



NAVIGATION ASTRONOMIQUE

HISTOIRE ET ENJEUX... DE L'ASTROLABE AU GPS

La question du positionnement des navires en mer a mobilisé les plus grands savants pendant près de 500 ans. Elle a finalement été résolue au XVIII^e siècle par les horlogers, au grand dam des astronomes, qui pensaient la résoudre seuls. Puis, une solution réellement pratique pour les marins a été trouvée presque par hasard par un obscur capitaine américain en 1837 et finalisée dans les années 1870. Nous évoquons ici cette aventure humaine et scientifique. D'abord, on rappellera l'histoire et les enjeux astronomiques. Puis on présentera la solution « définitive » du XIX^e siècle et l'avènement du positionnement par satellite.

À partir de la « découverte » de l'Amérique en 1492, les marins européens se sont livrés à une concurrence impitoyable, affrétant des flottes toujours plus importantes, toujours plus loin. Le monde a d'abord été partagé entre Espagnols et Portugais par le traité de Tordesillas : les Espagnols ayant des droits sur les terres situées au-delà de 370 lieues à l'ouest du cap Vert, les Portugais ayant des droits sur l'autre moitié du monde. Mais les autres pays européens ont rapidement tenté de remettre en cause ce partage. En particulier François I^{er} et sa célèbre formule : « *Je voudrais bien voir la clause du testament d'Adam qui m'exclut du partage du monde.* » Dès 1533, le traité est modifié et les terres à découvrir appartiendront désormais à leur découvreur. Pour la France, Jacques Cartier reconnaît le golfe du Saint-Laurent en 1534. L'Angleterre et les Provinces-Unies (Hollande) rentrent dans la course un peu plus tard.

Dans cette compétition effrénée, savoir se positionner précisément en mer constitue un avantage concurrentiel essentiel. C'est en partie dans cet objectif que Louis XIV fonde l'Observatoire de Paris en 1667. Celui de Greenwich est fondé en 1675 avec cet objectif spécifique [1].

Mesurer la latitude

Pour se positionner, la première question, déjà résolue à la date de fondation des observatoires royaux, était celle de la latitude (voir encadré 4, p. 44).

A priori simple, la question pose néanmoins plusieurs difficultés.

D'abord, au XVI^e siècle, la Polaire ne donnait pas un nord aussi précis qu'aujourd'hui (voir encadré ci-dessous). Il fallait donc observer les « gardes » de l'étoile Polaire et pratiquer une correction. Pour ce faire, on utilisait le « régime de la Polaire » ou « roue pôle-homme », ancêtre du nocturlabe (figure p. 42).

Ensuite, à partir de 1471, les navigateurs portugais franchissent l'équateur et l'étoile Polaire disparaît sous l'horizon. L'étoile de référence devient le Soleil, mais il faut en connaître la déclinaison, qui varie toute l'année. Les astronomes élaborent des tables, tel le « Regimento do estrolabio e do quadrante » qui paraît en 1509 au Portugal, mais qui est gardé secret.

1. LA POLAIRE DONNE-T-ELLE LE NORD ? PRESQUE !

Comme toutes les étoiles, la Polaire tourne autour du pôle céleste. À notre époque, l'écart est de l'ordre du demi-degré, mais il était de 3,7° au XVI^e siècle, du fait de la précession des équinoxes, qui fait bouger le pôle céleste sur un cycle de 26 000 ans, avec un mouvement de 1,4° par siècle. β et γ de la Petite Ourse et 5 UMi sont alignées. Au cours de leur rotation autour du pôle céleste, l'angle qu'elles font avec l'horizon permet de savoir si la Polaire est à l'est ou à l'ouest du pôle, et quel ajustement pratiquer.

Coordonnées équatoriales apparentes de la Polaire :

- Le 1^{er} janvier 1600 à 0 h UT : AD = 00 h 23 m 56,1 s - DE = +87° 08' 51"
- Le 1^{er} janvier 2024 à 0 h UT : AD = 03 h 03 m 21,7 s - DE = +89° 22' 11"

Calcul avec le logiciel Cartes du Ciel, catalogue GAIA DR3.

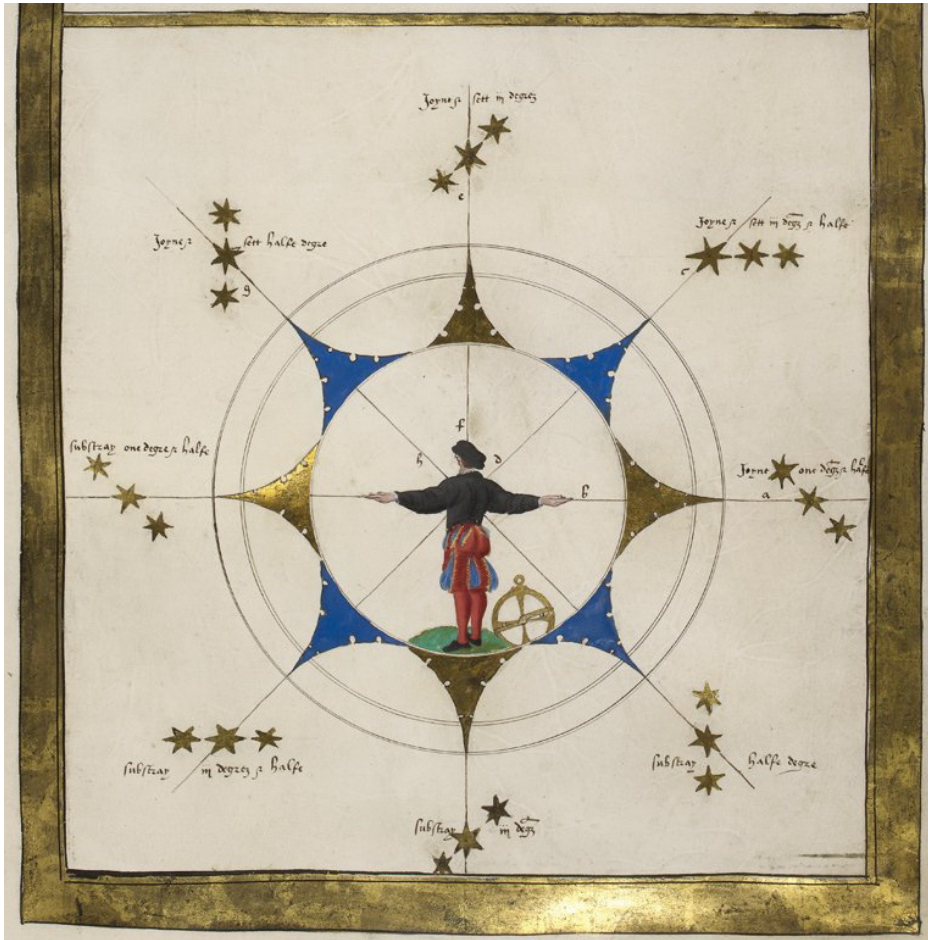


L'instrumentation

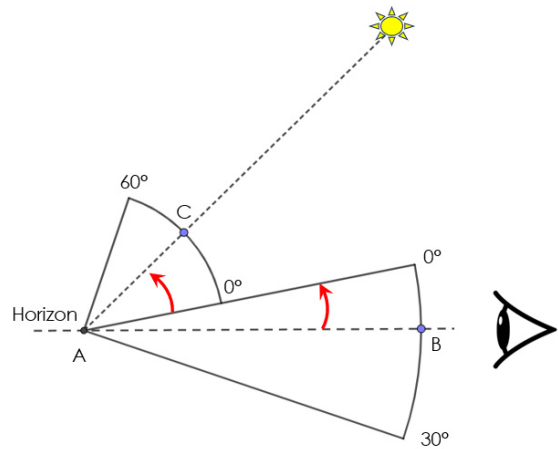
Quelle que soit la qualité des tables astronomiques, la précision de la mesure nécessite aussi un bon instrument. Or, ceux-ci ne seront réellement précis qu'à partir de l'invention du

sextant (voir encadré 2) à la fin du XVIII^e siècle. On donne généralement les instruments précédents comme précis à un degré près. Toutefois, on rapporte des erreurs significatives sur les cartes de l'époque : 3° d'erreur sur la latitude de Madère en 1600, 1,5° sur îles du

Cap-Vert ou celle de Principe en 1614 [2]. Cela permet de comprendre pourquoi les marins étaient attachés au calcul de leur position grâce à l'estime [3], et n'ont adopté la navigation astronomique que quand celle-ci a réellement fait ses preuves.



Régime de la Polaire et roue pôle-homme. En fonction de l'orientation des étoiles de la Petite Ourse, la Polaire est décalée. À gauche, zoom sur la position et lecture de l'indication : « Soustrayez un degré et demi » (*Booke of Idrography*, 1542 John Rotz)

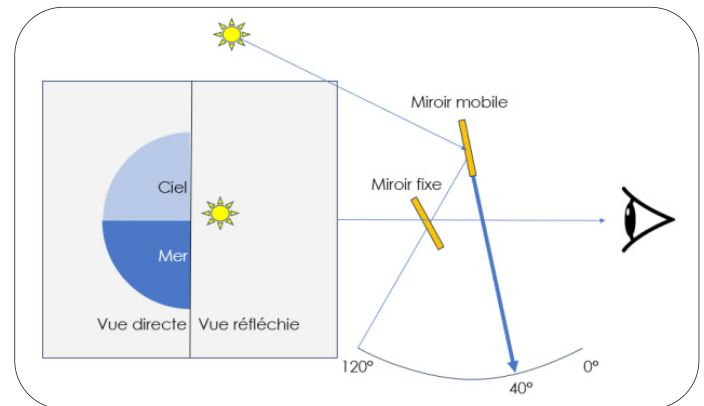
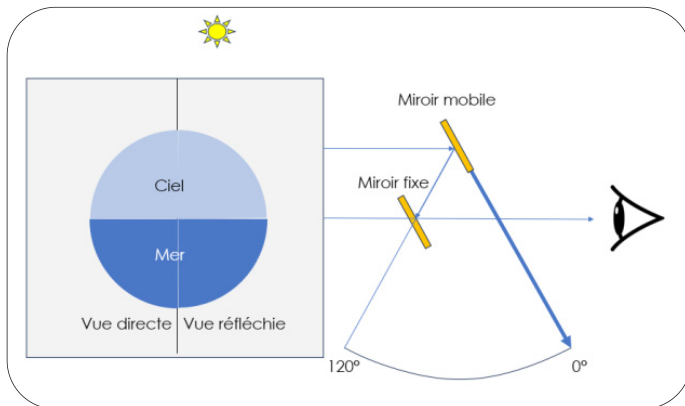


Quartier de Davis 1765, musée de la Marine, Paris [5]. Le quartier de Davis est composé de deux arcs de cercle concentriques sur lesquels coulissent deux pinnules (B et C). En A se situe le « marteau », qui contient une fente. L'observateur déplace B pour voir l'horizon à travers la fente en A. Il déplace C jusqu'à ce que la lumière du Soleil éclaire le marteau A (C contient un « verre ardent » [une lentille]), pour concentrer la lumière. La hauteur du Soleil est égale à la somme des angles mesurés en B et C. Par rapport à ses prédécesseurs (l'astrolabe de marine et l'arbalétrille), l'innovation majeure est que l'observateur tourne le dos au Soleil (d'où son nom anglais : *backstaff*) pour ne pas se brûler la rétine. Le quartier de Davis est l'ancêtre de l'octant.

2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU SEXTANT

Position de départ : les deux miroirs sont parallèles. La vision directe et la vision réfléchie sont fixées sur l'horizon.

Position de mesure : le miroir mobile est incliné jusqu'à amener l'image du Soleil ou de l'astre visé sur l'horizon. On lit alors l'angle sur l'arc de cercle gradué.



Les enjeux pratiques d'une erreur

Se tromper d'un degré en latitude correspond à 60 milles nautiques, soit un peu plus de 111 kilomètres (voir encadré ci-contre), ce qui fait facilement prendre les Bahamas pour la Floride ou Cuba...

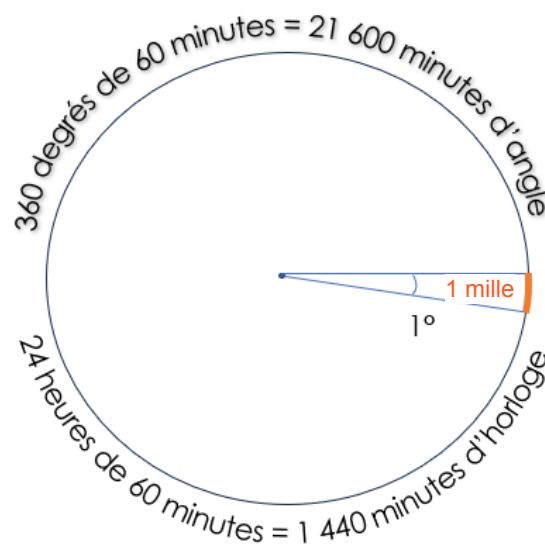
Malgré ces difficultés, surmontables avec de bons instruments et (pour l'hémisphère Sud) une bonne table des déclinaisons solaires, la mesure de la latitude demeurerait possible. À partir de l'invention du sextant, la précision permettait un positionnement suffisamment précis pour les besoins de la navigation.

Mesurer la longitude

La longitude n'est autre que le décalage horaire par rapport à un méridien d'origine. Connaissant l'heure locale, pour déterminer la longitude, il faut donc savoir au même instant l'heure qu'il est au méridien d'origine (voir encadré 7, p. 47).

Dès 1636, Galilée proposa une méthode basée sur l'observation des satellites de Jupiter. Si l'on dispose de tables donnant l'heure des phénomènes (occultation, émergence, etc.), calculée depuis un lieu de référence, leur observation depuis un autre lieu permet de connaître l'heure à l'origine. Connaissant l'heure locale, on en déduit la longitude. Cette solution a été efficace à terre, mais impossible en mer : l'observation des satellites de Jupiter nécessite un

LES ENJEUX DU PROBLÈME



- Le mille nautique est défini comme la distance sur la Terre correspondant à une minute d'angle (un degré égale 60 milles) à la latitude 45° [4].
- La circonférence de la Terre mesure 40 000 km, puisque le mètre a été défini comme un millionième du quart de méridien terrestre.
- Le mille nautique correspond donc à $40\,000 / 21\,600 = 1,852$ km [4].

Minute d'angle, minute de montre et précision de la position

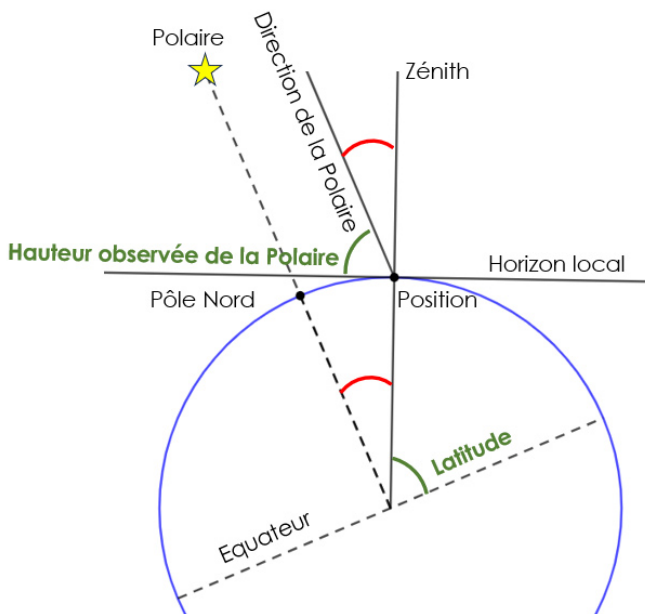
Un tour contient 21 600 minutes d'angle et 1 440 minutes à l'horloge. Une minute à la montre correspond donc à 15 minutes d'angle. Ainsi, la Terre tourne (et les étoiles « fixes » se déplacent) de 15 degrés (900 minutes d'angle) en une heure (60 minutes) à la montre. En une minute, le point substellaire se déplace de $15/60 = 0,25$ degré. Donc, une erreur d'une minute à la montre donnera une erreur de $60 \times 0,25 = 15$ milles nautiques.



4. MESURER LA LATITUDE

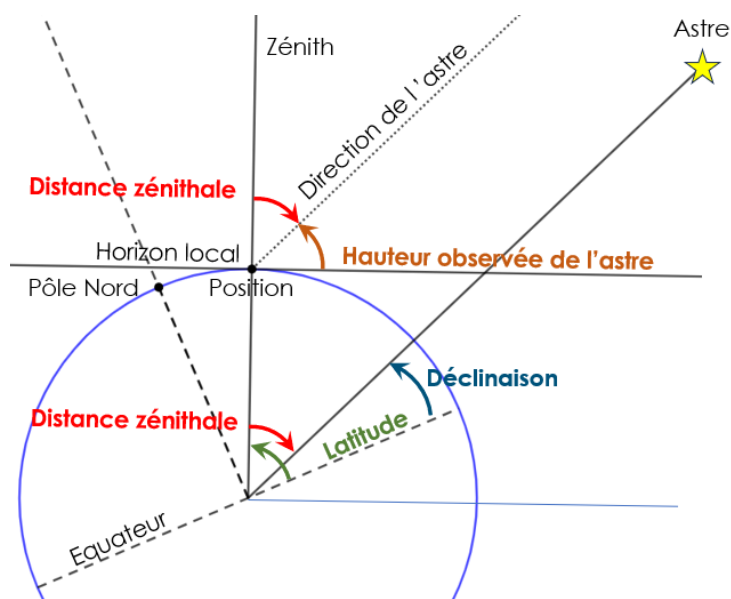
← Par l'observation de la Polaire

- Si la Polaire est assimilée au nord, relever sa hauteur sur l'horizon permet de connaître la latitude du lieu.
- La Polaire est à l'infini, donc sa direction est parallèle à l'axe du pôle.
- Les deux angles rouges sont égaux, donc les deux angles verts, leurs complémentaires à 90°, le sont aussi.



Par l'observation méridienne → d'un astre dont on connaît la déclinaison

- On voit que la latitude est égale à la déclinaison de l'astre plus la distance zénithale, qui est $90^\circ - \text{hauteur observée}$.
- Attention toutefois aux conventions de signe.



fort grossissement que les mouvements du navire rendent impraticable. Les tentatives de suspendre une plateforme d'observation se sont soldées par des échecs.

De même, on a embarqué des horloges très tôt sur des navires, mais leurs balanciers étaient déréglés par les mouvements du navire et leurs mécanismes étaient sensibles aux changements de température et d'humidité, extrêmes entre l'Europe et les tropiques.

Le *Longitude Act*, voté par le Parlement anglais en 1714, promettait un prix de 20 000 livres à celui qui proposerait une méthode de positionnement en mer avec une précision de 30 milles (un demi-degré).

Pour qu'un horloger gagne le prix, il lui fallait donc un chronomètre qui ne dérive pas de plus de 2 minutes sur toute la durée d'une traversée de l'Atlantique (fixée à 42 jours).

La persévérance des horlogers aboutit. Dès 1736, John Harrison, horloger autodidacte anglais, soumet une première montre, baptisée plus tard H1, qui effectue avec succès un voyage de Londres à Lisbonne. Mais c'est insuffisant pour remporter le prix, qui exige une traversée plus longue. Perfectionniste, ce n'est qu'en 1761 qu'il présente sa quatrième montre, H4, qui effectue avec succès un voyage à la Jamaïque. Toutefois, le jury refuse de lui attribuer le prix, estimant qu'il a eu de la chance.

De bonnes et de mauvaises raisons justifient cette décision. On cite souvent l'opposition de l'astronome Maskelyne (1732-1811), successeur de Newton et, comme lui, fervent partisan d'une méthode dite des distances lunaires, plus purement astronomique. Maskelyne était à la fois membre du jury et candidat au prix. Mais il faut reconnaître que la H4 repose plus sur la perfection de sa fabrication,

qui a nécessité quatre ans, que sur une innovation précise. Le jury se montre donc méfiant vis-à-vis de la capacité de reproduction de l'exploit, qui seule est intéressante pour la marine. Et en effet, ce n'est qu'au XIX^e siècle que la technique horlogère permettra de produire en grandes quantités des chronomètres de marine répondant aux exigences de précision de la navigation. Avant cela, ils resteront l'apanage des plus grands navires de guerre, inabordable pour la marine marchande.

L'opposition de Maskelyne est aussi (surtout ?) justifiée par le fait qu'à l'époque de l'exploit de Harrison, il est sur le point de publier de nouvelles tables donnant la position de la Lune avec une précision, selon lui, de l'ordre de 30 secondes d'arc, ce qui lui permet aussi de prétendre au prix avec la méthode des distances lunaires. Et cette méthode est cent pour cent astronomique !

La méthode des distances lunaires

La Lune étant l'astre le plus proche de la Terre, sa vitesse par rapport au ciel (« sphère des fixes ») est la plus élevée : un demi-degré par heure, soit la taille de son diamètre. Elle est donc l'astre dont la position permet de calculer l'heure avec le plus de précision. Si on peut repérer la distance qui la sépare du Soleil dans la journée, ou de certaines étoiles la nuit, et comparer cette distance à une table calculée pour le méridien d'origine, on peut déterminer l'heure au méridien d'origine.

Mais la Lune est sans doute l'astre dont la position est la plus difficile à prédire, compte tenu des perturbations de son orbite causées par le Soleil et les planètes géantes (le problème à n corps). Si Newton publie ses *Principia Mathematica* en 1687, ce n'est qu'en 1713 qu'il publie sa théorie de la Lune, qui permet de faire tomber l'erreur de prévision des tables à moins de deux ou trois minutes. Mais c'est encore plus de cinquante ans plus tard que des tables suffisamment précises pour la navigation sont publiées.

Par ailleurs, il faut disposer d'un instrument capable de faire des relevés précis. Le quartier de Davis (figure p. 42) ne permet d'atteindre qu'une précision d'un dixième de degré, soit 6 minutes. En 1731, l'octant, grâce à son système de miroir, atteint la minute. Le sextant, inventé en 1757, s'imposera. Après diverses améliorations, il peut atteindre un à deux dixièmes de minute et mesurer un angle jusqu'à 120° , distance de la Lune à d'autres astres.

En pratique, la méthode exige de mesurer la hauteur de deux astres (la Lune et un autre astre) et leur distance (soit trois mesures). Mais elle est difficile d'application, car la hauteur mesurée des deux astres n'est que la hauteur apparente, du fait de la parallaxe et de la réfraction atmosphérique. La parallaxe est négligeable pour le Soleil ou une étoile, mais pas pour la Lune, si proche qu'elle peut atteindre un degré. Or, les tables donnent la distance « vraie », calculée depuis le centre de la Terre. Il faut donc « réduire » la distance apparente à la distance vraie, ce qui a constitué le point critique de la méthode, abandonnée au profit des chronomètres devenus fiables.

La méthode moderne

Au début du XIX^e siècle, on procédait donc en deux temps : latitude, puis longitude, et, inévitablement, toute erreur sur la latitude entraînait une erreur sur la longitude. Mais, en 1837, une découverte fortuite par le capitaine Thomas Sumner apporta du nouveau. Il effectuait la traversée de Caroline du Sud à l'Écosse et prépa-



Un officier de la Royal Navy utilisant un sextant, à bord d'un destroyer en mission de protection d'un convoi en 1942. La photo est posée : pour un meilleur éclairage de l'officier, celui-ci ne pointe pas le Soleil, qui est derrière le photographe ! (Imperial War Museum)

rait son atterrissage vers le phare des Smalls, au large du pays de Galles. Ayant subi du mauvais temps, il n'avait pas pu faire de relevé précis depuis plusieurs jours et n'était pas sûr de sa position. Quand il put faire un relevé, entre deux nuages, au lieu de calculer une position, il en calcula trois, en faisant varier sa latitude, incertaine, de 10 minutes à chaque fois. En reportant ses trois positions calculées sur la carte, il constata qu'elles étaient parfaitement alignées [6]. Son trait de génie fut de comprendre que ce n'était pas une coïncidence : l'ensemble des points sur

la Terre d'où l'on voit un astre avec une hauteur donnée à un instant donné forme un cercle, le cercle de hauteur (voir encadré 5). Compte tenu de sa taille, ce cercle est assimilable à une droite sur la carte, la droite de hauteur en France, la *Sumner line* en anglais.

Dans les années 1870, la méthode est finalisée et publiée en plusieurs articles par Adolphe Marcq de Blond de Saint-Hilaire, alors capitaine de frégate. Elle permet de tracer une droite de position, à partir d'une seule observation (voir encadré 6, p. 46).



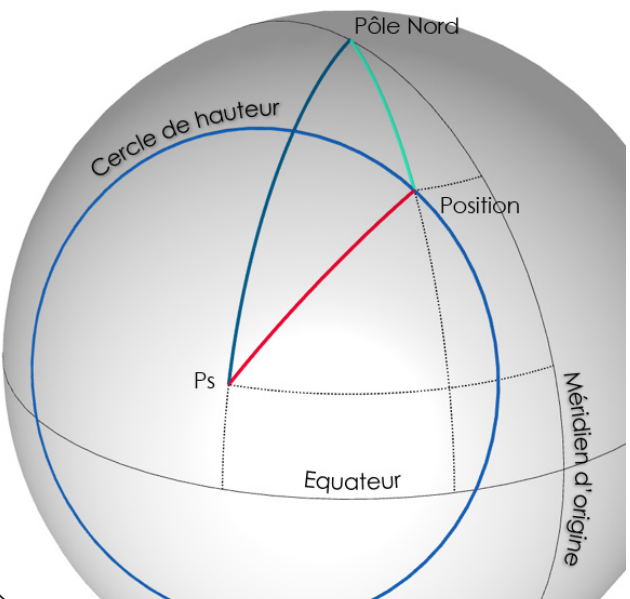
En conclusion, le grand problème scientifique du point en mer n'a pas été résolu par les seuls astronomes, comme ils en avaient l'ambition ; les horlogers et les marins ont joué un rôle important. On parle quand même de « navigation astronomique » et elle a régné sans partage jusqu'au milieu du XX^e siècle.

Ce n'est qu'à partir de la Seconde Guerre mondiale que les premiers systèmes de radio-navigation commencent à supplanter la navigation astronomique. Dans les années 1960, les militaires ont accès aux premiers satellites

de positionnement par effet Doppler (système américain Transit, précision 100 mètres en 15 minutes). Conçu dans les années soixante-dix et accessible au public depuis 1995, le GPS américain marque la fin pratique de la navigation astronomique. La précision métrique instantanée est atteinte : le récepteur n'émet aucun signal, mais calcule sa position en mesurant l'écart entre l'heure reçue de plusieurs satellites dont on connaît la position. D'autres pays ont mis en place des systèmes équivalents : la Russie (Glonass), la Chine (Beidou), l'Europe (Galileo depuis

2016, le seul système cent pour cent civil et le plus précis). Ces systèmes sont largement interopérables.

Mais on sait que le signal peut être brouillé, le système piraté, ou même les satellites endommagés par une éruption solaire. C'est pourquoi un sextant est toujours requis à bord de certains navires [9]. La méthode Marcq de Saint-Hilaire est donc encore enseignée dans la Marine et toujours pratiquée avec plaisir par les navigateurs amateurs. C'est aussi un merveilleux outil pédagogique et un excellent argument anti-platiste. ■

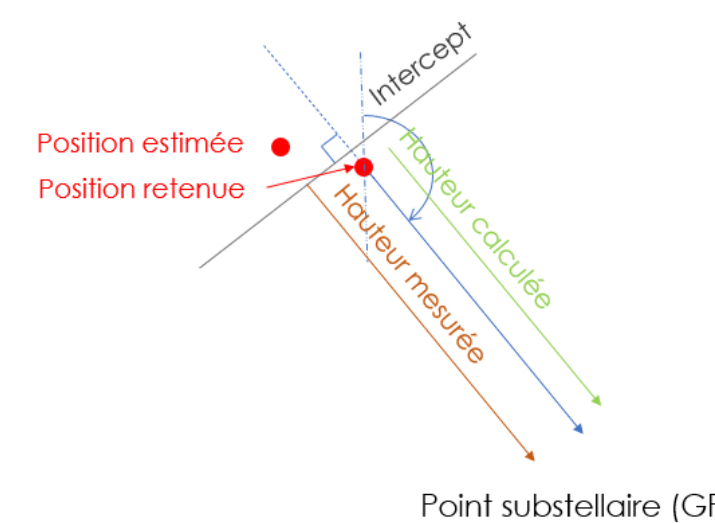


5. LE CERCLE DE HAUTEUR

L'ensemble des points (lieu géométrique) sur la Terre d'où l'on voit un astre à une hauteur donnée à un instant donné forme un cercle : le cercle de hauteur.

La méthode permet de tracer une portion de ce cercle sur une carte. À l'échelle d'une carte marine, l'arc de cercle est assimilé à une droite.

La position estimée sert uniquement à faire les calculs. Une erreur sur celle-ci n'a donc pas d'impact sur le tracé de la droite de position.



6. LE POINT ASTRONOMIQUE

- Par rapport à la position estimée, choisir un point qui facilite les calculs (position retenue [7]).
- Injecter les coordonnées de ce point dans les tables trigonométriques (avec les coordonnées du point substellaire à l'heure de l'observation) pour obtenir l'azimut de l'astre et la hauteur calculée.
- À partir de la position estimée, tracer une droite dans l'azimut calculé.
- Calculer la différence entre la hauteur calculée et la hauteur observée. Si la hauteur mesurée est plus petite que la hauteur calculée, la position réelle est en avant de la position retenue.

Le navire se trouve sur la droite de position (ou droite de hauteur, ou intercept), perpendiculaire à la droite qui passe par la position retenue dans la direction du point substellaire (*Ground Point*, GP). Sa distance par rapport à la position retenue est égale à la différence entre la hauteur calculée et la hauteur observée. Un relevé suffit pour une droite. Avec deux relevés, on a deux droites et la position réelle est à l'intersection des deux droites. Idéalement, on relève deux astres, mais cela peut être le même à deux instants différents, en corrigeant du déplacement.

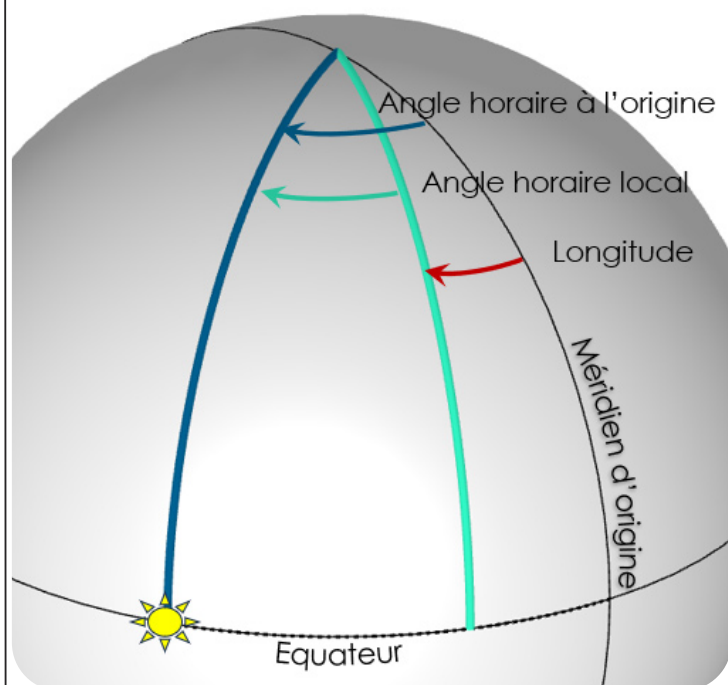
7. MESURER LA LONGITUDE

Théorie

Mesurer la longitude, c'est mesurer l'angle horaire local (si on connaît l'heure à l'origine). En effet, longitude = angle horaire à l'origine - angle horaire local (attention aux conventions de signe).

Illustration : le 21 mars, il est 3 heures à Greenwich (méridien d'origine). Le Soleil est à la verticale de l'équateur, à une distance de 45° à l'ouest du méridien de Greenwich [8].

S'il est 2 heures pour moi (Soleil à 30° à l'ouest), je suis sur le méridien bleu clair et ma longitude est 15° ouest.



On peut donc calculer l'angle horaire local et connaissant l'angle horaire à l'origine (grâce au chronomètre, ou grâce à la méthode des distances lunaires), on en déduit la longitude.

Mais toute erreur sur la latitude a un impact sur la longitude. La méthode Marq de Saint-Hilaire, plus astucieuse, résout ce problème.

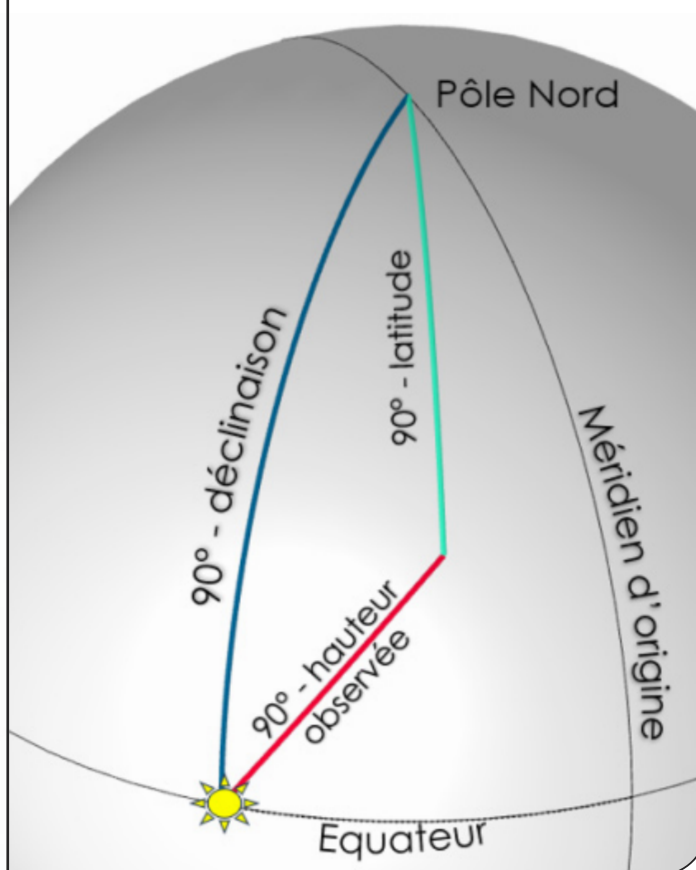
Pratique au XVIII^e siècle

La mesure de l'azimut du Soleil est imprécise en mer. En revanche, sa hauteur est mesurée très précisément au sextant.

On détermine :

- la déclinaison de l'astre, grâce aux éphémérides
- la hauteur de l'astre mesurée au sextant
- la latitude, mesurée avec la Polaire.

On connaît donc les trois côtés du triangle sphérique.



1. Extrait de l'acte fondateur : « *Apply himself with the most exact care and diligence to the rectifying of the tables of the motions of the heavens, and the places of the fixed stars, so as to find out the so much desired longitude of places for the perfecting of the art of navigation.* »

2. Ségéric Jean-José, *Histoire du point astronomique en mer*, Marine Éditions, 2013.

3. L'estime consiste à déduire sa position du cap et de la distance parcourue depuis la dernière position. Les vents et les courants rendent cette méthode peu précise en mer.

4. Compte tenu de l'aplatissement de la Terre aux pôles, le mille nautique mesure 1 862 m aux pôles et 1 843 m à l'équateur, soit un écart de 0,5 % assez négligeable avant le XX^e siècle. La question de « la Figure de la Terre » est tranchée au début du XVIII^e siècle par les expéditions en Laponie (Maupeituis) et au Pérou (La Condamine).

5. Crédit photo : Rama, Wikimedia Commons, Cc-by-sa-2.0-fr.

6. Cela était théoriquement suffisant pour sa découverte, mais cet alignement avait

une particularité : il donnait la direction dans laquelle il allait (le phare). Ayant navigué dans cette direction, il arriva effectivement en vue du phare, ce qui constituait la preuve expérimentale de la réalité de sa découverte.

7. Puisque la position estimée n'est pas importante, autant en prendre une qui facilite les calculs ! C'était important avant l'arrivée des calculatrices et des ordinateurs, car en prenant un chiffre rond, on évitait les interpolations dans les tables.

8. Pour simplifier, on néglige l'équation du temps qui fait que le 21 mars à midi TU, le Soleil n'est pas tout à fait à 45° ouest. De même, on néglige le fait que l'équinoxe ne se produit pas nécessairement à midi, heure de Greenwich. Le Soleil n'a donc pas une déclinaison strictement nulle. Ces ajustements nécessaires sont faciles à effectuer et ne changent pas le raisonnement.

9. En France, les navires s'éloignant de plus de 200 milles d'un port et couverts par l'arrêt du 23 novembre 1987 relatif à la sécurité des navires et à la prévention de la pollution doivent avoir un sextant à bord.