

Histoire de la détermination des longitudes de  
Ptolémée à Borda :  
Développements théoriques et mise en pratique.  
Application à la navigation

Frédéric BRETAR

*NdA.* Ce texte est le résultat de recherches effectuées dans le cadre du DEA d'Epistémologie, Histoire des sciences et des techniques de l'Université Paris 7 Denis Diderot, UFR Géographie, Histoire, Sciences de la Société (GHSS), soutenu le 14 Septembre 2004 devant un jury composé de Mme Vilain, CNRS Observatoire de Meudon, et de Mme Passeron, CNRS UMR 7596.

# Table des matières

<b>1</b>	<b>L'enfance de l'art</b>	<b>7</b>
1.1	Le livre de la genèse . . . . .	7
1.2	Quand le navigateur célèbre l'estime . . . . .	10
1.3	Ballades sur les mers salées au 15 <sup>ème</sup> siècle . . . . .	12
1.4	Des latitudes et des hommes . . . . .	14
1.5	Une navigation à une seule dimension . . . . .	17
1.6	Les premières théories astronomiques . . . . .	19
<b>2</b>	<b>Le temps des premières longitudes</b>	<b>25</b>
2.1	Les cadences parfaites des planètes Médicéennes . . . . .	25
2.2	Le temps devient mesurable . . . . .	27
2.3	Les longitudes entre terre et mer . . . . .	28
2.3.1	Splendeurs . . . . .	28
2.3.2	...et misères des lunes de Jupiter . . . . .	31
2.3.3	Un bilan mitigé . . . . .	32
2.4	La piste magnétique . . . . .	33
2.5	Aspect de la navigation à l'aube du siècle des Lumières . . . . .	36
2.6	Le Longitude Act . . . . .	38
<b>3</b>	<b>Science et Progrès</b>	<b>41</b>
3.1	Entre Cartésiens et Newtoniens . . . . .	42
3.2	Les premières théories analytiques de la Lune . . . . .	45
3.3	La Caille et les distances lunaires . . . . .	48
3.4	L'horloge, la Lune et le <i>Board</i> . . . . .	51
3.4.1	Une mécanique difficile à maîtriser . . . . .	51
3.4.2	Une âpre compétition s'engage outre-Manche . . . . .	53
3.5	Vers une complémentarité méthodologique . . . . .	55



# Introduction

**D**ans cet univers qui l'entoure, l'Homme, soucieux de maîtriser et de posséder la nature, fait de l'art de s'y repérer une évidence. Son univers, c'est d'abord notre terre, et nos mers. Comment trouver sa route à travers cet océan d'inconnus, une route, autre que celle du hasard ? Si l'Homme bâtit des villes, il construit et développe les réseaux qui les font vivre. Ce sont d'abord les routes, terrestres et maritimes, qu'il faudra découvrir puis perpétuer. La constitution de ce patrimoine géographique commence par la connaissance la plus précise (la position) et par la mémoire (la carte) de ces routes commerciales et souvent aventureuses.

Les voyages sur terre et sur mer sont nettement différents lorsqu'il s'agit de déterminer où l'on se trouve à un instant donné. Cette différence, de manière évidente, vient du fait que les routes continentales sont jalonnées de repères facilement identifiables (moyennant l'expérience du voyageur) et surtout immobiles et pérennes. Ce n'est plus le cas lors des navigations hauturières où l'horizon se vide désespérément à mesure que l'on s'éloigne des côtes, ne laissant au navigateur au mieux qu'une ligne d'horizon, quand la brume ne couvre pas cette mince démarcation entre ciel et mer. Sur un océan hostile, comment déterminer sa position ? Comment éviter une côte dangereuse, comment, tout simplement, être certain de l'endroit où l'on va arriver après plusieurs semaines de navigation ?

Si l'histoire des latitudes brille de simplicité, celle des longitudes est longue, complexe et tortueuse. Elle est liée à l'histoire économique et politique de nos civilisations ; elle marquera l'histoire des sciences. Ce problème, dont la clé tourne aujourd'hui autour des trois lettres GPS, consistant à se repérer sur une grille de lignes imaginaires (les méridiens et les parallèles), provoqua, dans ses conséquences les plus dramatiques, un nombre de naufrages exceptionnel, prix qu'il fallut sans doute payer pour assister à l'écriture d'une des plus belles pages de l'histoire de la mécanique.

On peut se demander pourquoi les pérégrinations des hommes de mer sont autant liées aux grands développements théoriques d'un Euler, pour ne citer que lui, sur les mouvements des astres. Rappelons encore une fois que le marin est seul sur son navire, ballotté au gré des vents et des courants. Sa seule issue se trouve au ciel. Une étoile, une lune, une planète, pourtant si loin et inaccessible, lui indiquera le chemin. L'expérience du mouvement

astral, comme celle du temps, ne tombe pas sous l'évidence. Le problème de la détermination des longitudes sera au cœur des débats scientifiques du 18<sup>ème</sup> siècle.

Si les premières longitudes furent données au 1<sup>er</sup> siècle de notre ère, il faudra attendre une quinzaine de siècles pour que l'homme se penche à nouveau sur cette question, sans doute pressé par la menace politique et économique des siècles Renaissants. Le navigateur, lui, commence à s'éloigner des côtes, il finit par s'y perdre et succombe souvent aux assauts de son ignorance. C'est en levant les yeux au ciel que l'homme trouvera son salut. Le monde supra lunaire, incorruptible, parfait, sera bientôt le fil d'Ariane du pilote.

La découverte des satellites de Jupiter par Galilée va bouleverser la science des longitudes. Si cette horloge céleste est difficile à observer du pont d'un navire, elle résoudra pour un temps le problème de la détermination des longitudes à terre. 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'espairs 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 18<sup>ème</sup> siècle comme une aiguille lumineuse sur le cadran céleste "<sup>1</sup>. Une solution astronomique, certes, mais certains hommes aux mains habiles, construiront cette machine tant désirée (le chronomètre), combinant les lois de la mécanique terrestre, dont le perpetuum mobile des cliquetis métalliques sera le garant d'un temps universel.

---

<sup>1</sup>(Sobel, 2001) p.100

# Chapitre 1

## L'enfance de l'art

*L'art d'un temps, pour peu que l'artiste y ait mis de son cœur, a de quoi nous plaire éternellement ; mais la science d'un temps ne vaut que pour son temps.*

**Théodore de Wyzewa** - Introduction à la Légende Dorée de J. de Voragine

La première phase de l'histoire des longitudes commence avec les travaux de Ptolémée et s'étend jusqu'au début du 17<sup>ème</sup> siècle. Si l'observation des éclipses de Lune permet dans certains cas de calculer une longitude, les navigateurs ne peuvent qu'*estimer* leur position principalement à cause des mouvements de leur navire ainsi que de la rareté de ces phénomènes célestes. On découvre progressivement au cours des siècles des méthodes et des instruments permettant d'observer les astres, qui mèneront à la détermination des latitudes. Le secret des longitudes reste cependant bien gardé, mais seulement pour un temps.

### 1.1 Le livre de la genèse

**S**i l'histoire de la navigation n'est pas la plus vieille histoire du monde, elle s'en approche. Cette épopée, qui d'ailleurs ne cesse d'en finir, est l'histoire de notre relation à l'espace et au temps. C'est Ptolémée qui posa les jalons d'une cartographie scientifique<sup>1</sup>, d'une méthode permettant de repérer des lieux sur Terre à l'aide de coordonnées géographiques. Son œuvre est considérable. Il rassembla une quantité impressionnante d'informations lui permettant de fixer la position en longitude et en latitude de plus de 8000 points sur la surface de l'*oikumène*<sup>2</sup>. Son apport principal fut sans doute la

---

<sup>1</sup>(d'Hollander, 2003)

<sup>2</sup>monde connu à l'époque

fixation du méridien passant par les îles Fortunées<sup>3</sup> comme méridien origine à partir duquel seraient mesurées d'ouest en est toutes les longitudes terrestres.



FIG. 1.1 – Extrait de Tabula nova Galliae, Claude Ptolémée publiée à Lyon en 1541

Dans sa *Géographie*, Ptolémée déclare<sup>4</sup> que pour dresser une carte du monde habité aussi fidèle que possible, il faut s'appuyer en premier lieu sur les récits des voyageurs dans leur tour du monde, mais en recourant aussi aux services de la géométrie et surtout de l'astronomie.

" Les distances pour la plus part, surtout celles d'occident en orient ou d'orient en occident, ne nous ont été données que grossièrement, non par l'effet de quelque négligence de la part des navigateurs à qui nous devons ces relations, mais parce qu'ils manquaient d'une méthode mathématique pour bien observer, et parce qu'on avait pas encore observé plusieurs éclipses de lune, de différents lieux à la fois, et en même temps "

La méthode consistant à utiliser les éclipses de Lune<sup>5</sup> fut découverte par

<sup>3</sup>Rappelons que certains anciens tenaient les îles Fortunées, qui correspondent aux îles Canaries, pour le lieu du Paradis terrestre

<sup>4</sup>(Ptolémée, ) p. 14-15 chap. 4 - ici et dans la suite du texte, la référence aux citations sera mentionnée avant la citation elle-même ... pour cause de subtilités L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X.

<sup>5</sup>conjonction du Soleil, de la Terre et de la Lune, l'ombre de la Terre se déplaçant à la surface de la Lune



Hipparque (190 – 120), après avoir jeté les bases du calcul trigonométrique utile pour l'établissement des cartes géographiques. Cette méthode consiste en l'observation d'une même éclipse de Lune en deux lieux distincts, la différence des heures locales en ces lieux donnant la différence de longitude<sup>6</sup> terrestre. Ainsi, calculer une longitude consiste à

1. observer un phénomène céleste sous un méridien de référence
2. observer ce même phénomène sous un autre méridien et noter l'heure locale correspondante

Aussi innovante que fût cette méthode, Hipparque tout autant que Ptolémée trois siècles plus tard, ne nous disent pas comment trouver cette heure locale pourtant cruciale dans le calcul des longitudes. La question n'est toujours pas résolue. Pour que l'ombre de la Lune soit visible de la Terre, le Soleil doit être sous l'horizon, on ne pouvait donc pas utiliser de cadran solaire. On pense<sup>7</sup> alors que seul un garde-temps rudimentaire comme une clepsydre ou un sablier pouvait être utilisé. À l'emploi de cette technique sont associés deux inconvénients majeurs : le premier est celui de la rareté de ces phénomènes célestes (on compte deux voire trois éclipses par an, parfois aucune). Il faut donc n'en manquer aucun et les prévoir longtemps à l'avance pour organiser l'observation. Le second inconvénient, peut-être le plus problématique, vient du fait qu'il est difficile de désigner un instant particulier lors d'une éclipse. Qu'est-ce que le début, le milieu, la fin d'une éclipse ? Il peut varier de plusieurs minutes en fonction des observateurs, et influence directement la lecture de l'heure locale<sup>8</sup>, donc la différence de longitude. Ce sera cependant la seule méthode pour trouver l'heure du méridien local au cours des 1600 prochaines années.

Si à terre les distances peuvent être décomptées en journées de marche, il n'en est pas de même pour les voyages en mer où les aléas météorologiques sont trop présents et trop nombreux pour définir de manière assurée les distances et les directions qu'un navire doit prendre pour se rendre d'un point à un autre. La navigation n'est pas chose aisée, car les cartes marines sont partiellement fausses, quand elles existent<sup>9</sup>. Les navigateurs ont alors recours au plus traditionnel des moyens de navigation en mer, qui d'ailleurs restera utilisé officiellement jusqu'au 19<sup>ème</sup> siècle, et constitue à vrai dire encore de nos jours la base de l'intuition et du bon sens du marin-pilote. Il s'agit de l'estime.

---

<sup>6</sup>Puisque la Terre effectue une rotation de  $360^\circ$  en 24 heures, elle parcourt  $1^\circ$  en 4 minutes, soit  $15^\circ$  en une heure. Les degrés d'angle, que sont les longitudes, peuvent donc être exprimés sous forme d'une période de temps

<sup>7</sup>(Howes, 1980) p. 194

<sup>8</sup>on verra par la suite que l'observation des satellites de Jupiter est soumise à la même problématique

<sup>9</sup>Guillaume de Nangis fait référence à une carte marine présente sur le navire génois qui mène Saint Louis à la deuxième croisade en 1270

## 1.2 Quand le navigateur célèbre l'estime

**L**e suivi de la position et la détermination de la route du navire ne va pas sans poser de sérieux problèmes tant les deux paramètres (le cap et la vitesse) sont sujets à caution. Le premier est donné par la boussole, le second par le loch.

Les propriétés (plus exactement l'existence) du champ magnétique terrestre sont connues depuis le milieu du premier millénaire. Mais c'est à la fin du 11<sup>ème</sup> siècle que l'instrument indiquant la route fit son apparition dans le bassin méditerranéen. Les débuts de la boussole sont modestes : une aiguille aimantée enfilée dans un fétu de paille flottant sur un peu d'eau. L'aiguille fut ensuite montée sur un pivot, puis fixée à une rose divisée en huit, bientôt seize et trente-deux rhumbs. L'ensemble, enfermé dans un habitacle et suspendu pour éviter les mouvements de la plate-forme, constitue à la fin du Moyen-Âge le compas qui permet désormais aux marins de suivre une route déterminée.

Le principe du loch est très simple. Il consiste à laisser filer une corde à la poupe du navire pendant un temps donné, puis de convertir cette longueur en vitesse " instantanée ". Charles-Pierre Claret de Fleurieu, éminent marin et ministre de la Marine sous Louis XVI s'exprime en ces termes<sup>10</sup> :

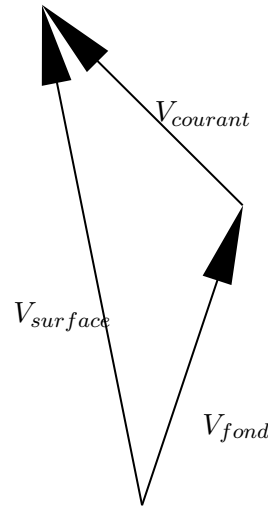
" La ligne de loch dont se servent les navigateurs pour mesurer le sillage ou la vitesse du vaisseau est divisée en intervalles de 47 pieds 1/2 chacun, la longueur de la 120<sup>ème</sup> partie d'un mille marin. Ces intervalles sont appelés nœuds parce que chaque division est indiquée par un petit bout de ficelle engagé dans la ligne, lequel porte autant de nœuds qu'il a été filé d'intervalles d'un 120<sup>ème</sup> de mille. On observe combien le vaisseau parcourt de ces intervalles pendant la durée d'une demie minute, la 120<sup>ème</sup> partie d'une heure, et l'on conclut d'après le rapport égal du nœud au mille marin et de la demie minute à l'heure, que le vaisseau parcourt pendant la durée de l'heure entière autant de milles qu'il a passé de nœuds de la ligne de loch pendant la durée de la demie minute."

Notons qu'il s'agit effectivement d'estime, c'est-à-dire que les mesures effectuées sont entachées d'erreurs qu'il n'est pas possible de mesurer directement. Les incertitudes sur la vitesse peuvent être significatives pour trois raisons : d'une part, la longueur des intervalles entre les nœuds peut varier en fonction de l'habileté du pilote et des corrections apportées.

---

<sup>10</sup> cité dans (Chapuis, 1999) pp. 48 extrait de *Voyage autour du monde en 1790, 1791 et 1792 par Marchand*

En effet, pour corriger son estime, le pilote pouvait modifier son instrument de mesure en changeant la longueur inter nœuds de la ligne de loch. D'autre part, la ligne de loch mesure la vitesse du navire à la surface de l'océan ( $V_{surface}$ ), et ne permet pas de dissocier la vitesse par rapport au fond ( $V_{fond}$ ) de la vitesse des courants marins ( $V_{courant}$ ). Comme le souligne J. Cassini en 1722 en ce qui concerne les méthodes de navigation en mer<sup>11</sup> :



" La plus grande difficulté est l'estime des pilotes du vaisseau. Pour la rendre plus sûre, on jette le Loc, pièce de bois attachée à une ficelle que l'on devine à mesure que le vaisseau s'en éloigne, car la mer n'ayant pas de mouvement vers aucun endroit, le loc y demeure flottant et immobile et devient un point fixe par rapport auquel le vaisseau a plus ou moins de vitesse. Mais cette supposition cesse absolument d'avoir lieu si l'on est dans un courant, ce qui n'est point du tout rare. Alors le loc n'est plus immobile, et il est emporté avec le vaisseau. On s'en apercevrait parce que le vaisseau n'aurait plus de vitesse à l'égard du loc et l'on saurait du moins qu'on serait dans un courant, mais le vaisseau, à cause de sa grande masse et parce que le vent a plus de prise sur lui, est emporté plus vite que le loc et l'on prend pour vitesse absolue du vaisseau ce qui n'est que l'excès de vitesse sur le loc, erreur très dangereuse. On en conclut une fausse position du navire."

La pièce de bois attachée à l'extrémité de la ligne de loch, sensée être immobile par rapport à la Terre, ne l'est justement pas à cause des courants. Diverses améliorations seront proposées au cours des siècles, notamment par Bouguer<sup>12</sup>. Enfin, la mesure de la demie minute peut être problématique compte tenu de l'utilisation du sablier (ampoulette) plus ou moins bien étalonné. Il arrive en effet très fréquemment que l'écoulement du sable soit gêné par une humidité trop importante, par le rétrécissement ou l'agrandissement du trou par lequel il passe. Cela conduit à des erreurs

<sup>11</sup>(Cassini, 1722) p.103

<sup>12</sup>(Bouguer, 1747)

de plusieurs secondes dans le temps d'écoulement<sup>13</sup>.

Outre la boussole et le loch, la sonde est le troisième instrument indispensable à la bonne pratique de l'estime pour pallier l'absence de longitude. Lors d'une traversée océanique, il est d'usage de repérer l'arrivée dans les eaux côtières au changement de couleur de l'océan, à la présence d'oiseau de terre ou d'algues. Pour fixer l'instant du passage sur le talus continental (indication plus ou moins précise de l'approche de la côte et très vague quant au point de celle-ci sur lequel porte la route) la mesure de la profondeur et de la nature du fond (grâce aux prélèvements effectués par le plomb de la sonde) reste le moyen le moins improbable. En effet, les endroits où les risques de naufrage sont les plus importants se situent lors de l'atterrissage du navire, lorsque l'océan n'est plus assez profond pour recouvrir les hauts-fonds. L'erreur sur l'estime de la position après une longue traversée ainsi que l'inexactitude des cartes obligent le pilote à beaucoup de prudence à l'approche des côtes, même lorsqu'elles ne sont pas encore visibles. Un changement de direction d'un bateau de fort tonnage n'a rien d'instantané. Il faut par exemple au Bélem 20 minutes pour effectuer un changement de bord, pendant lesquelles il continue d'avancer de deux à trois nautiques<sup>14</sup>.

Nous venons de le voir, piloter un navire, avant toute théorie, nécessite un sens pratique fortement développé et surtout une longue expérience. En somme, une connaissance de l'environnement sur lequel on se déplace est indispensable, il faut connaître les courants et les vents dominants, ainsi que les côtes sur lesquelles on va atterrir. Mais avant que l'expérience ne s'acquière et ne se diffuse, commence une période d'exploration, plus ou moins aventureuse. Nous sommes au début de l'ère des Grandes Découvertes.

### 1.3 Ballades sur les mers salées au 15<sup>ème</sup> siècle

**L**e commerce maritime est au cœur du développement des pays européens<sup>15</sup>. La puissante ligue Hanséatique a la maîtrise de la mer Baltique et du Nord; elle connaît un essor tout à fait exceptionnel au 14<sup>ème</sup> siècle et installe de nombreux comptoirs<sup>16</sup> dont Bergen, Brugge, Lübeck, Hambourg, Riga, Danzig, Londres . . .

Au début du 15<sup>ème</sup> siècle, le commerce entre l'Europe et l'Asie emprunte les routes de la mer noire et de la méditerranée et est principalement le monopole des Républiques italiennes mercantiles<sup>17</sup> de Gênes et de Venise. À l'écart de ces marchés, les portugais se tournent progressivement vers les

---

<sup>13</sup>(loc, 1743)

<sup>14</sup>1 nautique = 1852 m

<sup>15</sup>(Mollat, b)

<sup>16</sup>(Westholm, 2000)

<sup>17</sup>(Guichardin, 1999)



FIG. 1.2 – Routes terrestres (traits pleins) et maritimes (pointillés) empruntés par les marchands de la ligue Hanséatique

mers du Sud<sup>18</sup>.

Après un premier échec en 1433, Gil Eanes, un écuyer portugais de petite noblesse, franchit en 1434, le cap Bojador ("cap de la Peur") au large du Sahara. Au cours des années précédentes, les portugais ont repéré et exploré les archipels atlantiques des Canaries, de Madère et des Açores. À cette époque, le Portugal traverse une période de marasme économique et l'appât de l'or du Soudan pousse à d'importantes prises de risque sous l'égide du prince Henri le Navigateur (1394 – 1460), qui met au service de l'entreprise de conquête et de colonisation une partie du poids immense de l'État portugais. La progression maritime vers le sud, destinée à contourner l'Islam maghrébin qui joue le rôle d'intermédiaire dans les échanges entre les richesses d'Afrique noire et l'Europe, se heurte cependant à des courants marins contraires, trop violents pour être franchis à la rame (en complément de la voile unique).

<sup>18</sup>Ne disposant pas d'une flotte particulièrement développée, la couronne portugaise a embauché des pilotes génois. Christophe Colomb était lui-même génois. Il se mit au service des Rois Catholiques Isabelle de Castille et Ferdinand d'Aragon pour les aider à construire une marine afin d'assurer son expédition dont le financement avait été refusé par Jean II, Roi du Portugal de 1481 à 1495

Le passage du cap Bojador nécessite en effet de s'éloigner à la limite de la visibilité (plus de 40 km) des côtes sahariennes. Cette esquisse de navigation hauturière à la voile rompt avec la tradition du cabotage. Cette avancée ouvre une porte sur le monde de l'Afrique noire avec, dès 1445, le passage du cap Vert et l'arrivée à l'embouchure du Sénégal. En 1471, ils franchissent l'équateur, et en 1485, Barthélemy Diaz double le Cap de Bonne-Espérance. Avec Christophe Colomb en 1492 et Vasco de Gama en 1498, les navigateurs espagnols et portugais naviguent en haute mer pendant des semaines avec comme seul horizon la frontière du ciel et de l'océan. Privé de tout repère terrestre, ces voyages ont forcé les marins à observer le ciel, la position des étoiles et la course du Soleil, en complément de la navigation à l'estime.

Considérer la navigation sous ce nouveau point de vue ne nécessite plus seulement une expérience pratique (au moins en amont de la mesure de la longitude et de la latitude). Si l'on veut se repérer, il faut savoir repérer les astres le plus précisément possible. D'abord ceux appartenant à la sphère des fixes, qui depuis Aristote sont immuablement sans mouvement, puis, plus tard, les astres errants, les planètes. Le côté proprement savant et théorique des méthodes de navigation astronomiques qui feront leur apparition au cours des siècles suivants vient de cette rencontre entre les pérégrinations hauturières des hommes et leur regard vers cet océan céleste, salvateur celui-là.

## 1.4 Des latitudes et des hommes

La pseudo-fixité de l'étoile Polaire est déjà utilisée par les Vikings pour se repérer dans les mers du nord connues pour leurs vents instables et leurs brumes dangereuses. Mais c'est le fruit des réflexions des mathématiciens réunis autour du roi Jean II (1455 – 1495) qui menèrent au moyen de calculer la latitude d'un lieu quelconque grâce à *l'astrolabe*<sup>19</sup>. Pour déterminer sa latitude dans l'hémisphère Nord et la nuit, il suffit au marin de mesurer la hauteur de l'étoile Polaire.

<sup>19</sup>(d'Hollander, 1999)

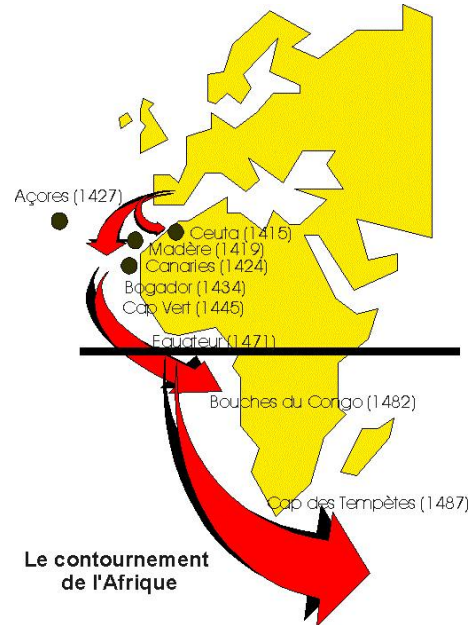


FIG. 1.3 – Contournement de l'Afrique par les marins portugais

Il n'en est pas de même le jour et surtout lorsque les navigateurs abordent l'hémisphère austral. Pour connaître sa latitude par observation du Soleil, il ne suffit pas de mesurer sa hauteur au-dessus de l'horizon. Il faut connaître sa déclinaison<sup>20</sup>. Si elle est constante pour les étoiles fixes quelque soit le lieu depuis lequel on les observe, celle du Soleil varie avec chaque jour de l'année. De la comparaison de sa déclinaison avec sa hauteur méridienne<sup>21</sup>, résulte la hauteur de l'équateur dont le complément est la latitude. Des tables de la déclinaison du Soleil sont progressivement calculées, les premières par l'astronome juif Abraham Zacuto (1452–1515) entre 1473 et 1478. Rassemblées dans son œuvre principale *Ha-Hibbur ha-Gadol*, elles seront à la base des *Regimentos do Astrolabio do Quadrante* (Régiments pour l'astrolabe et le quadrant), préparés par les mathématiciens portugais pour les navigateurs et utilisés pour calculer les latitudes. Dès lors, on n'hésite plus à s'éloigner des côtes.

L'astrolabe traditionnel se perfectionne rapidement. Il est souvent remplacé par le quadrant, quart d'astrolabe muni d'un fil à plomb. Plus simple, plus léger, le quadrant est un quart de cercle taillé dans du bois ou dans une plaque métallique, gradué sur la couronne de  $0^\circ$  à  $90^\circ$ . Il porte deux viseurs fixés sur un des côtés et un fil à plomb. On observe l'astre grâce à deux pinnules placées aux extrémités d'un des deux rayons perpendiculaires. La position du fil à plomb sur l'arc gradué indique la hauteur de l'astre au-dessus de l'horizon. À côté de ces instruments fondés sur la

graduation du cercle, les marins portugais en utilisent d'autres reposant sur les rapports entre les angles et les longueurs. L'arbalestille, ou arbalète ou encore "bâton de Jacob", est formée d'une règle d'environ un mètre de long. Sur celle-ci sont gravées des graduations et autour d'elles coulisse un ou plusieurs "manteaux". On fait glisser le manteau pour que sa partie inférieure finement biseautée soit en contact avec l'astre observé.



FIG. 1.4 – Astrolabe traditionnel arabe datant des années 1200

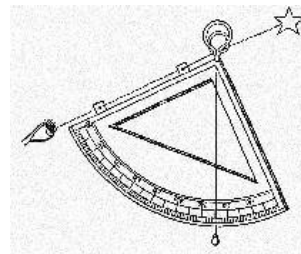


FIG. 1.6 – Fonctionnement du quadrant

<sup>20</sup>Distance à l'équateur céleste

<sup>21</sup>Observation de la hauteur du Soleil à son passage au méridien, au midi local

FIG. 1.5 – Tables de la déclinaison du Soleil par Abraham Zacuto, Salamanca, 1491

Le rapport entre la hauteur du manteau et la longueur de la tige donne la hauteur de l'astre. Il faut donc à la fois que l'observateur regarde en même temps et l'horizon et l'astre, ce qui n'est guère facile, et maintienne le manteau dans le plan vertical. En fait, l'arbalète ne permettait pas une mesure très précise car il y avait du fait même de la position de l'œil de l'observateur une erreur de parallaxe. Malgré tout, elle fut utilisée sur certains navires jusqu'au 18<sup>ème</sup> siècle.

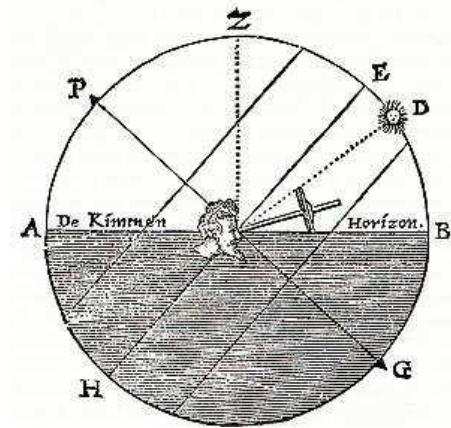


FIG. 1.7 – Fonctionnement de l'arbalète

On voit apparaître dès la fin du 16<sup>ème</sup> siècle un instrument qui sera largement diffusé auprès des navigateurs. Il s'agit du quartier de Davis.

Cet appareil était constitué d'une règle sur laquelle étaient montés deux arcs de cercle. L'arc de cercle supérieur portait une graduation jusqu'à 60°, l'arc de cercle inférieur une graduation de 30°. Sur ces deux arcs, deux pinnules coulissaient. L'observateur mesurait la hauteur du soleil en tournant le dos à ce dernier.



Les rayons du soleil passaient à travers la pinnule de l'arc du cercle supérieur et venaient éclairer une fente horizontale située à l'extrémité de la règle. Dans le même temps, l'observateur visait par la pinnule de l'arc de cercle inférieur l'horizon à travers cette fente. La hauteur du soleil était obtenue en additionnant les deux lectures faites sur les arcs de cercle.

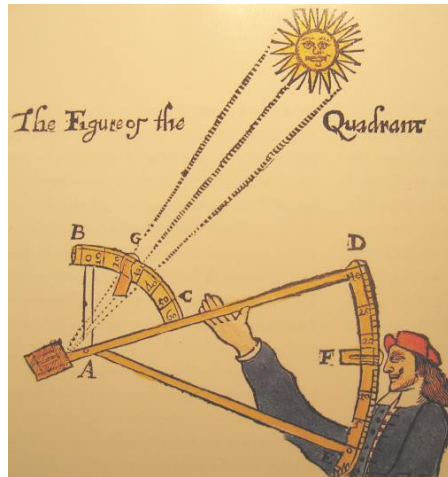


FIG. 1.8 – Utilisation du quartier de Davis

La diffusion de ces instruments auprès des pilotes achève l'histoire des latitudes. Les siècles suivants amélioreront la précision des mesures d'angle, notamment en utilisant les propriétés de la double réflexion de l'octant. L'espace semble réduit à une unique dimension, puisqu'il n'est toujours pas question de calculer une longitude à bord d'un navire, faute de méthode et de moyen. Les navigations vers le Nouveau Monde sont pourtant en plein essor.

## 1.5 Une navigation à une seule dimension

**A**u cours du 16<sup>ème</sup> siècle, le commerce entre l'Europe, le Nouveau Monde et les Indes s'organise. La Compagnie Hollandaise des Indes Orientales est créée en 1602, celle des Indes Occidentales en 1621. Les voyages transatlantiques se multiplient avec des chargements de plus en plus précieux. Après la mise en exploitation des mines de Potosí (actuelle Bolivie), vers 1545, les galions espagnols reviennent chargés d'or et d'argent (la production annuelle des mines d'Amérique atteint alors environ 267 000 kilos d'argent et 5400 kilos d'or, alors que l'Europe ne produit, par an, que 60 000 kilos d'argent et moins de 1 000 kilos d'or). C'est aussi à partir de 1538 que le commerce espagnol prend un aspect triangulaire. En effet, les navires se rendent d'abord sur la côte d'Afrique, où ils échangent une partie de leurs marchandises contre des Noirs qu'ils vont vendre comme esclaves en Amérique.

Ces navigations pouvaient durer plusieurs mois. Tant qu'elles avaient lieu suivant un cap Nord Sud (longitude constante), on pouvait faire le point grâce à la Polaire, ou grâce au Soleil. Mais quand il s'agit de naviguer dans la direction Est-Ouest (partie orientale du cap de Bonne Espérance, et navigations vers les Amériques), on ne peut pas directement appliquer les mêmes méthodes. Les navigations se font donc suivant un parallèle constant. Pratiquement, les navires se mettent à la latitude du point d'arrivée et font route

à latitude constante (vérifiée le plus souvent possible par la prise de hauteurs du Soleil, ou d'étoiles). À en croire l'auteur d'un célèbre manuel de navigation<sup>22</sup>, cette technique perdura quelques siècles :

" C'est cette incertitude de la navigation par rapport à la longitude qui est cause que lorsqu'on veut aller d'un port à un autre, qui en est considérablement éloigné, on ne tente jamais de s'y rendre par le rumb de vent le plus direct. Si nous partons de quelques ports de France dans l'Océan, pour aller à la Martinique, nous courons d'abord assez cap à l'ouest pour n'avoir rien à craindre du cap de Finisterre (espagnol), lorsque nous dirigeons notre route vers le Sud. En second lieu, nous nous hâtons de nous mettre par la latitude de la Martinique, 14°30' et nous n'avons ensuite qu'à courir précisément à l'Ouest. Nous vérifions chaque jour, en observant la latitude si nous suivons exactement cette route. Et de cette sorte nous ne pouvons manquer de rencontrer l'île malgré l'imperfection de notre art quant à la longitude."

En ce qui concerne les traversées de l'Atlantique, la navigation à latitude constante est facilitée par l'existence de vents dominants et réguliers. Les Alizés, couloir météorologique centré sur l'équateur, portent les navires des îles Canaries vers les Antilles. Cette navigation " au portant " reste beaucoup plus confortable que les traversées en provenance du Nouveau Monde où le couloir des vents d'Ouest dominants (dans l'Atlantique Nord) est beaucoup plus large que celui de la route des Alizés. Il arrive souvent qu'il trompe les marins croyant arriver à l'embouchure de la Loire alors qu'ils sont en Espagne ou au Portugal. Les conséquences peuvent en être fâcheuses, surtout en temps de guerre.

Près de seize siècles se sont écoulés depuis Hipparque et Ptolémée, seize siècles de développement, mais aussi de rudiments méthodologiques pour trouver sa position sur notre globe. Les éclipses de Lune sont au 16<sup>ème</sup> siècle le **seul** moyen permettant de calculer une longitude. Or la rareté de ces phénomènes en fait un moyen peu praticable pour les centaines de navires présents chaque année sur les océans. Si les marins ont su adapter leurs méthodes de navigation aux connaissances de l'époque, il n'en reste pas moins que la connaissance de la seconde dimension est de plus en plus pressante. Les instabilités du pont d'un navire ajoutent à la complexité du problème de la détermination des longitudes, dont les bases apparaîtront au début du 16<sup>ème</sup> siècle.

---

<sup>22</sup>Nouveau traité de navigation contenant le théorie et la pratique du pilotage, Paris, 1753, cité dans (Chapuis, 1999) p. 45

## 1.6 Les premières théories astronomiques

En ce 16<sup>ème</sup> siècle renaissant, on ne peut toujours pas parler de navigation astronomique, comme nous l'avons vu, bien que l'on sache déterminer la latitude par observation de la hauteur de l'étoile Polaire et du Soleil. Les premiers explorateurs ont essayé de déterminer leur longitude de manière astronomique. Christophe Colomb<sup>23</sup> emporta les tables de Regiomontanus<sup>24</sup> qui lui permirent, lors d'une relâche à Hispaniola (Haïti) le 14 septembre 1494 d'observer une éclipse de Lune. La fausseté des tables et l'imperfection des observations ne donnent aucune validité à la valeur trouvée, 23° degrés plus à l'ouest de la véritable position. Magellan quant à lui observa, lors de son quatrième voyage, une éclipse de Soleil à Saint-Julien d'où il avança une longitude de 61° à l'Ouest de Séville<sup>25</sup>, plus de 40° à l'ouest de sa position effective.

1494	1494	1497
Eclipsis lune	Eclipsis lune	Eclipsis lune
21 14 38	14 19 45	18 6 38
Martij	Septembria	Januarij
Dimidia duratio	Dimidia duratio	Dimidia duratio
1 46	1 48	1 46

FIG. 1.9 – Extrait des tables de la Lune de Régiomontanus pour les années 1494 et 1497

C'est en 1514 que Johann Werner de Nuremberg (1468 – 1522), dans une nouvelle traduction du premier livre de la *Géographie* de Ptolémée propose une nouvelle méthode pour la détermination des longitudes : la méthode des distances lunaires. En quoi consiste-t-elle ? En une lunaison (29 jours 1/2), la lune se déplace d'est en ouest, à raison d'un peu plus de 12 degrés par jour, sur fond d'étoiles (zodiacales). Le satellite de notre planète peut donc servir d'horloge grâce à sa distance angulaire aux étoiles proches de sa trajectoire. Ainsi, une fois la distance vraie d'une étoile à la lune mesurée, il n'y a plus qu'à chercher cette même valeur angulaire dans des tables afin de savoir à quelle heure elle est observée au méridien origine. La différence entre ce temps et l'heure locale au moment de l'observation sera la longitude

<sup>23</sup>L'utilisation des méthodes astronomiques par C. Colomb n'est toujours pas confirmée. Une étude récente (Pickering, 1997) montre que C. Colomb n'aurait pas réellement utilisé les éclipses de Lune annoncées dans son journal de bord pour calculer sa longitude. Les longitudes qu'il donne auraient probablement été calculées à partir de la distance *estimée* parcourue lors de son premier voyage transatlantique (1142.25 lieues) en la convertissant en degrés de longitude.

<sup>24</sup>du nom de leur auteur. Ces tables, dans la lignée des tables Alphonsines achevées en 1252, prédisent la position des planètes, de la Lune, du soleil et des étoiles de 1475 à 1506. Elles sont établies suivant le système géocentrique de Ptolémée. Les éclipses de Lune y sont particulièrement décrites.

<sup>25</sup>(Dénuce, 1911) p. 270

Icy est la figure dudi & Baston Astronomicque.

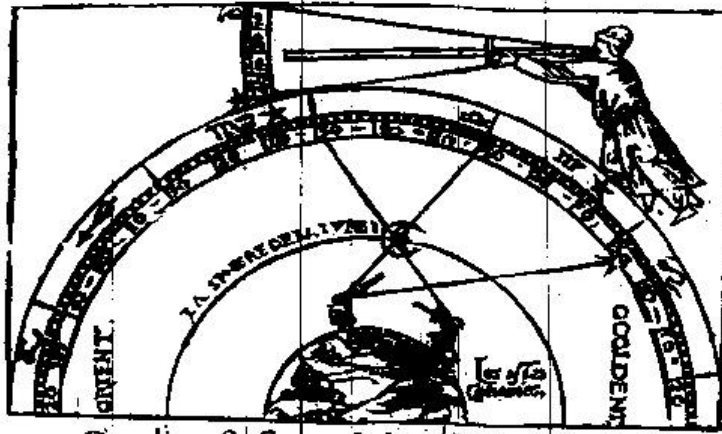


FIG. 1.10 – Utilisation du bâton de Jacob selon Gemma Frisius

cherchée. Tout ce qui reste à faire (!) est d'établir des éphémérides de qualité.

Malgré la pertinence de sa méthode, ce n'est pourtant pas Werner qui la diffusa. Dans sa traduction de 1553 de la *Cosmographie* de Peter Apian (1495–1552), Gemma Frisius (1508–1555), médecin et mathématicien d'Anvers, nous explique<sup>26</sup> en détail le fond de la méthode, et illustre ses propos de dessins nous montrant de manière claire comment on doit faire pratiquement pour observer des distances lunaires :

" Après que nous avons montré la manière comment que le bâton astronomique doit être fait, démontrons aussi comment on doit faire. Si donc la longitude d'aucun lieu ou ville vous est inconnue et la désirez savoir. Premièrement cherchez hors des tables astronomiques le lieu vrai ou mouvements de la Lune, selon la longitude, au temps de votre considération à quelque certain lieu, auquel les racines des tables sont calculées et vérifiées. Outre ce, le degrés de la longitude d'aucune étoile fixe peu ou rien différente de la ligne écliptique, laquelle étoile fixe procède ou enfuit la plus prochaine du mouvement de la Lune. Comptes après la distance qu'il y a entre la Lune et l'étoile fixe. Apres que vous aurez trouvé la distance de la Lune et de l'étoile fixe, mettez le bout du bâton sur la vue d'un œil ayant l'autre clos. "

Nous verrons qu'effectivement la méthode des distances lunaires sera le moyen astronomique pour déterminer la position d'un navire au milieu de l'océan. Elle devra cependant attendre encore deux siècles pour pouvoir être pratiquée (par un nombre restreint de pilotes) simplement parce que le mou-

<sup>26</sup>(Frisius, 1553) p. 15-17

- \* 14  $\gamma$  *Aldebaran, cest a dire l'œil ou le cueur de Taurus. II. 2. degres. 57. mi. vne estoille de la premiere grandeur.*
- \* 30  $\gamma$  *La derniere des sept estoilles qu'on appelle pleiades vers le norr. du costé deuant. 8. 22. degres. 27. mi. de. 5. grandeur.*
- \* 1  $\epsilon$  *La creische ou presépe, laquelle est a la poiétrine de Cancer. 0. 0. degres. 37. minutes. nebulose, ou obscure.*
- \* 2  $\epsilon$  *Le estoille de ladicte creische vers le Septentrion contient degres 27. 57. minutes. de la. 4. grandeur.*
- \* 3  $\epsilon$  *Asellus, la fine septentrional. 0. 0. gr. 37. mi. de la 4. grandeur.*
- \* 4  $\epsilon$  *La plus enclinee des deux vers midy. 0. 1. deg. 37. mi. de la. 4. grã.*
- D iij

FIG. 1.11 – Catalogue d'étoiles de Frisius

vement de la Lune, ainsi que les positions des étoiles fixes ne sont pas connus avec assez de précision. Le problème des tables rassemblant le mouvement précis de la Lune sera au cœur des préoccupations astronomiques du 18<sup>ème</sup> siècle.

Si Gemma Frisius ne fut pas l'inventeur de la méthode des distances lunaires, il semble cependant que ce soit le premier à proposer<sup>27</sup> la méthode des garde-temps dans son ouvrage *De Principiis Astronomiae Cosmographicae* publié à Louvain en 1530.

---

<sup>27</sup>(Frisius, 1530) chap. 18

" À présent sont en usage quelques petites horloges appelées montres. Lesquelles par leur légèreté sont aisées à porter par pays et durent leur mouvement presque 24 heures : voire infiniment pour peu qu'on les aide, au moyen desquelles ne sera difficile d'avoir les longitudes des régions, comme s'ensuit. Premièrement avant que de nous mettre en chemin, nous devons diligemment observer l'heure du lieu dont nous devons partir ; secondement, en cheminant le mouvement d'icelle horloge ou montre ne sera point empêché ni arrêté : puis après que nous aurons cheminé 15 ou vingt lieues, si nous voulons savoir combien nous sommes distants en longitude, du lieu ou nous sommes partis, attendons jusqu'à ce que le style soit justement sur quelque heure, et au même instant, verrons avec l'astrolabe ou notre globe combien sont les heures au lieu où nous sommes venus et si nous trouvons même heure en la montre et en l'astrolabe, nous dirons que le lieu d'où nous sommes venus et celui où nous sommes venus est en même longitude et que notre chemin est dressé droitement du midi au pôle, ou bien à l'opposé. Mais si la différence est d'une heure, ou quelques minutes, nous les tournerons en degrés ou minutes de degrés et ainsi nous pourrons [trouver] la longitude des régions. Mais sur tout en l'observation de longitudes, doit être l'horloge très exquis, qui ne doit subjecter à la mesuration du temps : par quoi sera utile aux grandes pérégrinations (principalement sur mer). "

En apparence fort simples, les recommandations de Gemma Frisius présupposent la possession d'un garde-temps fiable quelque soient les conditions de stabilité, ce qu'il suppose être le cas des horloges portatives qui apparaissent en effet à cette époque. La fiabilité ici implique tout à la fois un fonctionnement rigoureux des mouvements mécaniques horlogers et une continuité sans faille de l'opération de mesure. Cette dernière condition ne sera remplie qu'avec l'invention de remontoirs à pression, de remontoirs d'égalité au 17<sup>ème</sup> siècle. Quant à la première, il est douteux que les horloges dont parle Gemma Frisius disposent de la précision requise pour effectuer la mesure. Il faudrait en effet que lesdites horloges ne perdent pas plus de 3 secondes par jour pour demeurer à l'intérieur de l'erreur tolérable pour les voyages au long cours. Comme sa concurrente, la méthode des chronomètres ne peut être utilisée à cette époque à cause de problèmes techniques insolubles à l'époque.

L'état théologique de la science des longitudes prend progressivement fin, même si on ne sait pas encore les calculer précisément. Les instruments de mesure, sans être encore assez précis, sont néanmoins largement opérationnels et répandus. La navigation reste une pratique rudimentaire qui se base avant tout sur l'expérience du pilote, sur sa connaissance de la mer et ses anticipations.

On voit émerger les deux grandes branches qui mènent à la résolution du problème des longitudes. Elles ne restent que potentielles. D'une part,

l'astronomie ne connaît pas assez bien son objet. Les étoiles restent collées à la sphère des fixes, le Soleil et les planètes tournent encore autour de la Terre. Comment, dans ces conditions, prédire avec suffisamment de précision le passage de la Lune sur le fond d'étoiles ? D'autre part, les gardes temps battent tout juste la seconde à l'aide de lourds contrepoids, qui d'abord, ne sont pas transportables, mais surtout ne garantissent pas la régularité nécessaire à l'observation céleste précise. L'union est consommée entre pratique maritime et théorie astronomique. Mettre le Soleil au centre du Monde offrira la seconde dimension aux navigateurs et aux géographes. L'homme va construire son temps et y subordonnera tout le reste.

# Sensuyuent les eclipses au meridien de Paris.

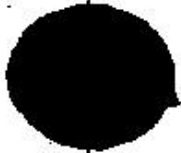
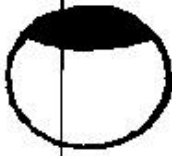


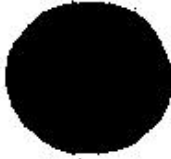



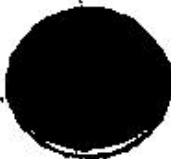


1551.			
Iours Heures Minutes.			
20.	7.	58.	
Februar.			
			
1554.	1555.	1556.	1558.
Iours. Heur. Min.	Iours. Heur. Min.	Iours Heur. Min.	Iours. Heur. Min.
8. 14. 15.	4. 14. 33.	16. 13. 54.	2. 12. 8.
De Decembre.	De Iuing.	De Novembre.	d'Avril.
			
1559.	1560.	1562.	1563.
Iours. Heur. Min.	Iours. Heur. Min.	Iours. Heur. Min.	Iours. Heur. Min.
16. 5. 6.	11. 16. 42.	15. 15. 41.	5. 9. 2.
De Mars.	De Februar.	De Iuing.	De Decembre.
			

FIG. 1.12 – Prévisions des éclipses de Lune selon Gemma Frisius



## Chapitre 2

# Le temps des premières longitudes

*Les valeurs sur lesquelles la société doit s'appuyer sont la science et le commerce.*  
**d'Alembert** - essai sur les gens de lettres et sur les grands - 1759

On ne le répétera jamais assez, ce début de 17<sup>ème</sup> siècle est une période charnière pour l'Homme, pour sa conception du Monde et pour la philosophie naturelle. La science des longitudes n'est pas en reste et les découvertes de Galilée seront à la base d'une esquisse de solution de ce délicat problème. L'horloge céleste idéale pour l'époque, les satellites de Jupiter, n'auront cesse d'être observés, leurs mouvements prédits au sein d'éphémérides dont les premiers furent ceux de D. Cassini en 1668. Cette seconde période s'achève aux abords du siècle des Lumières quand la cartographie se rationalise. Nous allons voir par contre que la navigation hauturière reste problématique. On reprend les idées de G. Frisius concernant les distances lunaires pendant que Huygens fabrique des machines à garder le temps.

### 2.1 Les cadences parfaites des planètes Médicéennes

**L**e problème des longitudes en mer va progressivement devenir aussi célèbre que celui de la quadrature du cercle. Dès la fin du 16<sup>ème</sup> siècle, certains états proposent des récompenses<sup>1</sup> à quiconque apporterait une solution à ce problème. Parmi les nombreux postulants, le plus célèbre fut sans doute Galilée. En 1636, il propose aux États Généraux des Provinces Unies de Hollande une méthode<sup>2</sup> pour déterminer les longitudes en mer. Cette

---

<sup>1</sup>l'Espagne avec Philippe II en 1567, puis Philippe III en 1598, puis la Hollande

<sup>2</sup>Il a déjà proposé sa méthode en 1612, puis 1616 au roi d'Espagne. Il ne put non plus accepter la récompense de la Hollande à cause de ses déboires avec l'Inquisition

proposition est l'aboutissement des recherches de Galilée en ce domaine. Le savant fonde sa méthode sur l'observation des occultations des lunes de Jupiter. C'est en effet dans la nuit du 7 janvier 1610 qu'il observe des choses que personne n'a jamais vues avant lui<sup>3</sup> : les astres Médicéens, ou quatre des huit satellites de Jupiter<sup>4</sup>. Mais c'est seulement en 1612 qu'il notera pour la première fois une éclipse de ces satellites. Quand un satellite entre dans l'ombre de la planète, il disparaît pratiquement instantanément. Si un navigateur pouvait noter l'heure locale d'un tel événement et la comparer à celle à laquelle cet événement est censé se produire au-dessus d'un méridien de référence, la différence en temps donnerait directement la longitude du navire. Comme Gemma Frisius un siècle plus tôt, la mise en pratique d'une telle méthode ne va pas de soi. D'abord, l'observation est particulièrement délicate (nous y reviendrons en détail), et malgré des solutions techniques avancées par son inventeur (un casque muni d'une lunette, le *celatone*), la qualité des optiques (télescopes) est trop faible. Puis, surtout, le calcul précis d'une longitude suppose la possession de tables astronomiques soigneusement établie. Au temps de Galilée, on ne les avait pas encore.

Il faudra alors attendre les travaux de l'astronome Dominique Cassini<sup>5</sup> (1625 – 1722) dont les éphémérides sont publiés en 1668. Ces tables<sup>6</sup> ont la précision nécessaire à l'emploi prévu par Galilée, emploi de grande importance pratique pour améliorer la cartographie terrestre. Pour leur rédaction, Cassini considère comme circulaires et uniformes les mouvements des satellites, mais applique des corrections empiriques issues de ses observations. Il calcule l'inclinaison de leurs orbites par rapport à celle de l'orbite de Jupiter sur l'écliptique, calcul qui lui permet de déterminer avec une bonne précision leurs latitudes par rapport à la planète.

Outre la nécessité d'avoir des tables fiables, il est aussi capital de disposer d'un compteur de temps régulier. Si Galilée ne possédait qu'un simple pendule<sup>7</sup> pour mesurer les périodes de ses satellites, les architectes de la nouvelle carte de France disposeraient de vraies horloges, bâties en partie sur les recherches du physicien hollandais Christiaan Huygens (1629 – 1695). La détermination précise des heures locales via une horloge fiable pourrait constituer une avancée sans précédent dans notre rapport à l'espace.

---

<sup>3</sup>(Koyré, 2001) chap. IV p. 115-137

<sup>4</sup>Les durées de révolution de ces quatre satellites sont brève, 1 jour 18 heures pour le premier, 3 j 13h pour le second, 7j 3h pour le troisième et 16j 18h pour le dernier

<sup>5</sup>(Bònoli and Braccesi, 1996) p. 119-120

<sup>6</sup>Les éphémérides de Cassini ont de plus servi à Römer en 1676 pour mettre en évidence de la vitesse finie de la lumière

<sup>7</sup>(Chareix, 2000) p.176