Frédéric Bretar, dans le cadre de son de DEA en Epistémologie, Histoire des Sciences et des Techniques, a écrit et soutenu en 2004 un mémoire traitant **"l'histoire de la détermination des longitudes de Ptolémée à Borda : Développements théoriques et mise en pratique. Application à la navigation".** ***Ce document a paru particulièrement intéressant pour nos lecteurs férus d'histoire des sciences géographiques, et son auteur a bien voulu nous le présenter en trois publications successives, après "Des Longitudes et des Mers : la genèse de la navigation", "Le temps des premières longitudes" voici la troisième.***

Des Longitudes et des Mers : Science et Progrès (3/3)

Frédéric BRETAR

L'observation des satellites de Jupiter pour la détermination des longitudes sur un navire, on l'a vu, est d'une difficulté extrême à résoudre. Le marin, pour vaincre la myopie de ses instruments et les instabilités de son pont flottant, n'a d'autre choix que de se tourner vers la Lune. Nous sommes au siècle des Lumières. On réalise alors à quel point ce siècle plein d'espoirs et d'entrain est susceptible de faire avancer la science de la navigation. C'est à ce moment que le jeu savant se constitue alliant les minutieuses observations des astronomes et les élégants développements des mathématiciens, et que "la mouvante Lune brilla enfin pour les navigateurs du XVIII^e siècle comme une aiguille lumineuse sur le cadran céleste". Une solution astronomique, certes, mais certains hommes aux mains habiles, construiront cette machine tant désirée combinant les lois de la mécanique terrestre (le chronomètre), dont le perpetuum mobile des cliquetis métalliques sera le garant d'un temps universel.

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. 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 (article précédent). 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 XVIII^e 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 Hadley 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 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.

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 précieux, il décrit ce nouveau système du monde mû, selon Descartes, par des "tourbillons de matière subtile" :

"- 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) par 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 lire :

"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 réhabiliter 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 tables[1]. 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) :

"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 périodes relativement importantes 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 demeurait 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

(1) Il 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.

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 publique de la justesse de la théorie de la gravitation.

Les premières théories analytiques de la Lune

Les années 1740 voient les premières tentatives de solution globale pour le mouvement de la Lune. 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-Pétersbourg en 1751. Clairaut et D'Alembert, dans leurs écrits de l'époque, posent le principe de la résolution du système d'équations différentielles d'une manière itérative:

"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 sont 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'a 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'Euler qui les a précédés de quelques années, les deux mathématiciens français ne réalisent, au cours de l'années 1747, que la première itération en substituant une solution pseudo-keplérienne à la position réelle de la Lune dans le calcul des forces perturbatrices. Pour cette raison, ils n'obtiennent tous trois que la moitié environ du moyen mouvement observé des apsides[2] de la Lune, sans

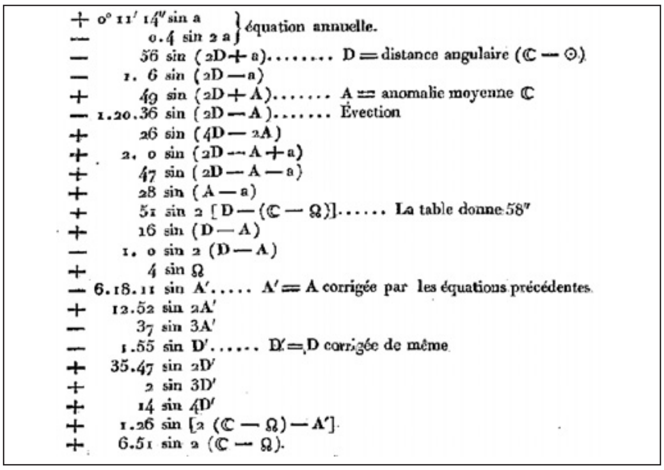

+ 0° 11′ 14″ sin a } équation annuelle.
− 0.4 sin 2 a }
− 56 sin (2D + a)........ D = distance angulaire (☾ − ⊙)
− 1. 6 sin (2D − a)
+ 49 sin (2D + A)....... A = anomalie moyenne ☾
− 1.20.36 sin (2D − A)....... Évection
+ 26 sin (4D − 2A)
+ 2. 0 sin (2D − A + a)
+ 47 sin (2D − A − a)
+ 28 sin (A − a)
+ 51 sin 2 [D − (☾ − ☊)]...... La table donne 58″
+ 16 sin (D − A)
− 1. 0 sin 2 (D − A)
+ 4 sin ☊
− 6.18.11 sin A′..... A′ = A corrigée par les équations précédentes.
+ 12.52 sin 2A′
− 37 sin 3A′
− 1.55 sin D′...... D′ = D corrigée de même
+ 35.47 sin 2D′
+ 2 sin 3D′
+ 14 sin 4D′
+ 1.26 sin [2 (☾ − ☊) − A′]
+ 6.51 sin 2 (☾ − ☊).

Figure 1: Aperçu des développements de Mayer pour l'établissement de ses tables.

soupçonner que les itérations suivantes puissent fournir, pour cette quantité, une contribution aussi importante que la première. Clairaut, Euler et d'Alembert, qui sont arrivés aux mêmes conclusions, deviennent sceptiques vis à vis de la loi d'attraction en $1/r^2$, en venant à proposer une autre loi s'y substituant[3]. La controverse entre Buffon, partisan d'une loi de gravitation écrite par un unique terme, et Clairaut alimente les débats de l'Académie. Les manuscrits de 1752 (Clairaut), 1753 (Euler) 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 Berlin:

"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'écartent pas de plus d'une minute des observations). Pour Euler, cette précision est largement suffisante lorsqu'il prend la défense des calculateurs:

"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

(2) Point extrême du grand axe de l'orbite d'un astre.
(3) En ajoutant des termes compensateurs en $1/r^4$

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). A 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 observations).

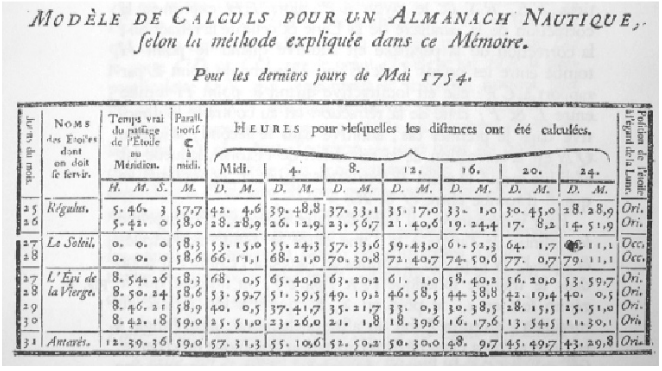
Les nouvelles tables obtiendront immédiatement une reconnaissance européenne, après leur vérification par Bradley de l'observatoire de Greenwich. Même si les recherches concernant le mouvement de la Lune se poursuivent activement, un nouveau pas vient d'être franchi, un pas décisif qui va enfin permettre le calcul des longitudes à bord d'un navire.

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 refondateur 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 insiste:
"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 moyen 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 Clairaut en 1750-1751, il intègrera rapidement les découvertes de ce dernier pour le calcul de la parallaxe lunaire (dans un mémoire présenté à l'Académie en 1761 à son retour du cap de Bonne-Espérance[4] (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 horizontale. 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 Mannevillette. 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

(4) Ce 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



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'Étoile au Méridien.	Parall. horiz. ☾ à midi.	Heures pour lesquelles les distances ont été calculées. Midi.	4.	8.	12.	16.	20.	24.	Position de l'étoile à l'égard de la Lune.
		H. M. S.	M.	D. M.	D. M.	D. M.	D. M.	D. M.	D. M.	D. M.	
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	[illegible] 11,1	Occ.
28		0. 0. 0	58,6	66. 11,1	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.

Figure 2 : Proposition de tables astronomiques pour le calcul des longitudes par la méthode des distances lunaires - La Caille 1759

essais auprès de quelques officiers sont concluants (à ses dires) pourvu qu'une partie des calculs soit déjà effectuée. La méthode de La Caille suppose en effet l'existence d'un almanach nautique regroupant, pour les étoiles les plus brillantes du zodiaque comme _ de Pégase, _ et _ du Taureau, _, _ et _ 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."

L'officier en charge de la navigation procèdera 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 rasé 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:** A 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 négligeable.

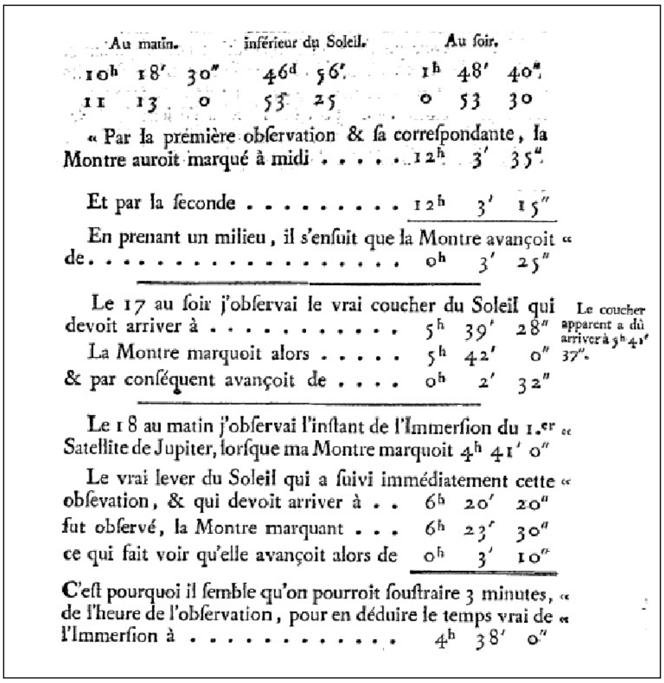
En comparant l'angle horaire de la Lune calculé à celui donné dans l'*Etat du ciel* pour Paris à la même heure locale, on peut en déduire la longitude du lieu d'observation.

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 Pezenas (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 longitude :

"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 fixe, 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.



Au matin. inférieur du Soleil. Au ſoir.

10h	18'	30"	46d	56'.	1h	48'	40".
11	13	0	55	25	0	53	30

« Par la première obſervation & ſa correſpondante, la Montre auroit marqué à midi . . . . . . 12h. 3' 35".

Et par la ſeconde . . . . 12h 3' 15"

En prenant un milieu, il s'enſuit que la Montre avançoit « de. . . . . 0h 3' 25"

Le 17 au ſoir j'obſervai le vrai coucher du Soleil qui devoit arriver à . . . . 5h 39' 28" La Montre marquoit alors . . . . . 5h 42' 0" & par conſéquent avançoit de . . . . 0h 2' 32"

Le coucher apparent a dû arriver à 5h 41' 37".

Le 18 au matin j'obſervai l'inſtant de l'Immerſion du 1.er « Satellite de Jupiter, lorſque ma Montre marquoit 4h 41' 0"

Le vrai lever du Soleil qui a ſuivi immédiatement cette « obſevation, & qui devoit arriver à . . 6h 20' 20" fut obſervé, la Montre marquant . . . 6h 23' 30" ce qui fait voir qu'elle avançoit alors de 0h 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 . . . . 4h 38' 0"

Figure 3 : Extrait du journal de bord de D'Après de Mannevillette mentionnant les correction à apporter au calcul de l'heure d'immersion du premier satellite de Jupiter à l'aide d'une montre marine.

L'horloge, la Lune et le *Board*
Une mécanique difficile à maîtriser

Les horloges utilisées en cette moitié de XVIIIe 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 Mannevillette, dans le journal de bord 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).

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 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.

A 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 précises aux différentes contraintes de la navigation en mer.

[118] OCTOBER 1772.

Diſtances of ☽'s Center from ☉, and from Stars weſt of her.

Days.	Stars Names.	Noon. D. M. S.	3 Hours. D. M. S.	6 Hours. D. M. S.	9 Hours. D. M. S.
1	The Sun.	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		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	Antares.	33. 0. 51	34. 36. 17	36. 11. 37	37. 46. 49
4		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

Figure 4 : Table des distances lunaires extraites du *The Nautical Almanac and Astronomical Ephemeris for the year 1772*

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 enfin le test prévu par l'*Act*. Le 18 novembre 1761, William Harrison s'embarque à bord du *HMS Depford* avec H-4[5] pour un voyage en Jamaïque. Le 26 mars 1662, 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 ingénieux 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 respectée 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 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 dont les tables seraient construites suivant le modèle indiqué par La Caille. 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.

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

(5) quatrième horloge construite par J. Harrison.

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 Berthoud. 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 expédition[6] dont *"l'objet [ne devait être] que des opérations relatives à la perfection de la navigation et spécialement l'examen et la vérification des moyens propres à la détermination des longitudes en mer"* prend le large de Brest le 29 octobre 1771[7] 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 1/4 de degrés pendant 6 semaines, et 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 capacité de production supérieure à celle de ses concurrents.

Leurs conclusions sont de trois ordres :

1. 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.
2. 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.
3. 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 degrés 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. Nous n'entrerons pas dans les détails des nouvelles méthodes d'hydrographie qui permettront à Beautemps-Beaupré de renouveller entièrement les cartes nautiques.

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 corps, 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 XVIII[e] 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. A 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 Générale

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 XVIII[e] 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

(6) Jusqu'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 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

(7) et reviendra le 10 octobre 1772

au XV^e 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. La 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'année 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.

Cette rencontre entre la science et les hommes de mer est cependant une des plus intéressantes qui soit, puisqu'elle a mené à la maîtrise de l'espace, à défaut de celle du temps. ●

Contact

Frédéric BRETAR
Institut Géographique National
Laboratoire MATIS
Mail : Frederic.Bretar@ign.fr

Bibliographie

Bretar, F. *Histoire de la détermination des longitudes de Ptolémée à Borda : Développements théoriques et mise en pratique. Application à la navigation.* Mémoire de DEA Epistémologie, Histoire des Sciences et des Techniques, 2004.

ABSTRACT

The observation of Jupiter satellites for the determination of longitudes on a ship, as we know, is a difficult task. The sailor, to overcome the myopia of its instruments and the instabilities of its floating deck, has no other choice but to turn his eyes toward the Moon. We are in the 18th century. We then realize how hopeful this century is to make progresses in the science of navigation. It is from this moment that the learned game begins, allying the meticulous observations of astronomers and the elegant developments of mathematicians, and that "the moving Moon shone finally for navigators of 18th century as a luminous needle on the celestial dial". An astronomical solution, indeed, but some men with clever hands, will build this so desired machine combining laws of the terrestrial mechanics (the chronometer), whose perpetuum mobile will be the guarantee of a universal time.