute. Le scientifique, l'astronome dans ce cas, se trouve devant le choix méthodologique suivant : comment obtenir des tables de la Lune suffisamment précises ? dois-je intégrer les nouvelles conceptions newtoniennes (qui n'ont pas encore été confirmées empiriquement, et dont la résolution des équations ne tombe pas sous le sceau de l'évidence), ou dois-je perfectionner ce que nous savons déjà faire, à savoir se baser sur des hypothèses purement géométriques et indépendantes du système de gravitation ? Quand Halley succède à Flamsteed en 1720 comme astronome royal, son parti est pris. D'abord, l'observatoire de Greenwich a été créé en priorité pour faire des observations précises du mouvement des astres ; ensuite, Halley est convaincu que la méthode de résolution directe des orbites newtoniennes à trois corps est d'une difficulté pratiquement insurmontable. Ses premières recherches l'on conduit à réhabi-

³(Maupertuis, 1732) p.112

liter l'hypothèse du cycle de Saros utilisé par les Chaldéens pour la prévision des éclipses, en introduisant des équations empiriques, déterminées par les différences entre les vrais lieux de la Lune observés depuis la Terre, et ceux prédits par les meilleures tables⁴. Selon Halley, ces différences, ces erreurs de table, doivent être périodiques et revenir sensiblement égales au bout de 18 ans 10 ou 11 jours (cycle de Saros)⁵ :

" I compared my own observations to Mr. Street's tables and I perceived how regular the irregularities were, and that where the moon had been exactly observed formerly, at the distance of one or more periods of 233 months, I could even predict the error of the tables. "

Ces cycles de période relativement importante sont difficiles à observer. Après y avoir consacré les vingt dernières années de sa vie, aucun cycle n'a pu être mis en évidence.

En France, l'accueil de la théorie de la gravitation reste froid. L'Académie des sciences se veut en effet obstinément cartésienne. C'est Maupertuis qui introduit officiellement le newtonisme à l'Académie des sciences, notamment grâce à son mémoire lu en 1732, dans lequel il explique à un auditoire médusé que les principes cartésiens n'épuisent pas la réalité physique et que " l'interdit métaphysique " qui pèse sur l'attraction est injustifié. " Il a fallu plus d'un demi-siècle, constate-t-il, pour apprivoiser les académies du continent avec l'attraction. Elle demeurerait enfermée dans son île ou, si elle passait la mer, elle ne paraissait que la reproduction d'un monstre qui venait d'être proscrit [...] On était si charmé d'avoir introduit dans l'explication de la nature une apparence de mécanisme qu'on rejetait sans l'écouter le véritable mécanisme qui venait s'offrir". Parmi les partisans de l'attraction, on compte deux autres célèbres académiciens, Clairaut et La Condamine, tous deux soutenus par la plume de Voltaire (qui composera la préface à la traduction française des *Principia* par Mme de Châtelet). Des progrès aussi bien théoriques qu'expérimentaux viennent sans cesse étayer la nouvelle théorie de l'attraction : développement sur le problème des deux corps (Daniel Bernoulli, 1734) ; mesure de l'aplatissement terrestre (expédition en Laponie menée par Maupertuis et Clairaut, 1737) en accord avec les prévisions newtoniennes ; le retour de la comète de Halley, prédit pour 1759 par les tables newtoniennes, est effectivement observé. Ces démonstrations exceptionnelles convertissent la majorité des académiciens aux thèses newtoniennes. Mais le point précis où la cosmologie newtonienne touche à la cartographie du globe est bien en ce qui concerne la détermination des longitudes ainsi que le mouvement lunaire. C'est la résolution de ce problème qui sera la preuve

⁴Il s'agit des tables Carolines qui furent d'abord publiées à Londres en 1661, puis à Nuremberg en 1705 et que les astronomes ne délaissèrent que pour les tables de La Hire parues en 1687

⁵(Halley, 1731) p.188

publique de la justesse de la théorie de la gravitation.

3.2 Les premières théories analytiques de la Lune

Les années 1740 voient les premières tentatives de solution globale pour le mouvement de la Lune⁶. La solution générale dont on se sert consiste, à partir d'une autre Lune dont le mouvement serait aisé à déterminer (cette Lune imaginaire suivrait une orbite circulaire, ou mieux, elliptique suivant les découvertes de Képler), à découvrir pour chaque instant la différence qui se trouve entre les lieux de cette Lune imaginaire et de la véritable Lune. La solution repose sur l'intégration d'un système d'équations différentielles établi à partir de la loi newtonienne de la gravitation appliquée au système à trois corps {Lune, Terre, Soleil}. Dès 1742, Euler publie des tables lunaires calculées selon ce principe. Parallèlement, en France, Clairaut et d'Alembert s'attaquent au même problème, dont la résolution fut sans doute précipitée par le prix mis au concours de l'Académie des sciences de Saint-Petersbourg en 1751. Clairaut et D'Alembert⁷, dans leurs écrits de l'époque, posent le principe de la résolution du système d'équations différentielles d'une manière itérative⁸ :

" Cette méthode est immédiatement fondée sur les formules des différentielles du second degré, que la théorie fournit pour la détermination du mouvement, sans qu'on ait besoin d'en chercher préalablement les intégrales. Pour cet effet, je suppose d'abord que tant le lieu du corps dont il est question, que son mouvement, c'est à dire la vitesse avec la direction, soient exactement connus pour une époque donnée : ensuite, sachant que pour ce même temps, les accélérations que les forces qui agissent alors sur le corps y produisent, j'ai fait voir comment de là on peut assigner le lieu et le mouvement de ce corps, non seulement pour un instant après, mais pour un temps assez considérable écoulé depuis la dernière époque. Cependant, ce temps ne doit pas être pris trop grand, de peur que l'aberration, qui croit avec le temps, ne devienne sensible ; Mais dès qu'on y est arrivé, on n'a qu'à répéter les mêmes opérations pour parvenir à un moment deux fois plus éloigné de la première époque, et ainsi, on pourra continuer le même calcul aussi loin qu'on voudra. "

Mais, de même qu'Euler⁹ qui les a précédés de quelques années, les deux mathématiciens français ne réalisent, au cours de l'année 1747, que la première itération en substituant une solution pseudo-képlérienne à la position

⁶(Clairaut, 1743)

⁷(d'Alembert, 2002)

⁸(Euler, 1763a) p.221

⁹(Euler, 1746), (Euler, 1747b)

réelle de la Lune dans le calcul des forces perturbatrices. Pour cette raison, ils n'obtiennent tous trois que la moitié¹⁰ environ du moyen mouvement observé des apsides¹¹ de la Lune, sans soupçonner que les itérations suivantes puissent fournir, pour cette quantité, une contribution aussi importante que la première. Clairaut, Euler et d'Alembert¹², qui sont arrivés aux mêmes conclusions, deviennent sceptiques vis-à-vis de la loi d'attraction en $\frac{1}{r^2}$, en venant à proposer une autre loi s'y substituant¹³. La controverse entre Buffon¹⁴, partisan d'une loi de gravitation écrite par un unique terme, et Clairaut alimente les débats de l'Académie. Les manuscrits de 1752 (Clairaut¹⁵), 1753 (Euler¹⁶) et 1754 (d'Alembert) tomberont néanmoins d'accord sur la proposition mise au concours, à savoir que " les inégalités du mouvement lunaire s'accordent avec la théorie newtonienne " de la gravitation.

Les choix purement théoriques des trois géomètres ne faisaient cependant qu'approcher les précisions nécessaires au calcul des longitudes en mer. Dans leurs méthodes de résolution itérative, les coefficients des développements étaient insuffisamment estimés. Euler le mentionne explicitement dans une communication à l'académie de Berlin¹⁷ :

" La théorie m'avait fourni toute les corrections, avec plusieurs autres que j'ai omises à cause de leur petitesse ; mais quelques éléments demandaient un grand nombre d'observations pour être bien déterminés, et comme ceux que j'avais employés pour ce dessein n'étaient pas assez exactes, les tables que j'avais construites là-dessus ne remplir point mes vues. "

Le problème consistait donc à faire converger les mesures des astronomes et les calculs des mathématiciens avec une précision maîtrisée. C'est à l'astronome et mathématicien Tobias Mayer (1723 – 1762), directeur de l'observatoire de Gottingen, que reviendra le privilège de publier en 1753 les *Novae Tabulae motuum solis et lunae*, tables des mouvements de la Lune et du soleil d'une précision encore jamais égalée (elles ne s'écartent¹⁸ pas de plus d'une minute des observations). Pour Euler, cette précision est largement suffisante lorsqu'il prend la défense des calculateurs¹⁹ :

¹⁰(Clairaut, 1745)

¹¹Point extrême du grand axe de l'orbite d'un astre

¹²(d'Alembert, 1745)

¹³en ajoutant des termes compensateurs en $\frac{1}{r^4}$

¹⁴(Buffon, 1745)

¹⁵(Clairaut, 1752)

¹⁶(Euler, 1753)

¹⁷(Euler, 1763b) p. 183

¹⁸(Euler, 1763b) p.181

¹⁹(Euler, 1763b) p. 181

" Quand on serait en état de calculer le lieu de la Lune à une seconde près, on n'en saurait retirer aucun avantage pour la pratique. Or un tel degré de précision demanderait peut-être une centaine de nouvelles équations, qui fatigueraient sans aucun fruit le travail et la patience des calculateurs. "

Pourquoi Mayer, qui n'avait pas le premier résolu le problème à trois corps, fut cependant le premier à fournir des tables utilisées, nous le verrons, dans les éphémérides nautiques? La méthode de résolution des équations ainsi engendrées fait intervenir un nombre de coefficients variable (en fonction des termes perturbateurs que l'on considère dans la solution). À la différence d'Euler, dont il utilisa les calculs, Mayer estime ces coefficients en fonction d'observations très précises d'éclipses de Soleil et de Lune (il se basera sur 200 observations²⁰).

$$\begin{array}{r}
 + \ 0^{\circ} \ 11' \ 14'' \sin a \\
 - \ \quad \quad \quad 0.4 \sin 2a \} \text{équation annuelle.} \\
 - \ \quad \quad \quad 56 \sin (2D + a) \dots \dots \dots D = \text{distance angulaire } (\odot - \ominus) \\
 - \ \quad \quad \quad 1. \ 6 \sin (2D - a) \\
 + \ \quad \quad \quad 49 \sin (2D + A) \dots \dots \dots A = \text{anomalie moyenne } \odot \\
 - \ 1.20.36 \sin (2D - A) \dots \dots \dots \text{Évection} \\
 + \ \quad \quad \quad 26 \sin (4D - 2A) \\
 + \ \quad \quad \quad 2. \ 0 \sin (2D - A + a) \\
 + \ \quad \quad \quad 47 \sin (2D - A - a) \\
 + \ \quad \quad \quad 28 \sin (A - a) \\
 + \ \quad \quad \quad 51 \sin 2 [D - (\odot - \Omega)] \dots \dots \dots \text{La table donne } 58'' \\
 + \ \quad \quad \quad 16 \sin (D - A) \\
 - \ \quad \quad \quad 1. \ 0 \sin 2 (D - A) \\
 + \ \quad \quad \quad 4 \sin \Omega \\
 - \ 6.18.11 \sin A' \dots \dots \dots A' = A \text{ corrigée par les équations précédentes.} \\
 + \ \quad \quad \quad 12.52 \sin 2A' \\
 - \ \quad \quad \quad 37 \sin 3A' \\
 - \ \quad \quad \quad 1.55 \sin D' \dots \dots \dots D' = D \text{ corrigée de même.} \\
 + \ \quad \quad \quad 35.47 \sin 2D' \\
 + \ \quad \quad \quad 2 \sin 3D' \\
 + \ \quad \quad \quad 14 \sin 4D' \\
 + \ \quad \quad \quad 1.26 \sin [2 (\odot - \Omega) - A'] \\
 + \ \quad \quad \quad 6.51 \sin 2 (\odot - \Omega).
 \end{array}$$

FIG. 3.1 – Aperçu des développements de Mayer pour l'établissement de ses tables ((Delambre, 1827) p. 444)

Les nouvelles tables obtiendront immédiatement une reconnaissance européenne, après leur vérification par Bradley de l'observatoire de Greenwich.

²⁰(Delambre, 1827)

Même si les recherches concernant le mouvement de la Lune se poursuivent activement²¹, un nouveau pas vient d'être franchi, un pas décisif qui va enfin permettre le calcul des longitudes à bord d'un navire.

3.3 La Caille et les distances lunaires

Peu avant la parution des tables de Mayer, l'effervescence suscitée autour de la résolution du problème à trois corps selon les théories newtoniennes relance les espoirs de voir cette fameuse méthode des distances lunaires appliquée au calcul des longitudes en mer. En France, le renouveau s'amorce à travers les recherches de l'abbé Nicolas-Louis de La Caille (1713 – 1762). Cet astronome est le théoricien français fondateur de cette méthode. On verra que c'est le seul à se préoccuper vraiment de la diffusion de la nouvelle navigation astronomique auprès des marins. Il insiste²² :

" Je suis même tellement convaincu [...] de l'utilité réelle des observations des longitudes par la lune, dans les voyages de long cours, que je crois qu'on ne saurait trop engager les navigateurs à s'y appliquer, ni d'employer trop de moyens pour leur en faciliter l'usage. "

S'il ne joue qu'un rôle limité lors de la première ébauche des tables de la Lune par Clairaut²³ en 1750 – 1751, il intégrera rapidement les découvertes de ce dernier pour le calcul de la parallaxe lunaire (dans un mémoire²⁴ présenté à l'Académie en 1761 à son retour du cap de Bonne-Espérance²⁵ (1750–1754)). Les corrections de la parallaxe et de la réfraction participent en effet, au même titre que les mouvements de la Lune, à la précision finale du calcul des longitudes. Clairaut joint d'ailleurs à ses tables de la Lune, des tables de la parallaxe horizontale²⁶. La méthode est mise au point puis validée par les nombreuses observations recueillies au cours de ce voyage aux côtés du capitaine de la Compagnie des Indes d'Après de Manneville. Le voyage au Cap fut l'occasion non seulement d'expérimenter la méthode des distances lunaires, mais surtout de réfléchir sur une méthode **pratiquement** utilisable par le commun des navigateurs. Ses essais auprès de quelques officiers sont concluants (à ses dires²⁷) pourvu qu'une partie des calculs soit déjà effectuée. La méthode de La Caille suppose en effet l'existence d'un almanach²⁸

²¹(Euler, 1766) et (Bernoulli, 1773)

²²(LaCaille, 1759) p. 71

²³(Clairaut, 1756b)

²⁴(LaCaille, 1761)

²⁵Ce voyage a été préparé comme une véritable expédition scientifique. Les recherches portent aussi bien sur l'astronomie (parallaxe de la Lune, catalogue d'étoile, de nébuleuses, distances lunaires, réfraction) que sur les vents et marées, sur la déclinaison magnétique

²⁶(Clairaut, 1756a)

²⁷(LaCaille, 1751)

²⁸(LaCaille, 1759) p. 87

nautique regroupant, pour les étoiles les plus brillantes du zodiaque comme γ de Pégase, α et β du Taureau, α , β et γ des Gémeaux, Régulus, l'épi de la Vierge, le front et le cœur du scorpion, les distances lunaires sous un méridien de référence.

" [Cet] almanach devra marquer de 4 en 4 heures de temps vrai pour chaque jour du mois l'arc de distance du bord éclairé de la Lune à celle de ces étoiles [...]. Qu'on y ajoute pour chaque jour la parallaxe horizontale de la Lune à midi et le temps vrai du passage de l'étoile au méridien, le tout assujetti à un méridien fixe comme celui de Paris. "

*MODÈLE DE CALCULS POUR UN ALMANACH NAUTIQUE,
selon la méthode expliquée dans ce Mémoire.
Pour les derniers jours de Mai 1754.*

Jours du mois.	Noms des Etoiles dont on doit se servir.	Temps vrai du passage de l'Etoile au Méridien.		Parall. horis. ϵ à midi.	HEURES pour lesquelles les distances ont été calculées.												Position de l'étoile à l'égard de la Lune.			
					Midi.		4.		8.		12.		16.		20.			24.		
		H.	M.		S.	M.	D.	M.	D.	M.	D.	M.	D.	M.	D.	M.		D.	M.	D.
25	Régulus.	5.	46.	3	57,7	42.	4,6	39.	48,8	37.	33,1	35.	17,0	33.	1,0	30.	45,0	28.	28,9	Ori.
26		5.	42.	0	58,0	28.	28,9	26.	12,9	23.	56,7	21.	40,6	19.	24,4	17.	8,2	14.	51,9	Ori.
27	Le Soleil.	0.	0.	0	58,3	53.	15,0	55.	24,3	57.	33,6	59.	43,0	61.	52,3	64.	1,7	66.	11,1	Occ.
28		0.	0.	0	58,6	66.	14,1	68.	21,0	70.	30,8	72.	40,7	74.	50,6	77.	0,7	79.	11,1	Occ.
27	L'Épi de la Vierge.	8.	54.	26	58,3	68.	0,5	65.	40,0	63.	20,2	61.	1,0	58.	40,2	56.	20,0	53.	59,7	Ori.
28		8.	50.	24	58,6	53.	59,7	51.	39,5	49.	19,2	46.	58,5	44.	38,8	42.	19,4	40.	0,5	Ori.
29		8.	46.	21	58,9	40.	0,5	37.	41,7	35.	21,7	33.	0,3	30.	38,5	28.	15,5	25.	51,0	Ori.
30		8.	42.	18	59,0	25.	51,0	23.	26,0	21.	1,8	18.	39,6	16.	17,6	13.	54,5	11.	30,1	Ori.
31	Antarès.	12.	39.	36	59,0	57.	31,3	55.	10,6	52.	50,2	50.	30,0	48.	9,7	45.	49,7	43.	29,8	Ori.

FIG. 3.2 – Proposition de tables astronomiques pour le calcul des longitude par la méthode des distances lunaires - La Caille 1759

L'officier en charge de la navigation procédera suivant les trois étapes suivantes :

1. **Prendre les hauteurs** : Une fois le quartier de Hadley vérifié, on prend la hauteur de l'étoile choisie et on note l'heure précise de l'observation à l'aide d'une montre ordinaire. Aussitôt que l'étoile a été prise, l'observateur mesure la distance au bord éclairé de la Lune, en marquant l'heure de l'opération. Sans perdre de temps, il prend la hauteur du bord éclairé de la Lune que l'étoile aura rasée dans l'observation précédente. Aux dires de La Caille, ces mesures peuvent être effectuées en 10 minutes, voire 5 pour les observateurs expérimentés.
2. **Corriger les observations de la parallaxe et de la réfraction** : Les tables fournissent la valeur de la parallaxe de la Lune au midi. Les

observations sont ramenées à la distance du centre de la Lune à l'étoile.

3. **Trouver l'heure du méridien de référence** : À partir de la distance trouvée par l'étape précédente, on cherche dans la table l'heure à laquelle cette distance a été observée au-dessus du méridien de référence. En prenant la différence entre l'heure locale et l'heure sous le méridien de référence, on obtient la longitude recherchée.

Malgré des tables lunaires moins précises que celles de Mayer, sa méthode aura un avenir certain notamment grâce à son mémoire de 1759 dans lequel il fustige la démarche des astronomes Pingré (1711 – 1796) et Lemonnier, promoteurs de la méthode concurrente de l'angle horaire. Ce dernier avait engagé le père Pingré à calculer pour lui les positions de la Lune satisfaisant à sa méthode dans les quatre et seuls volumes de l'*Etat du ciel* entre 1754 et 1757.

Rappelons en quoi consiste la méthode de l'angle horaire. Dans son plus simple énoncé, cette méthode ne nécessite qu'une hauteur de la Lune. Connaissant la latitude et la déclinaison de la Lune, il est facile de calculer à l'aide de la trigonométrie sphérique son angle horaire. Une comparaison avec la valeur de cet angle pour le méridien de Paris, on obtient la longitude du lieu d'observation par différence. Son application pratique est un peu plus exigeante. Elle exige :

1. La mesure de la hauteur méridienne
2. L'observation de la latitude du lieu
3. Une mesure de la hauteur de la Lune sur l'horizon, avant ou après son passage au méridien
4. Le temps écoulé entre les deux observations avec la contrainte de choisir le moment où le mouvement de la Lune en déclinaison est négligeable²⁹.

En comparant l'angle horaire de la Lune calculé à celui donné dans l'*Etat du ciel* pour Paris à la même heure locale, on peut en déduire la longitude du lieu d'observation.

Dans son mémoire sur les longitudes, La Caille prononce un véritable réquisitoire contre la méthode de l'angle horaire, prouvant par le calcul les sources d'erreur. Malgré les querelles ouvertes entre Le Monnier et La Caille, continuées par le père Pezenas³⁰ (1692 – 1776), le chanoine Pingré ne fut certes pas hermétique aux mises en garde de La Caille. Lors de son voyage aux îles Rodrigues et de France en 1761 en vue d'observer le transit de Vénus devant le Soleil, il ne cache pas sa détermination de tester plusieurs méthodes astronomiques pour calculer sa longitude³¹ :

²⁹(Delambre, 1827) p. 202

³⁰(Boistel, 2000)

³¹(Pingré,)

" J'entends donc ici, par la méthode de M. L'abbé de la Caille, celle de conclure la longitude en mer par l'observation des distances de la lune soit au soleil aux étoiles fixes, et je l'appelle ainsi, non que je prétende que ce célèbre astronome en ait été l'inventeur, mais parce qu'il l'avait adopté d'une manière tout à fait singulière, non seulement comme la meilleure de toute, mais comme l'unique qui pût réussir. M. l'abbé de la Caille avait alors plus d'expérience que moi, j'étais [...] dans la persuasion que cette méthode était [bien] la meilleure. En conséquence, je l'ai toujours suivie en allant aux Indes ; en revenant j'ai essayé celle des hauteurs de la lune et des angles horaires, telle que je l'ai exposé dans l'Etat du ciel des années 1755 et 1756, et je mettrai le public en état de juger du succès de ces deux méthodes. "

On voit ainsi se profiler la postérité de la méthode développée par La Caille. Elle le sera d'autant plus que Nevil Maskelyne (1732–1811), futur astronome royal (1765), utilisa cette méthode, ainsi que les premières tables de Mayer, lors de son séjour sur l'île de Saint-Hélène en 1761 en vue d'y observer (lui aussi) le transit de Vénus.

Cette méthode, la seule avérée jusque maintenant pour le calcul des longitudes en mer, ne peut cependant pas s'affranchir de montres fiables. C'est bien entendu également vrai pour la détermination des longitudes à terre.

3.4 L'horloge, la Lune et le *Board*

3.4.1 Une mécanique difficile à maîtriser

Les horloges utilisées en cette moitié de 18^{ème} siècle sont l'héritage des inventions de Huygens. La régularité de leur mouvement n'est pas encore entièrement maîtrisée et varie d'une horloge à l'autre. Avant toute observation astronomique de position, il convient donc de connaître parfaitement la marche de l'horloge utilisée, son avance ou son retard journalier. On observe généralement pendant plusieurs jours consécutifs les levers et couchers du Soleil consignés dans des tables, que l'on compare à l'heure indiquée sur la montre. D'Après de Manneville, dans le journal de bord³² de son voyage à l'île Bourbon en 1740, corrige le temps vrai de l'immersion du premier satellite de Jupiter de la valeur moyenne de l'avance de la montre utilisée (ici 3 minutes, voir Figure 3.3).

Notons que ce protocole ne peut être appliqué que dans le cadre d'observations faites à terre. D'où vient le manque de régularité ? La solution du mouvement " perpétuel " se heurte d'une part aux problèmes liés aux frottements mutuels des rouages qui progressivement ralentissent le mécanisme global, et d'autre part à l'alternative qui consiste à utiliser des huiles lubrifiantes pour diminuer l'action de ces frottements. En effet, les lubrifiants

³²(Monnier, 1742) p. 347-348

Au matin.	inférieur du Soleil.	Au soir.
10 ^h 18' 30"	46 ^d 56'	1 ^h 48' 40"
11 13 0	53 25	0 53 30
« Par la première observation & la correspondante, la		
Montre auroit marqué à midi		12 ^h 3' 35"
Et par la seconde		12 ^h 3' 15"
En prenant un milieu, il s'ensuit que la Montre avançoit «		
de		0 ^h 3' 25"
Le 17 au soir j'observai le vrai coucher du Soleil qui Le coucher		
devoit arriver à		5 ^h 39' 28" <small>apparent a dû arriver à 5^h 41'</small>
La Montre marquoit alors		5 ^h 42' 0" <small>37"</small>
& par conséquent avançoit de		0 ^h 2' 32"
Le 18 au matin j'observai l'instant de l'Immersion du 1. ^{er} «		
Satellite de Jupiter, lorsque ma Montre marquoit 4 ^h 41' 0"		
Le vrai lever du Soleil qui a suivi immédiatement cette «		
observation, & qui devoit arriver à		6 ^h 20' 20"
fut observé, la Montre marquant		6 ^h 23' 30"
ce qui fait voir qu'elle avançoit alors de		0 ^h 3' 10"
C'est pourquoi il semble qu'on pourroit soustraire 3 minutes, «		
de l'heure de l'observation, pour en déduire le temps vrai de «		
l'Immersion à		4 ^h 38' 0"

FIG. 3.3 – Extrait du journal de bord de D'Après de Mannevillette mentionnant les corrections à apporter au calcul de l'heure d'immersion du premier satellite de Jupiter à l'aide d'une montre marine

utilisés se fluidifient ou s'épaississent selon que les températures montent ou descendent, les horloges allant plus vite ou plus lentement, voire s'arrêtent complètement. Un premier horloger anglais, John Harrison, propose dès ses débuts une alternative judicieuse, à savoir l'utilisation de rouages en bois qui sécrètent leur propre huile. Les balanciers sont eux aussi soumis aux actions de la température qui les font se dilater ou se contracter. C'est à nouveau Harrison qui proposera des solutions techniques permettant de contrecarrer ces phénomènes dès les années 1730.

À bord d'un navire, les conditions climatiques évoluent très rapidement et l'influence du roulis sur les balanciers n'est toujours pas résolue. Rappelons qu'en Angleterre, nous sommes toujours dans la compétition lancée par le *Longitude Act* en 1714. Devant les récompenses proposées par le *Board*, le clan Harrison décide de se mettre en quête d'une solution au problème

de la détermination des longitudes en mer qu'il espère résoudre grâce à ses compétences d'horloger. J. Harrison construira au total cinq horloges chacune s'adaptant de manière plus précise aux différentes contraintes de la navigation en mer.

3.4.2 Une âpre compétition s'engage outre-Manche

Le décret de 1714 prévoit deux conditions à l'obtention du prix proposé. D'abord, le procédé devait subir une épreuve concluante au cours d'un voyage aux Indes. Puis il fallait s'assurer de sa praticabilité en mer. Ce qu'il faut comprendre par ces deux conditions, c'est que le procédé doit être reproductible et généralisable. Nous verrons que dans la course au prix des longitudes, ces deux aspects seront particulièrement étudiés, surtout lorsqu'un des postulants fait lui-même partie du *Board*.

Après quelques tentatives avortées, le clan Harrison, confiant dans sa nouvelle horloge, obtient enfin³³ le test prévu par l'*Act*. Le 18 novembre 1761, William Harrison s'embarque à bord du *HMS Depford* avec H-4³⁴ pour un voyage en Jamaïque. Le 26 mars 1762, H-4 était de retour en Angleterre, et sa variation totale était de moins de deux minutes. Malheureusement, le *Board* (dont Bradley était membre d'office) n'accorda pas le prix à Harrison, sans doute trop heureux de constater que les résultats obtenus par Maskelyne sur l'utilisation des tables de Mayer pour calculer des distances lunaires étaient très satisfaisants. Peu de temps après son retour de Saint-Hélène, Maskelyne publie ses résultats accompagnés d'un exposé didactique du procédé (pour justifier la reproductibilité) sous le titre *The British Mariner's Guide*. Les raisons de la décision du *Board* sont obscures. Il exige une preuve supplémentaire pour s'assurer de la stabilité de la machine, et de plus, a requis de Harrison qu'il expose ses secrets de fabrication devant des experts. Il semble que nous sommes loin de l'égalité rhétorique des méthodes du texte de Halley. Ce sont deux mondes qui s'affrontent maintenant, celui des savants, et celui des ingénieurs horlogers.

Un deuxième voyage de probation est entrepris en 1764. W. Harrison s'embarque avec H-4 pour la Barbade. Après 156 jours de mer, la montre a retardé de 15 secondes. Pendant le voyage, elle permet de rectifier le point et d'atterrir avec plus de précision qu'avec une simple estimation de la position. Après vérifications, il était évident que la montre avait respecté l'heure avec une précision suffisante (trois fois celle prévue par le *Longitude Act*). Le second essai concluant de H-4 en 1764 ne lui accorde toujours pas le privilège de la récompense. Beaucoup plus décevant pour Harrison, les règles du jeu changent dès l'accession de Maskelyne au titre d'astronome royal en janvier 1765. Il fallait maintenant, pour recevoir la moitié de la somme prévue initialement, que John Harrison dévoile tous ses secrets de fabrication et

³³(Sobel, 2001) p.124-130

³⁴quatrième horloge construite par J. Harrison

abandonne tous ses prototypes à l'astronome royal. Sans entrer dans les détails d'une querelle qui peut paraître personnelle, Harrison céda une partie de son savoir-faire en 1767 et perçut la somme promise. Après des démêlés avec Maskelyne, le complément de la somme lui sera versé en 1772 sur intervention du Roi.

Dans le même temps, l'astronome royal propose la publication d'un éphéméride nautique (Figure 3.4) dont les tables seraient construites suivant le modèle indiqué par La Caille (Figure 3.2). En 1766, il publie *The Nautical Almanac and Astronomical Ephemeris* pour l'année 1767. Ces éphémérides seront publiés annuellement, les distances lunaires (les heures) étant calculées par rapport au méridien de Greenwich.

[118] OCTOBER 1772.					
Distances of J's Center from ☉, and from Stars west of her.					
Days	Stars Names.	Noon.	3 Hours.	6 Hours.	9 Hours.
		D. M. S.	D. M. S.	D. M. S.	D. M. S.
1		62. 6. 55	63. 44. 49	65. 22. 18	66. 59. 22
2		74. 58. 25	76. 32. 59	78. 7. 10	79. 40. 56
3	The Sun.	87. 24. 0	88. 55. 28	90. 26. 35	91. 57. 21
4		99. 26. 2	100. 54. 47	102. 23. 14	103. 51. 23
5		111. 7. 52	112. 34. 22	114. 0. 37	115. 26. 38
3		33. 0. 51	34. 36. 17	36. 11. 37	37. 46. 49
4	Antares.	45. 40. 30	47. 14. 40	48. 48. 38	50. 22. 24
5		58. 8. 6	59. 40. 36	61. 12. 55	62. 45. 2
6		70. 22. 45			
6		15. 30. 17	17. 2. 20	18. 34. 12	20. 5. 52

FIG. 3.4 – Table des distances lunaires extraites du *The Nautical Almanac and Astronomical Ephemeris for the year 1772*

À titre de remarque³⁵, il est intéressant de constater que le problème initial des longitudes a trouvé une solution à travers le triplet européen France, Angleterre et Allemagne (Figure 3.5). Les relations entre les différents observatoires sont nécessaires. D'abord, une longitude se calcule (par les éclipses) par comparaison des observations relatives au même phénomène céleste. Il faut donc s'accorder sur les stratégies d'observation. C'est aussi vrai pour le calcul de la parallaxe lunaire, mais aussi pour l'observation du passage de Vénus devant le disque

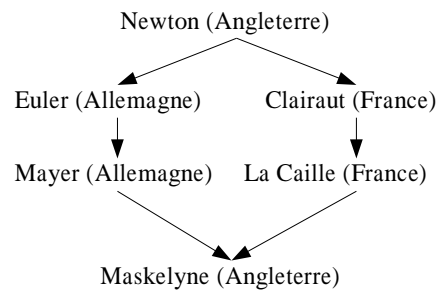


FIG. 3.5 – Influence mutuelle des scientifiques européens

³⁵cette remarque pourrait constituer à elle seule un sujet d'étude

solaire en 1761 et 1768 qui a permis de calculer la distance Terre-Soleil. C'est donc une coopération "forcée" qui évolue non seulement dans le domaine des observations mais aussi dans celui des développements théoriques. Les prix proposés par les académies sont ouverts au-delà de la nation, Mayer recevra une gratification du *Board* pour ses tables, Clairaut réclamera une partie de la somme proposée par le *Longitude Act* etc.

L'Angleterre et la France seront les pays les plus engagés dans la résolution pratique du problème, mais nous allons voir qu'il n'y a pas de réelle concurrence entre les méthodes astronomiques et des garde-temps en France.

3.5 Vers une complémentarité méthodologique

Si les recherches en horlogerie ont largement été initiées en Angleterre, la France n'est pas en reste. L'horlogerie de marine française voit le jour dans un contexte de rivalité entre Ferdinand Berthoud (1727 – 1807) et Pierre Le Roy (1717 – 1785). Cette situation n'est pas l'apanage de la France, tant les enjeux commerciaux sont vitaux pour des horlogers qui ont voué leur existence à la mise au point des montres marines. Berthoud et Le Roy sont tous deux artisans du succès des horloges marines de ce côté-ci de la Manche et ils ont commencé leurs recherches respectives la même année, en 1754. Les solutions techniques apportées par ces deux horlogers à la non stabilité d'un bateau soumis aux aléas de la mer seront assez proches de celles proposées par Harrison. À cette époque, les essais en mer des montres de l'horloger anglais ont déjà commencé, et l'Angleterre a pris une telle avance dans la course à la longitude et dans la fabrication d'instruments nautiques qu'il devient urgent de tester les montres françaises au cours de longs voyages. Les montres ne doivent pas varier de plus de 2,5 secondes par jour suivant les limites fixées par l'Académie. Il est précisé que cette variation doit être uniforme au cours du voyage. Le voyage décisif est celui réalisé par Fleurieu sur l'Isis en embarquant deux montres de Le Roy, ainsi que les montres n°6 et n°8 de Berthoud, du 8 décembre 1768 au 21 novembre 1769. Les résultats sont bons, et Fleurieu est très élogieux vis à vis de Berthoud³⁶. De nouveaux tests sont organisés peu de temps après dans le cadre du prix proposé par l'Académie des sciences en 1763 sur la meilleure manière de mesurer le temps en mer. Une expédition³⁷ dont " l'objet [ne devait être] que des opérations relatives à

³⁶(Fleurieu, 1773)

³⁷Jusqu'à maintenant, les voyages de qualification avaient une dimension scientifique non négligeable, mais n'étaient pas destinés en priorité à l'exploration scientifique. On a vu que la Royal Society exigeait des officiers de marine des relevés des vents, des courants, de la déclinaison magnétique, d'observations astronomiques... dès leur retour en Angleterre. Certains marins français étaient correspondants de l'Académie des sciences. Mais les grandes expéditions dont le but est explicitement scientifique (exploration géographique, cartographique, test de méthodes...) prennent officiellement la mer. Parti de France en 1766, revenu en mars 1769, le voyage commandé par Bougainville est un des plus

SOMME des Erreurs absolues que les Horloges marines auroient données aux retours dans un même port; en supposant que leur mouvement n'eût pas été progressif; & qu'on n'eût pas pu calculer d'après des mouvemens moyens.

ÉPOQUES DES VÉRIFICATIONS.	DURÉE des PÉRIODES.	SOMME	SOMME
		des ERREURS du N.º 8.	des ERREURS du N.º 6.
		<i>D. M.</i>	<i>D. M.</i>
XII. ^e VÉRIFICATION, { Du 27 Mars, à <i>Sainte-Croix</i> , au page 169..... } 18 Août, dans le même port....	après 144 jours	0. 42 $\frac{1}{2}$	0. 39 $\frac{1}{2}$
XIII. ^e VÉRIFICATION, { Du 4 Mars, à <i>Cadix</i> , au 4 Octobre, page 177..... } dans le même port.....	après 214 jours	0. 36 $\frac{1}{2}$	1. 24 $\frac{1}{2}$
XIV. ^e VÉRIFICATION, { Du 18 Janvier, à <i>l'île d'Aix</i> , au page 188..... } 1. ^{er} Novembre dans le même port	après 287 jours	0. 45 $\frac{1}{2}$	1. 40 $\frac{1}{2}$

FIG. 3.6 – Tableau rassemblant les erreurs des montres n°6 et n°8 de Berthoud lors de l'essai sur l'Isis

la perfection de la navigation et spécialement l'examen et la vérification des moyens propres à la détermination des longitudes en mer ³⁸ prend le large de Brest le 29 octobre 1771³⁹ à bord de la frégate *La Flore* commandée par Verdun de la Crenne. Aidé du Chevalier de Borda et de l'astronome Pingré, tous trois furent chargés de " l'épreuve des horloges marines et de tous les instruments proposés jusqu'alors pour la détermination des longitudes en mer [...] et de faire une comparaison raisonnée des avantages et des inconvénients de toutes les méthodes, de faire un examen des méthodes pratiques qui ont été employées jusqu'à présent par les navigateurs ".

Outre le sextant anglais et l'octant, *La Flore* emporte à son bord cinq montres marines : trois chronomètres de Le Roy, la montre n°8 de Berthoud, son grand concurrent, et la dernière d'Arfandaux, et un pendule marine. Au terme de ce voyage, les montres de Berthoud et de Le Roy avancent ou retardent en moyenne de 1 à 2 secondes par jour. La n°8 donna des longitudes à $\frac{1}{4}$ de degrés pendant 6 semaines, et $\frac{1}{3}$ de degrés au-delà. À performances techniques équivalentes, ce sont les montres de Berthoud qui équiperont la marine française, notamment grâce à l'appui marqué de Fleurieu et une

célèbres, ne serait-ce que pas l'escale tahitienne. Aux trois voyages de Cook (1768 – 1771 , 1772 – 1775, 1776 – 1780) répond l'expédition qui part de France en 1785 et commandée par La Pérouse. Sa disparition en 1788 entraîna l'envoi en 1791 d'une expédition lancée à sa recherche commandée par d'Entrecasteaux.

³⁸(Borda et al., 1773) p. 159

³⁹et reviendra le 10 octobre 1772

capacité de production supérieure à celle de ses concurrents.

Leurs conclusions sont de trois ordres :

- i. le calcul des longitudes grâce aux montres marines est beaucoup plus facile qu'avec d'autres méthodes. Il convient d'en emporter deux pour pallier à une panne mécanique. Cette éventualité ne permet à la méthode des chronomètres que de combler le manque d'information acquise à partir de l'astronomie.
- ii. Ces montres doivent être vérifiées le plus souvent possible lors de relâches dans des ports de longitude connue, ou facilement déterminable par l'observation d'éclipses de Lune ou de satellites de Jupiter.
- iii. La méthode des distances lunaires est moins précise que celle des chronomètres (1 minute d'erreur sur la position de la Lune équivaut à 0.5 degré de longitude), mais plus fiable.

Le réel intérêt des premières montres marines consiste à améliorer la cartographie des côtes et permet un levé sous voile très rapide (Figure 3.7). Nous n'entrerons pas dans les détails des nouvelles méthodes d'hydrographie qui permettront à Beautemps-Beaupré de renouveler entièrement les cartes nautiques.

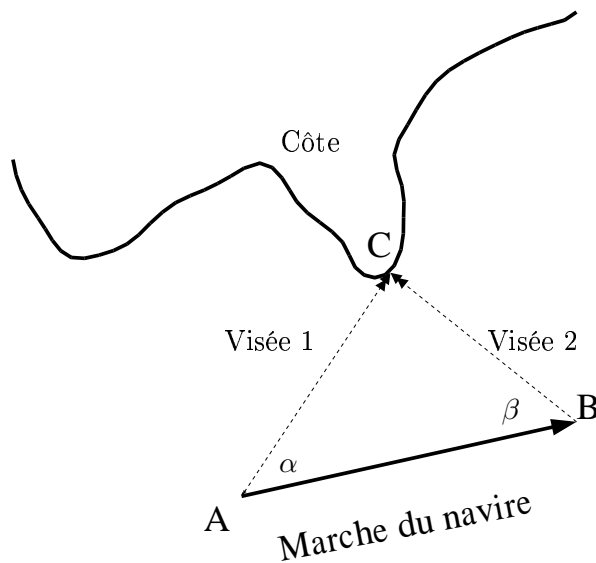


FIG. 3.7 – Illustration d'un levé sous voile. Initialement en A, le navire relève le gisement du point C (α) et la position géographique de A. Une fois en B, il relève à nouveau le gisement du point C (β) ainsi que les coordonnées de B. Les relations dans le triangle ABC fournissent les coordonnées du point C.

Ces conclusions annoncent l'esprit de certaines futures navigations, mais

pas de toutes. Nous l'avons vu, le calcul d'une longitude à partir d'observations astronomiques n'a rien d'évident. Il n'est certes pas nécessaire de connaître la solution de Clairaut ou d'Euler au problème à trois copras, mais il faut cependant savoir comment utiliser les tables, prendre des hauteurs, faire les calculs et enfin comment reporter le point sur la carte. Un arsenal mathématique est donc requis (essentiellement de géométrie et de trigonométrie). Cet enseignement est loin d'être proposé aux futurs marins (militaires ou marchands) ! Sans un minimum de théorie, il est impossible pour un pilote de faire le point en utilisant les méthodes "modernes" de l'astronomie.

Il semble donc qu'à la fin du 18^{ème} siècle, le problème des longitudes ne soit pas résolu pour **tout** le monde. La méthode des distances lunaires, à peine fiabilisée, sera en fait peu utilisée pratiquement. À l'heure où les chronomètres de marine sont inabordables pour le commun des navigateurs, et où la somme des éphémérides nautiques restent un luxe que seuls les navires militaires peuvent se permettre, l'estime confirme sa pertinence et les marins leur conservatisme.

Conclusion

Cette introduction à l'histoire des longitudes vise à donner une vision "globale" de ce que fut le *problème* du positionnement est-ouest des navires, aussi bien dans ses aspects pratiques que dans ses aspects théoriques. Elle s'étend sur de nombreux siècles, de l'instant où l'on s'est posé la question des longitudes (et des latitudes) à l'obtention d'une solution effective, dont les développements théoriques ont été les plus importants au 18^{ème} siècle. Nous nous sommes arrêtés en 1773 car cette date correspond au voyage de La Flore, voyage qui a validé à la fois la méthode des distances lunaires et celles des garde-temps. Cette histoire est jalonnée d'évènements charnières qui ont contraint son évolution vers l'issue que l'on connaît. Certains acteurs y ont tenu un rôle particulièrement actif. Il s'agit d'abord du **Portugal** au 15^{ème} siècle pour des raisons politico-économiques clairement déterminées. A cette époque, parmi les candidats potentiels à l'aventure hauturière, la France et l'Angleterre sortent de la guerre de Cent Ans. La France pense à sa reconstruction politique, l'Angleterre est à la veille de la guerre des Deux Roses et l'Espagne est en pleine Reconquista. Le Portugal, de son côté, est à l'écart des marchés méditerranéens, il le sera d'autant plus après la chute de Constantinople en 1453 et la fermeture définitive des marchés orientaux. Il se doit de renforcer sa politique africaine. Le prince Henri le Navigateur, qui a clairement examiné les conditions historiques et géographiques de son pays, arrête un programme d'action en demandant son aide au savoir. La science coopère avec la politique. Rappelons-le, les Portugais vont très rapidement s'éloigner des côtes nord-africaines. Les techniques navales s'améliorent (latitudes, navires à voiles carrées, gouvernail fixe, l'aiguille de la boussole fixée sur un pivot...). Puis il y a, dans la foulée, l'arrivée et le départ de Christophe Colomb.

Cette rencontre entre les intérêts politiques et la science souligne le rôle des **institutions**, le second acteur de cette histoire. Une de ses premières prérogatives fut sans doute d'assurer le retour des richesses provenant du Nouveau Monde, il fallait aussi satisfaire l'esprit entreprenant des états coloniaux et leur fournir des découvertes fructueuses. Les institutions, de manière trop évidente, furent incitées à soutenir ces projets et ces découvertes à la lumière de leur succès politiques et économiques, loin devant le souci de sauvegarder les équipages.

Revenons maintenant aux trois acteurs principaux de cette histoire, à savoir le navigateur, le savant (astronome/mathématicien) et l'inventeur (horloger). Pour le **marin**, le praticien de la navigation, la question des longitudes pouvait rester ouverte. Piloter un navire nécessite essentiellement de la pratique. Le but que l'on confiait à un capitaine était d'arriver à bon port, quelque méthode qu'il utilisât pour y parvenir. Il se trouve que l'expérience des vents, des courants, de la météorologie, de l'estime fonctionnait à peu près bien. On pourrait ajouter qu'à la base, le marin n'est pas un scientifique, il ne pouvait trouver seul une solution exacte. Celles proposées le furent en partie par des non-marins (les cartographes d'Henri le Navigateur, Galilée, Huygens, Frisius, Harrison...). Cependant, on se rend très rapidement compte que l'astronomie pourrait aider considérablement. Là, l'expérience ne suffit plus. C'est ici que le **savant** se joint à l'histoire des longitudes. L'astronomie touche au cosmos qui est du domaine des astronomes et des mathématiciens. Le savant s'empare alors du problème qui soudainement devient complexe. La navigation devient une activité dans laquelle l'astronomie et les mathématiques trouvent une réalisation immédiate. A la question à quoi sert l'astronomie? on peut répondre : à se positionner sur Terre. Parallèlement, un *système du Monde* mécaniquement cohérent va peu à peu prendre forme. Une centaine d'années après la première édition des *Principia* de Newton, la théorie de la gravitation est confirmée indirectement par la méthode des distances lunaires.

Si l'astronomie fournit des solutions, on a résolu le problème sans réellement penser à son applicabilité : le champ scientifique ouvert par ces résultats reste imperméable au plus grand nombre. C'est justement ici que l'**inventeur**, l'horloger, prend place. On réalise dès les premiers modèles que les chronomètres prendront le dessus. Quoi de plus facile que de lire l'heure et de faire une soustraction! Si le manque de régularité des horloges en est le plus flagrant défaut, il est en passe d'être résolu au moment où les difficultés théoriques du mouvement de la Lune le sont aussi.

Il semble, pour finir, que l'histoire scientifique et pratique des longitudes sur mer fut menée par la technique. Cette rencontre entre la science et les hommes de mer est une des plus intéressantes qui soient, puisqu'elle a mené à la maîtrise de l'espace, à défaut de celle du temps.

Bibliographie

- (1667). Directions for observations and experiments to be made by masters of ships, pilots and other fit persons in the sea-voyages. In *Philosophical Transactions*, pages 433–448. Imprimerie royale.
- (1733). Sur une nouvelle méthode pour les longitudes. In *Histoire de l'Académie royale des sciences. Année 1733 Avec les mémoires de mathématiques et de physique de la même année. Tirée des registres de notre Académie*. Imprimerie royale.
- (1743). Horloge d'une demi-minute pour l'opération de lok. In *Histoire de l'Académie royale des sciences. Année 1743 Avec les mémoires de mathématiques et de physique de la même année. Tirée des registres de notre Académie*, pages 172–174. Imprimerie royale.
- (1987). *Jean Picard et les débuts de l'astronomie de précision au 17^{ème} siècle*. Cnrs edition.
- (2002). *Encyclopedia Universalis*.
- Arago, M. (1902). *Essai d'une méthode de calcul commune aux distances lunaires et aux occultations*. extrait des Annales hydrographiques, Paris, imprimerie nationale edition.
- Bernoulli, J. (1773). Mémoire sur la comparaison de quelques observations anciennes de la Lune avec les tables de Mayer. In *Académie royale des sciences et des belles lettres de Berlin*, pages 177–188.
- Bernoulli, J. (1789). Le calcul de longitudes par les éclipses de soleil et les occultations d'étoiles simplifié au moyen de nouvelles tables. In *Académie royale des sciences et des belles lettres de Berlin*, pages 290–303.
- Bònoli, F. and Braccési, A. (1996). Les recherches astronomiques de giovanni domenico cassini à Bologne. In *Astronomes et observatoires du sud de la France*, pages 101–127, Nice. 121^{ème} congrès international des sociétés historiques et scientifiques, P. Brouzeng and S. Débardat.
- Boistel, G. (2000). Les longitudes en mer au 18^{ème} siècle sous le regard critique du père pezenas. In de Rennes, P. U., editor, *Le calcul des longitudes, un enjeu pour les mathématiques, l'astronomie, la mesure du temps et la navigation*, pages 101–121. V. Julien.

- Boistel, G. (2001). *L'astronomie nautique au 18^{ème} siècle en France : tables de la Lune et longitudes en mer*. L'atelier national de reproduction des thèses. thèse de doctorat.
- Borda, Pingré, and Verdun (1773). Opérations faites tant à bord de la frégate du Roi La Flore qu'en différens ports ou rades d'Europe et d'Amérique ; pour la vérification des instruments et des méthodes relatives à la détermination des longitudes sur mer et à d'autres objets concernant la navigation. In *Histoire de l'Académie royale des sciences. Année 1773 publié en 1777. Avec les mémoires de mathématiques et de physique de la même année. Tirée des registres de notre Académie*, pages 258–322. Imprimerie royale.
- Bouguer, P. (1747). Sur une nouvelle construction de loch, avec des remarques sur l'usage des autres instrumens qui peuvent servir à mesurer le sillage des vaisseaux. In *Histoire de l'Académie royale des sciences. Année 1747. Avec les mémoires de mathématiques et de physique de la même année. Tirée des registres de notre Académie*, pages 644–665. Imprimerie royale.
- Bouguer, P. (1792). *Nouveau traité de navigation, contenant la théorie et la pratique du pilotage*. Guérin-Delatour, 1753, Paris.
- Bourdon, P. (2002). *La navigation astronomique, Fondements, applications, perspectives*. Institut océanographique edition.
- Buffon (1745). Du système du monde dans les principes de la gravitation universelle. In *Histoire de l'Académie royale des sciences. Année 1745 Avec les mémoires de mathématiques et de physique de la même année. Tirée des registres de notre Académie*, pages 493–500. Imprimerie royale.
- Cassini, D. (1705a). Sur une nouvelle méthode pour les longitudes. In *Histoire de l'Académie royale des sciences. Année 1705 Avec les mémoires de mathématiques et de physique de la même année. Tirée des registres de notre Académie*, pages 122–125. Imprimerie royale.
- Cassini, D. (1729). Voyage au Cap Verd en Afrique et aux isles de l'Amérique. In *Histoire de l'Académie royale des sciences. Année 1729. Tome VII Avec les mémoires de mathématiques et de physique de la même année. Tirée des registres de notre Académie*, pages 432–435. Imprimerie royale.
- Cassini, D. (1730). Observations sur la longitude et la latitude de Marseille. In *Histoire de l'Académie royale des sciences. Année 1692 publié en 1730. Tome X Avec les mémoires de mathématiques et de physique de la même année. Tirée des registres de notre Académie*, pages 56–64. Imprimerie royale.
- Cassini, J. (1705b). Méthode pour déterminer les longitudes de lieux de la Terre pour les éclipses des étoiles fixes et des planètes par la Lune, pratiquée en diverses observations. In *Histoire de l'Académie royale des sciences. Année 1705 Avec les mémoires de mathématiques et de*

- physique de la même année. Tirée des registres de notre Académie*, pages 194–210. Imprimerie royale.
- Cassini, J. (1722). Sur la recherche des longitudes en mer. In *Histoire de l'Académie royale des sciences. Année 1722. Avec les mémoires de mathématiques et de physique de la même année. Tirée des registres de notre Académie*. Imprimerie royale.
- Chapuis, O. (1999). *À la mer comme au ciel, Beautemps-Beaupré et la naissance de l'hydrographie moderne (1700-1850)*. Presse de l'Université Paris Sorbonne.
- Chareix, F. (2000). Vaincre la houle : les horloges marines de Christian Huygens. In de Rennes, P. U., editor, *Le calcul des longitudes, un enjeu pour les mathématiques, l'astronomie, la mesure du temps et la navigation*, pages 169–202. V. Julien.
- Clairaut, A. (1743). De l'orbite de la Lune dans le système newtonien. In *Histoire de l'Académie royale des sciences. Année 1743 Avec les mémoires de mathématiques et de physique de la même année. Tirée des registres de notre Académie*, pages 17–32. Imprimerie royale.
- Clairaut, A. (1745). Du système du monde dans les principes de la gravitation universelle. In *Histoire de l'Académie royale des sciences. Année 1745 Avec les mémoires de mathématiques et de physique de la même année. Tirée des registres de notre Académie*, pages 329–364. Imprimerie royale.
- Clairaut, A. (1752). Théorie de la lune déduite du seul principe de l'attraction réciproquement proportionnelle aux carrés des distances. In *Académie des sciences de Berlin*.
- Clairaut, A. (1756a). Construction de tables de la parallaxe horizontale de la lune. In *Histoire de l'Académie royale des sciences. Année 1752. Avec les mémoires de mathématiques et de physique de la même année. Tirée des registres de notre Académie*, pages 142–160. Imprimerie royale.
- Clairaut, A. (1756b). Construction de tables du mouvement horaire de la Lune. In *Histoire de l'Académie royale des sciences. Année 1752. Avec les mémoires de mathématiques et de physique de la même année. Tirée des registres de notre Académie*, pages 593–622. Imprimerie royale.
- Condamine, L. (1735). Manière de déterminer astronomiquement la différence en longitude de deux lieux peu éloignés l'un de l'autre. In *Histoire de l'Académie royale des sciences. Année 1735. Avec les mémoires de mathématiques et de physique de la même année. Tirée des registres de notre Académie*. Imprimerie royale.
- d'Alembert (1745). Méthode générale pour déterminer les orbites et les mouvements de toutes les planètes en ayant égard à leur action mutuelle. In *Histoire de l'Académie royale des sciences. Année 1745 Avec les mémoires de mathématiques et de physique de la même année. Tirée des registres de notre Académie*, pages 365–390. Imprimerie royale.

- d'Alembert, J. L. R. (2002). *Premiers textes de la mécanique céleste 1747-1749*. M. Chapront-Touzé et I. Passeron, Paris, cnrs edition.
- Débardat, S. and Dumont, S. (1997). Les débuts de la cartographie scientifique. L'apport des astronomes français. In *Bulletin de la classe de science de l'Académie royale de Belgique*, volume VIII, pages 271–303.
- de Barros e Vasconcellos, J. J. S. (1755). Nouvelles équations pour la perfection de la théorie des satellites de Jupiter et pour la correction des longitudes terrestres déterminées par les observations des mêmes satellites. In *Académie royale des sciences et des belles lettres de Berlin*, pages 362–385.
- de Bonnot, J., editor (2003). *Nauffrage de la frégate la Méduse*.
- de Thury, C. (1749). Mémoire, dans lequel on examine, si l'on peut espérer la même précision dans la détermination des longitudes des observations des occultations des étoiles fixes par la Lune, ou des distances de cette planète aux étoiles fixes, que des éclipses des satellites de Jupiter. In *Académie royale des sciences et des belles lettres de Berlin*, pages 358–369.
- Defossez, L. (1946). *Les savants du 17^{ème} siècle et la mesure du temps*. Paris, o. zeluck edition.
- Delambre, M. (1827). *Histoire de l'astronomie au 18^{ème} siècle*. Paris.
- Despoix, P. (2000). Distance lunaires et montres marines : un transfert européen. In de Rennes, P. U., editor, *Le calcul des longitudes, un enjeu pour les mathématiques, l'astronomie, la mesure du temps et la navigation*, pages 83–100. V. Julien.
- d'Hollander, R. (1999). *L'Astrolabe : Histoire, théorie, pratique*. Institut océanographique edition.
- d'Hollander, R. (2003). *Sciences géographiques dans l'Antiquité. Connaissance du Monde. Conception de l'univers*. Association Française de Topographie - IGN.
- Dénuce, J. (1911). *Magellan. La question des Moluques et la première circumnavigation du globe*. Bruxelles.
- Drouin, J. M. (2003). Les grands voyages scientifiques au siècle des Lumières. conférence à l'universidad de verano de Adeje. disponible sur <http://humboldt.mpiwg-berlin.mpg.de/10.drouin.pdf>.
- Euler, J. A. (1766). Réflexions sur la variation de la Lune. In *Académie royale des sciences et des belles lettres de Berlin*, pages 334–343.
- Euler, L. (1746). Mémoire sur la plus grande équation des planètes. In *Académie royale des sciences et des belles lettres de Berlin*, pages 225–240.

- Euler, L. (1747a). Méthode pour déterminer la longitude de lieux par l'observation d'occultation des étoiles fixes par la Lune. In *Académie royale des sciences et des belles lettres de Berlin*, pages 178–183.
- Euler, L. (1747b). Recherches sur le mouvement des corps célestes en général. In *Académie royale des sciences et des belles lettres de Berlin*, pages 93–101.
- Euler, L. (1753). Considérations sur le problème à trois corps. In *Académie royale des sciences et des belles lettres de Berlin*, volume XIX, pages 194–220.
- Euler, L. (1757). Recherches sur la déclinaison de l'aiguille aimantée. In *Académie royale des sciences et des belles lettres de Berlin*, pages 175–251.
- Euler, L. (1763a). Nouvelle manière de comparer les observations de la Lune. In *Académie royale des sciences et des belles lettres de Berlin*, pages 221–230.
- Euler, L. (1763b). Réflexions sur les diverse manières dont on peut représenter le mouvement de la Lune. In *Académie royale des sciences et des belles lettres de Berlin*, pages 180–193.
- Fleurieu, E. (1773). Voyage fait par ordre du roi en 1768 et 1769 à différentes parties du monde, pour éprouver en mer les horloges marines inventées par M. Ferdinand Berthoud. tome 1. disponible sur <http://humboldt.mpiwg-berlin.mpg.de/>.
- Fontenelle, B. (1686). *Entretiens sur la pluralité des mondes*.
- Fontenelle, B. (1752). *Théorie des tourbillons cartésiens avec des réflexions sur l'attraction*. Guérin.
- Frisius, G. (1530). *Les Principes de la cosmographie*.
- Frisius, G. (1553). *La cosmographie de Pierre Apian*.
- Froeschle, M. (1996). Un astronome marseillais en voyage : le père Louis Feuillée dans les mers du sud de 1707 à 1711. In *Astronomes et observatoires du sud de la France*, pages 243–258.
- Gilet, A. (2000). *Une histoire du point en mer*. Belin, pour la science edition.
- Guichardin, F. G. F. (1999). *Histoire d'Italie de l'année 1492 à l'année 1532*.
- Guyot, E. (1955). *Histoire de la détermination des longitudes*. Chambre Suisse de l'horlogerie.
- Hadley (1731). The description of a new instrument for taking angles. In *Philosophical Transactions giving some account of the present undertakings, studies and labours of the ingenious in many considerable parts of the world*, volume XXXVII, pages 147–157, London, 1733.
- Halley, E. (1683). A theory of the variation of the magnetical compass by the most ingenious M. Edmund Halley. In *Philosophical Transactions*

- giving some account of the present undertakings, studies and labours of the ingenious in many considerable parts of the world*, volume XII, pages 208–221.
- Halley, E. (1731). A proposal of a method of finding the longitude at sea within a degree or twenty leagues. In *Philosophical Transactions giving some account of the present undertakings, studies and labours of the ingenious in many considerable parts of the world*, volume XXXVII, pages 185–195, London, 1733.
- Howes, D. (1980). *Greenwich Time and the discovery of longitude*. Oxford University Press.
- Hugo, V. (1876). *Les travailleurs de la mer*.
- Koyré, A. (2001). *Du monde clos à l'univers infini*. tel gallimard edition.
- LaCaille, A. L. N. (1751). Relation abrégée du voyage fait par ordre du roi au cap de Bonne-Espérance. In *Histoire de l'Académie royale des sciences. Année 1751 Avec les mémoires de mathématiques et de physique de la même année. Tirée des registres de notre Académie*, pages 519–536. Imprimerie royale.
- LaCaille, A. N. L. (1759). Mémoire sur l'observation des longitudes en mer par le moyen de la Lune. In *Histoire de l'Académie royale des sciences. Année 1759. Avec les mémoires de mathématiques et de physique de la même année. Tirée des registres de notre Académie*, pages 63–98. Imprimerie royale.
- LaCaille, A. N. L. (1761). Mémoire sur la parallaxe de la Lune. In *Histoire de l'Académie royale des sciences. Année 1761. Avec les mémoires de mathématiques et de physique de la même année. Tirée des registres de notre Académie*, pages 1–57. Imprimerie royale.
- Lambert, J. H. (1767). Solution générale et absolue du problème à trois corps moyennant de suites infinies. In *Académie royale des sciences et des belles lettres de Berlin*, pages 353–364.
- Langanone, J. (2000). *The mystery of Time, Humanity's quest for order and measure*. National geographic society edition.
- Lebon, E. (1899). *Histoire abrégée de l'astronomie*. BNF.
- Maupertuis (1732). Sur l'attraction newtonienne. In *Histoire de l'Académie royale des sciences. Année 1732. Avec les mémoires de mathématiques et de physique de la même année. Tirée des registres de notre Académie*, pages 112–117. Imprimerie royale.
- Meyer, J., Tarrade, J., and Rey-Goldzeiguer, A. (1991). *Histoire de la France coloniale*, volume I. Armand colin agora edition.
- Michéa, H. (1996). Le voyage à la mer du sud par Amédée Frézier : routines de navigation et longitudes corrigées (1711 – 1713). In *Astronomes et observatoires du sud de la France*, pages 271–278.

- Mollat, M. *Explorateurs du 13^{ème} au 16^{ème} siècle*.
- Mollat, M. *L'Europe et la mer*.
- Monnier, L. (1742). Sur la longitude de l'isle Bourbon. In *Histoire de l'Académie royale des sciences. Année 1742. Avec les mémoires de mathématiques et de physique de la même année. Tirée des registres de notre Académie*, pages 347–349. Imprimerie royale.
- Pelletier, M. (2001). *Les Cassini, l'aventure de la carte en France*. cths, comité des travaux edition.
- Petipas, G. (1991). *Le Sextant*. Edition du pen-duick, édition ouest france edition.
- Pickering, K. A. (1997). The navigational mysteries and fraudulent longitudes of christopher columbus. A Lecture given to the Society for the History of Discoveries and the Haklyut Society. disponible sur <http://www1.minn.net/keithp/cn.htm>.
- Pingré, A. *Voyage à Rodrigue (1761-1762)*.
- Ptolémée, C. *Géographie*.
- Radelet-Degrave, P. (1982). Les lignes magnétiques du 13^{ème} au milieu du 18^{ème} siècle. In *Cahiers d'histoire et de philosophie des sciences, nouvelle série*, volume I.
- Radelet-Degrave, P. (2000). Les mathématiques au secours d'une résolution magnétique de la longitude. In de Rennes, P. U., editor, *Le calcul des longitudes, un enjeu pour les mathématiques, l'astronomie, la mesure du temps et la navigation*, pages 203–234. V. Julien.
- Sobel, D. (2001). *Longitude*. Seuil edition.
- Trystram, F. (2001). *Le procès des étoiles*. Petite Bibliothèque Payot edition.
- Verdet, J. P. (1993). *Astronomie et Astrophysique*. Larousse edition.
- Westholm, G. (2000). *Hanseatic sites, routes and monuments. A traveller's guide to the past and present*. Council of europe cultural route edition.