

Histoire de l'Astronomie

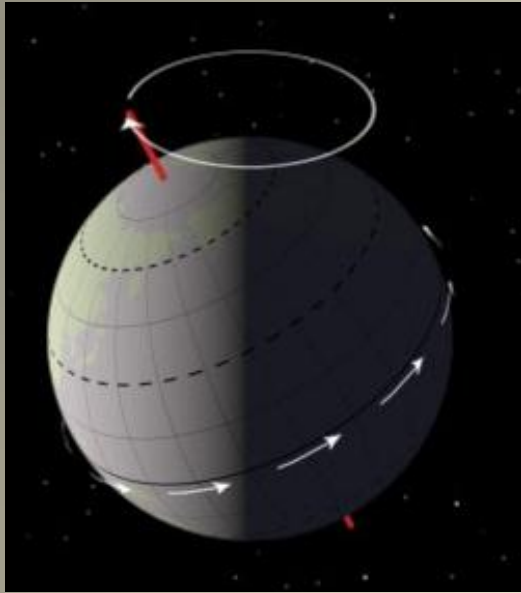
2^{ème} partie

Rappel du 7 octobre

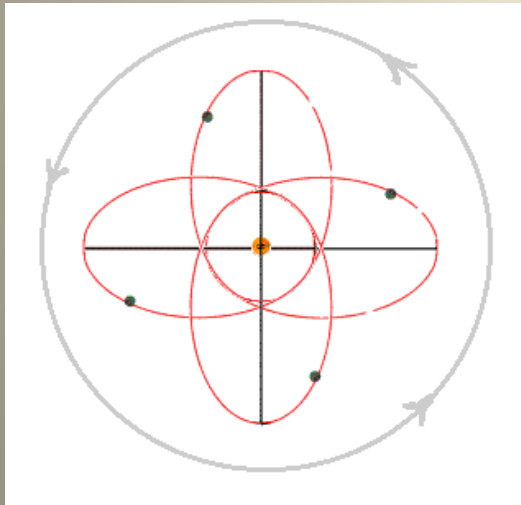
- Le Calendrier (version civile)
- Le calendrier (version astronomique)
- **Bref rappel sur l'orbite de la terre et ses paramètres orbitaux (influence sur les saisons)**

Pourquoi les saisons ne sont pas toujours identiques (20^{ème} siècle)

**Le système solaire obéit à un régime chaotique,
y compris les orbites planétaires et les
paramètres orbitaux de toutes les planètes
prises individuellement**

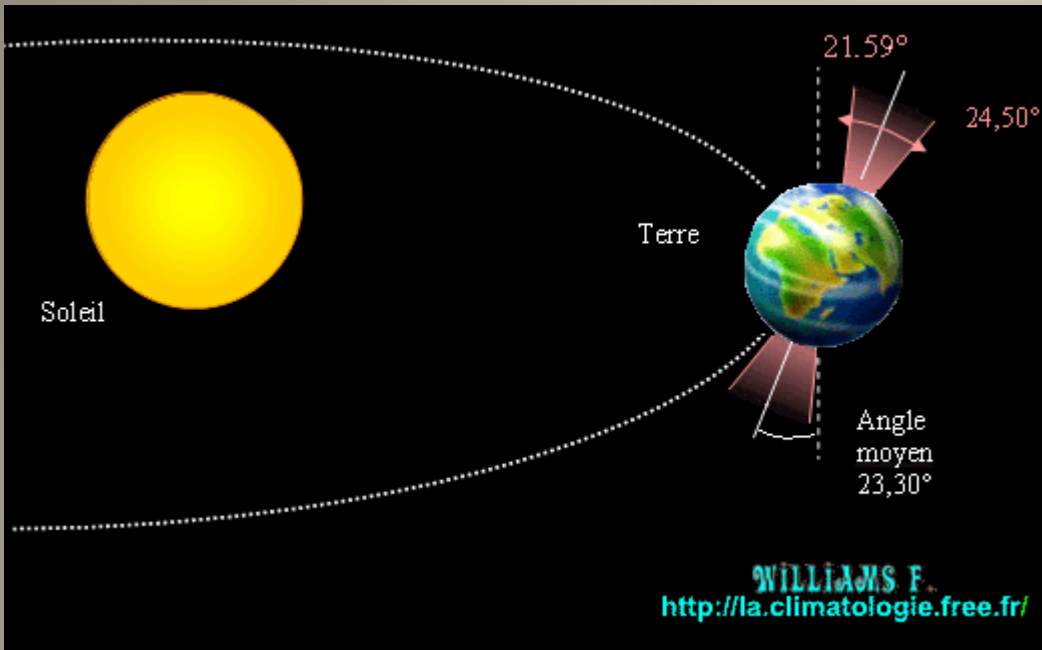


A cause de la non-sphéricité de la terre, le soleil et la lune font précéder l'axe de la rotation de la terre (période 25 800 ans)

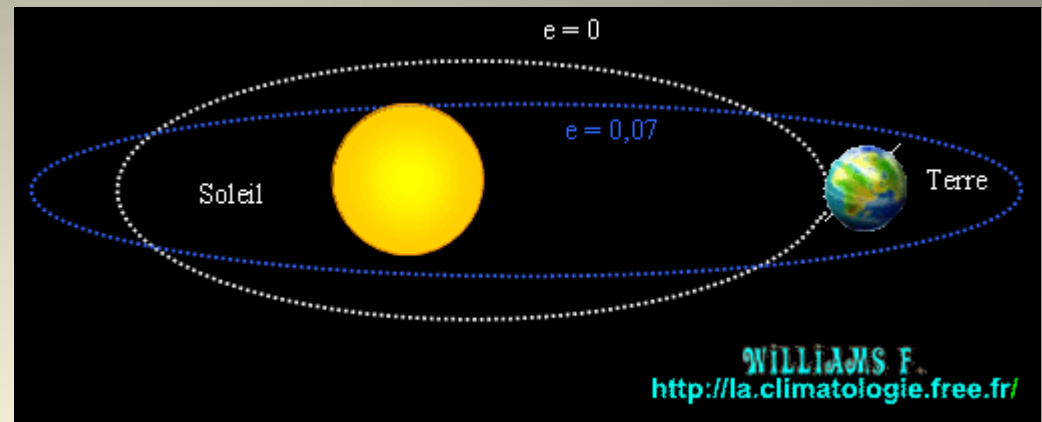
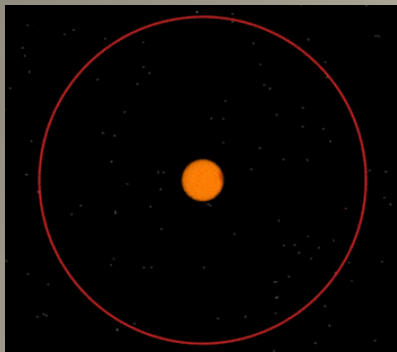


Rotation du plan de l'orbite (précession du périhélie) avec une période de 21000 ans.

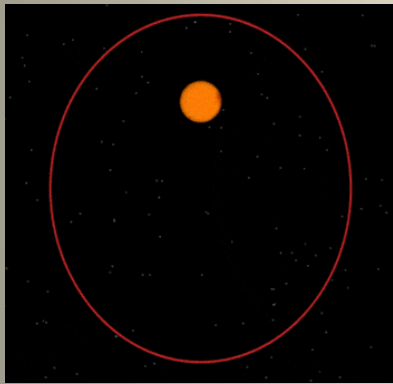
Actuellement, solstice d'été proche de l'aphélie (été tempérés et hiver moins froids pour l'hémisphère Nord; inverse pour le Sud)



L'obliquité de la terre varie entre 22° et $24^{\circ} 50'$ (actuellement $23^{\circ} 26'$) avec une période de 45000 ans. Origine: l'attraction de toutes les planètes et corps du système solaire



Excentricité nulle de l'orbite terrestre

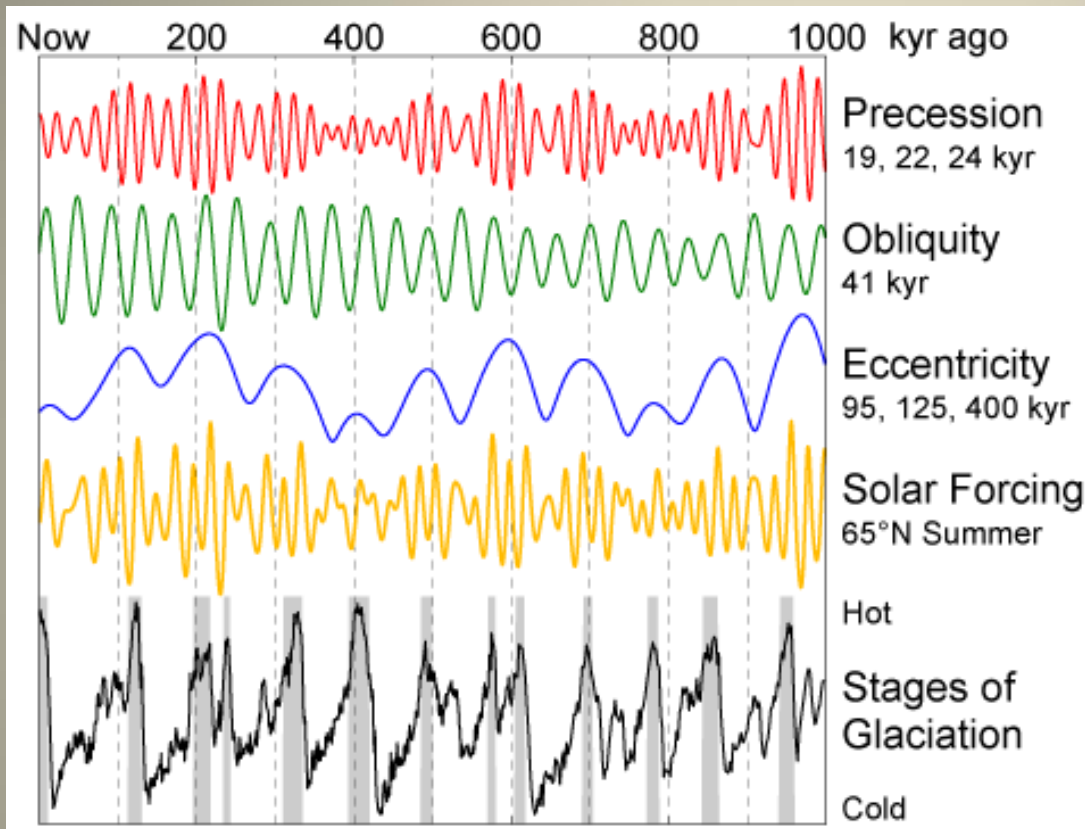


L'attraction gravitationnelle des autres planètes tend à déformer le mouvement elliptique de la terre autour du soleil (e varie entre 0 et 0.06. Actuellement = 0.017)

Excentricité maximale

L'excentricité est l'un des facteurs les plus importants dans les changements climatiques naturels puisque la Terre au périhélie peut recevoir de 20 à 30% d'énergie de plus qu'à l'aphélie.

Conséquence: Les Cycles de Milankovitch



Variation de l'énergie solaire reçue sous les hautes latitudes au cours de l'année

Différences de température entre continents et océans à cause de l'albédo

Variations sur les changements de saison

Différences de température entre les hémisphères

Contenu du cours (2ème partie)

La nécessité

- La cartographie (La longitude)
- La cartographie (La terre étalon)
- L'équation du temps (le temps étalon)

La cartographie

Version Maritime

- Dans le temps nul besoin de faire le point mais nécessité de cartographier les voyages (portulans - le plus ancien date de 1290) basé sur le **cabotage**
- Les premiers explorateurs des immensités océaniques furent les nomades qui peuplèrent l'océan pacifique (3500 av J.C.?)
- Phéniciens les plus grands navigateurs de nos contrées (tour de l'Afrique?) puis les Vikings mais connaissances transmises par voie orale.
- **Le guidage par les étoiles a toujours joué un rôle prépondérant**

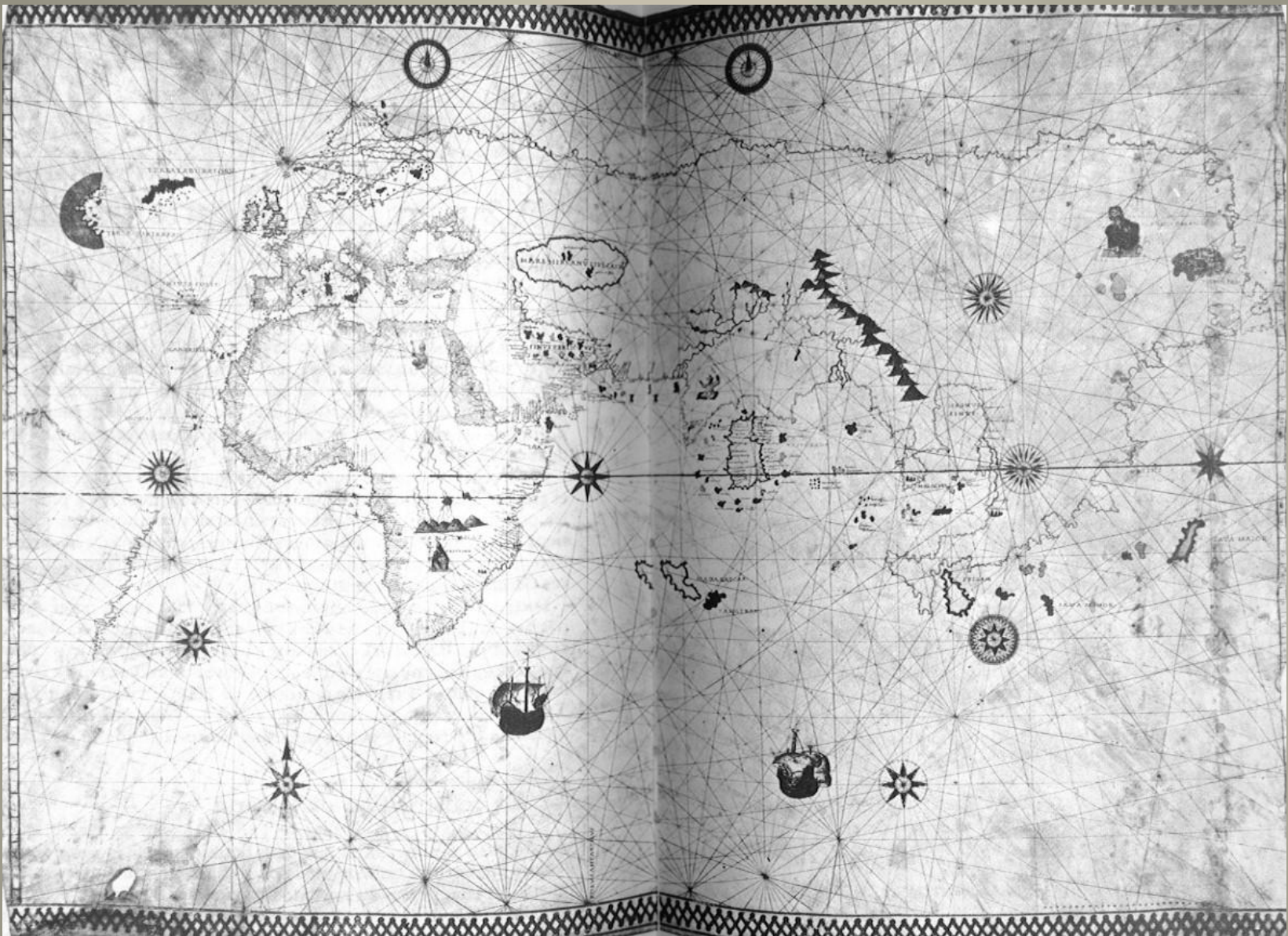


Portulan de Vesconte Maggiolo (1541) Europe, Méditerranée et Afrique du Nord

Savoir géographique du moyen âge est celui de la Géographie de « Ptolémée » (2^{ème} siècle)

Durant ce temps la science islamique brilla d'un vif éclat:

- alidade, astrolabe, cadran solaire
- termes de cosmographie comme azimuth, nadir, zénith,
- noms de beaucoup d'étoiles (aldébaran, Altair ..)
- L'algèbre et les chiffres arabes
- Ils ont eu des contacts avec les chinois et en ont rapporté l'usage du compas
- Ils ont ouvert la voie à Copernic; toute leur connaissance a transité par les vénitiens.
- **Une chose demeure: l'ignorance par tous ces grands marins de la longitude du lieu.**



Carte du Monde de Hamy-King 1502



Carte du Monde de Amerigo Vespucci en 1526

Le problème du point en mer

Latitude pas trop difficile : hauteur du pôle ou du soleil.

Longitude difficile: rotation de la terre et déplacement en longitude se mélangent

- Colomb utilisa la méthode d'Hipparque sans succès (Position de la Lune).
- La longitude nécessite des mesures temporelles: Notre longitude par rapport à un méridien de référence est la différence entre notre heure solaire et l'heure solaire au même instant au méridien de référence

Ce n'est qu'au 16^{ème} siècle que ce problème passa au premier plan des recherches astronomiques: Cela devint le fameux problème de la

LONGITUDE

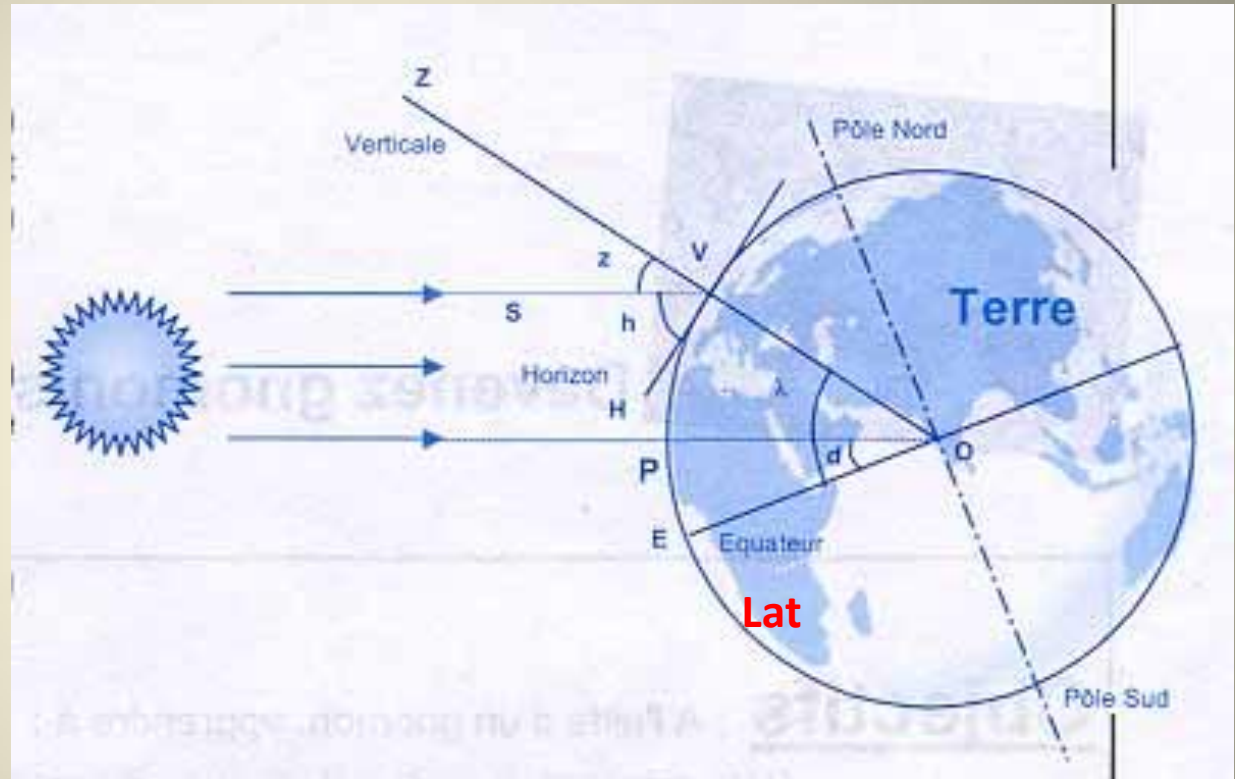
24h pour 360° => 15° pour 1h => 15' pour 1mn => soit 1' d'arc (1 mille à l'équateur) pour 4s de temps

Mesure de la Latitude d'un lieu utilisation du soleil

$$Z=90-h=Lat-d$$

d est la déclinaison

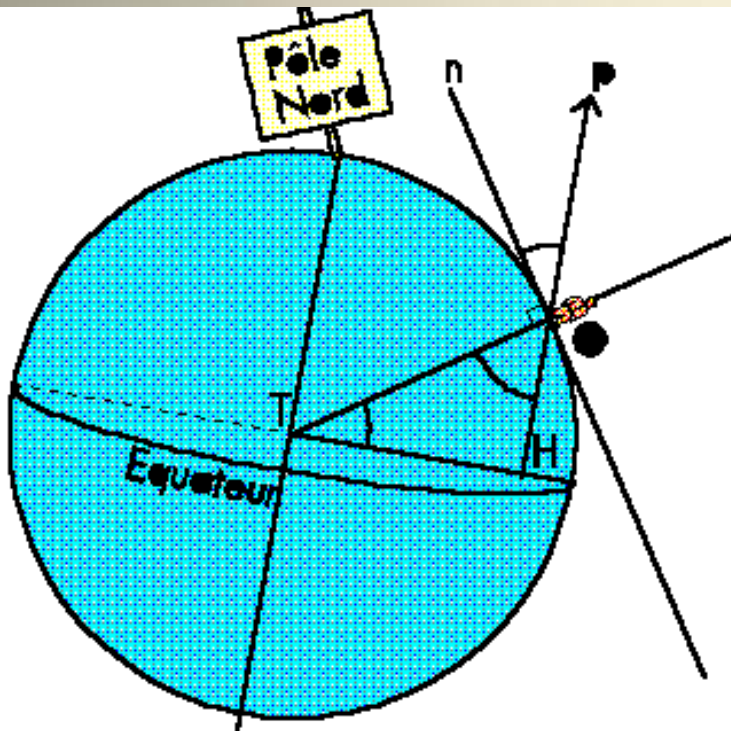
h est l'élévation



$$\text{Donc Lat} = 90 - h + d$$

A l'équinoxe $d = 0$ et $\text{Lat} = 90 - h$

Mesure de la Latitude d'un lieu utilisation de l'étoile polaire

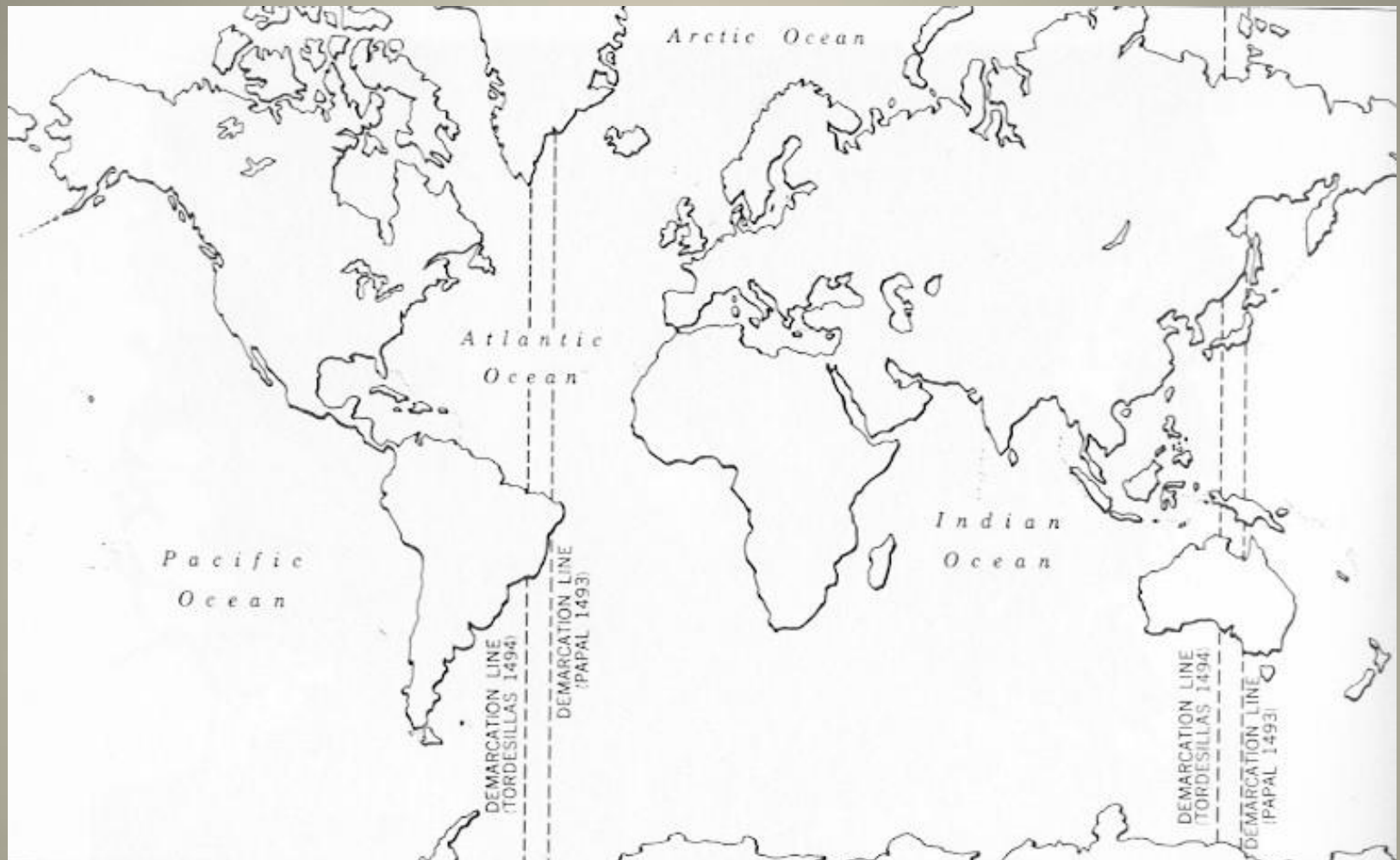


La latitude c'est l'angle HTO.

On vérifie sur cette figure que c'est aussi l'angle $p\hat{O}n$ où n est la direction de l'horizon Nord et p la direction du Pôle Nord Céleste.

Pour déterminer sa latitude, il suffit donc de mesurer la hauteur de la Polaire au dessus de l'horizon.

Les navigateurs de l'hémisphère Nord ont très rapidement utilisé cette méthode.



Partage du nouveau monde entre Espagne et Portugal

Comment faire pour résoudre ce problème?

- Deux possibilités:
 - Disposer d'un signal universel qui se produit ne même temps pour toute la terre et dont on sait à l'avance à quelle heure il doit avoir lieu sur le méridien de référence (Eclipses de Lune, Eclipses des satellites de Jupiter (17^{ème} siècle) sur terre et déplacement de la lune sur le fond des étoiles au 18^{ème} siècle ou mieux la TSF)
 - Disposer de l'heure du méridien en disposant d'un garde-temps (chronomètre) très précis.

Mobilisation générale

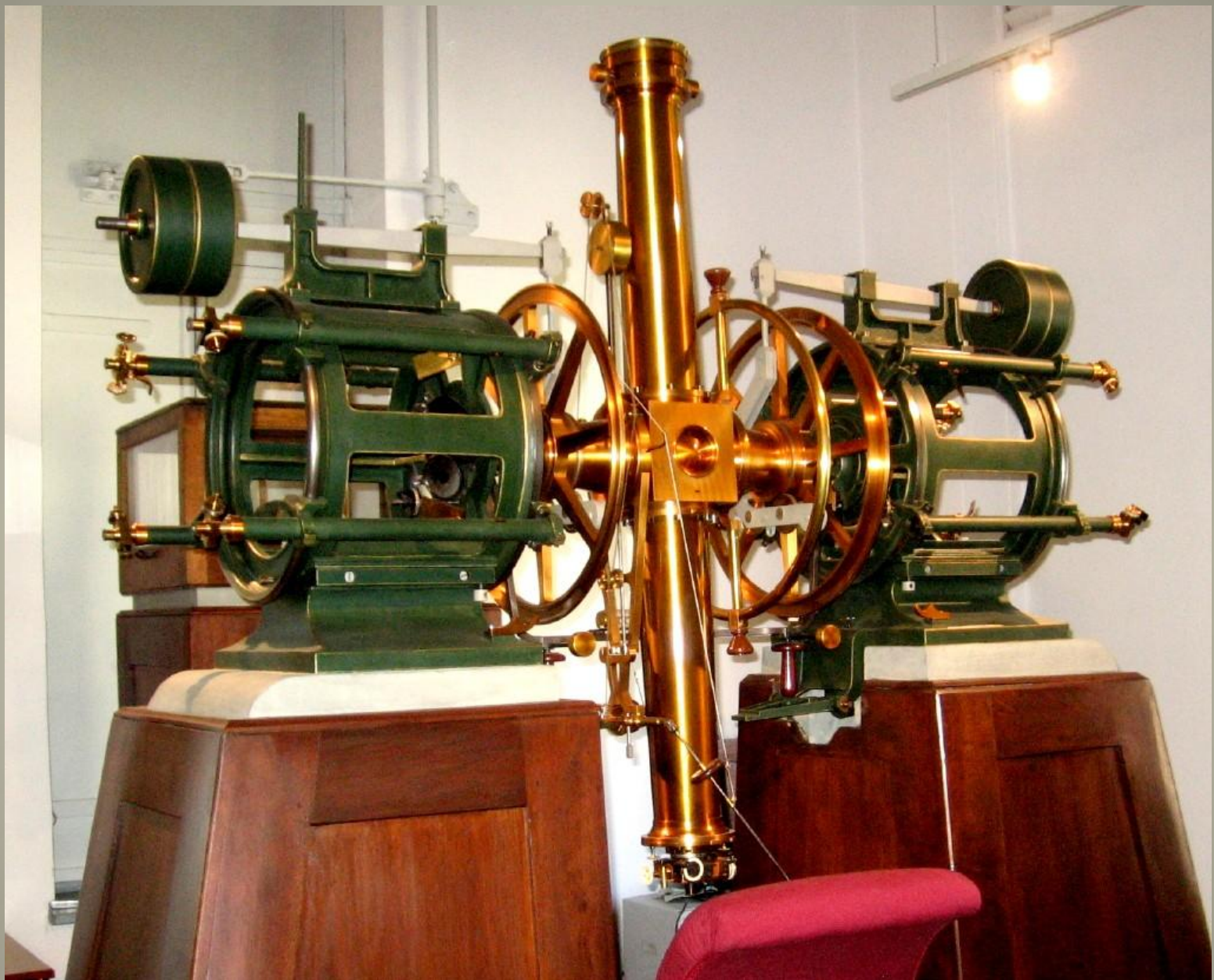
- Navigation se faisait avec le compas et l'estime mais aussi avec la mesure de la latitude (hauteur de la polaire mais aussi du soleil dont les éphémérides commençaient à être publiées)
- Les naufrages (« invincible armada en 1588 ») et autres difficultés en mer, sont à l'origine du lancement des programmes scientifiques richement dotés pour découvrir la longitude (Espagne: 16^{ème} siècle, Portugal, Venise, Pays-Bas au 17^{ème}): sans succès à part la proposition de Galilée (occultation des satellites de Jupiter) qui était trop difficile à mettre en œuvre en mer
- Du coup adoption d'une démarche générale beaucoup plus volontariste: fondation d'observatoires (Leyde, Paris, Greenwich etc..) et de mettre les astronomes sur le sujet (recueil des coordonnées des étoiles).
- Mais aussi incitation de développer des horloges précises et « portables »

Première méthode

- Prédire la course de la Lune et disposer d'un catalogue précis de la position des principales étoiles, il suffit « tout simplement » de connaître la distance lunaire (angulaire) à ces étoiles
- Trois difficultés:
 - Prédire le mouvement de la lune avec précision (répétition tous les 19 ans)
 - Avoir un catalogue précis de la position des étoiles pour positionner la lune par rapport aux étoiles
 - Avoir un instrument portable pour faire les mesures d'angle entre la lune et les étoiles et faire la correction de la parallaxe lunaire
 - Il fallait en plus de bonnes cartes des cotes avec la longitude et latitude exacte des ports, caps, îles, écueils.. (cartes non fiables jusqu'à la fin du 17^{ème} siècle)



Ancêtre du sextant (Observatoire de Bordeaux)



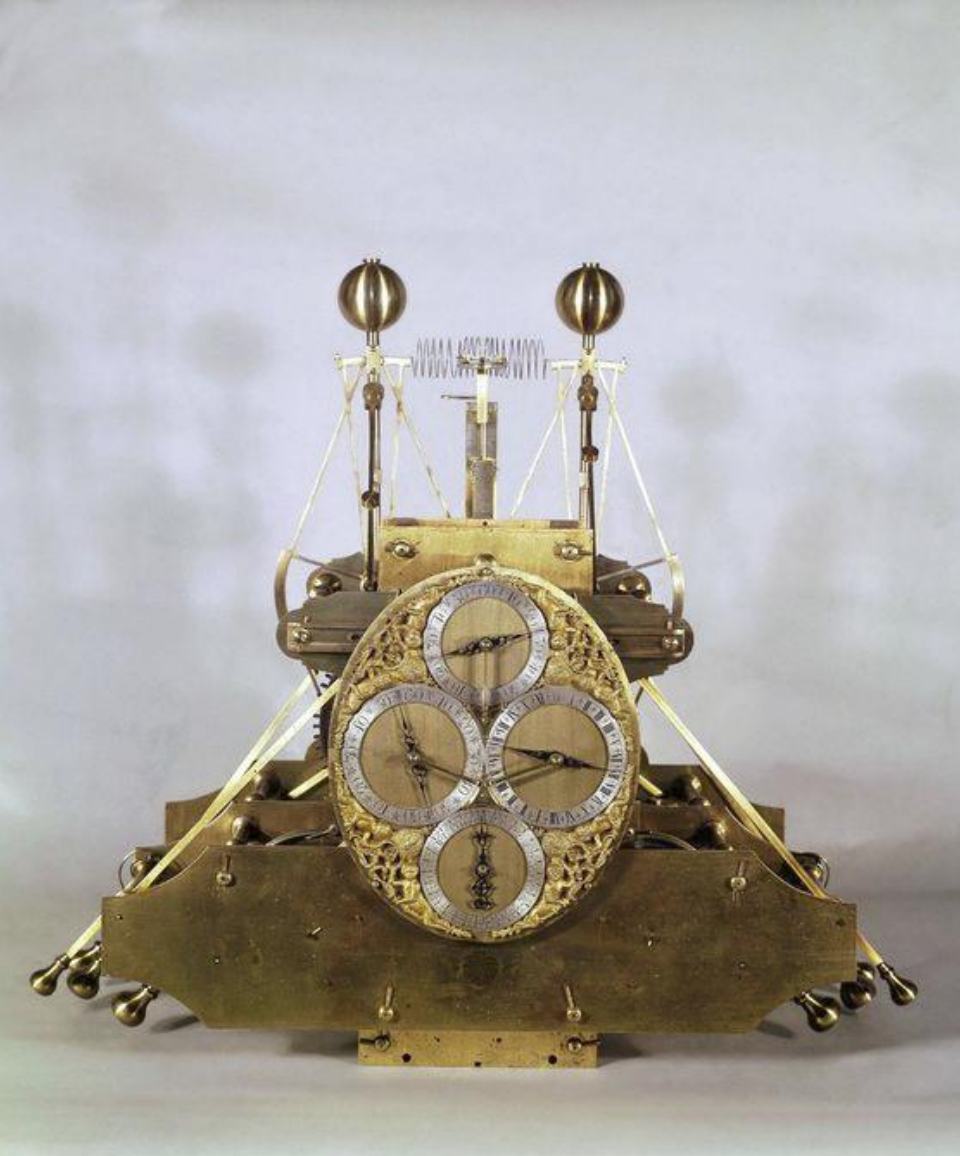
Lunette Méridienne

L'utilisation de la Lune

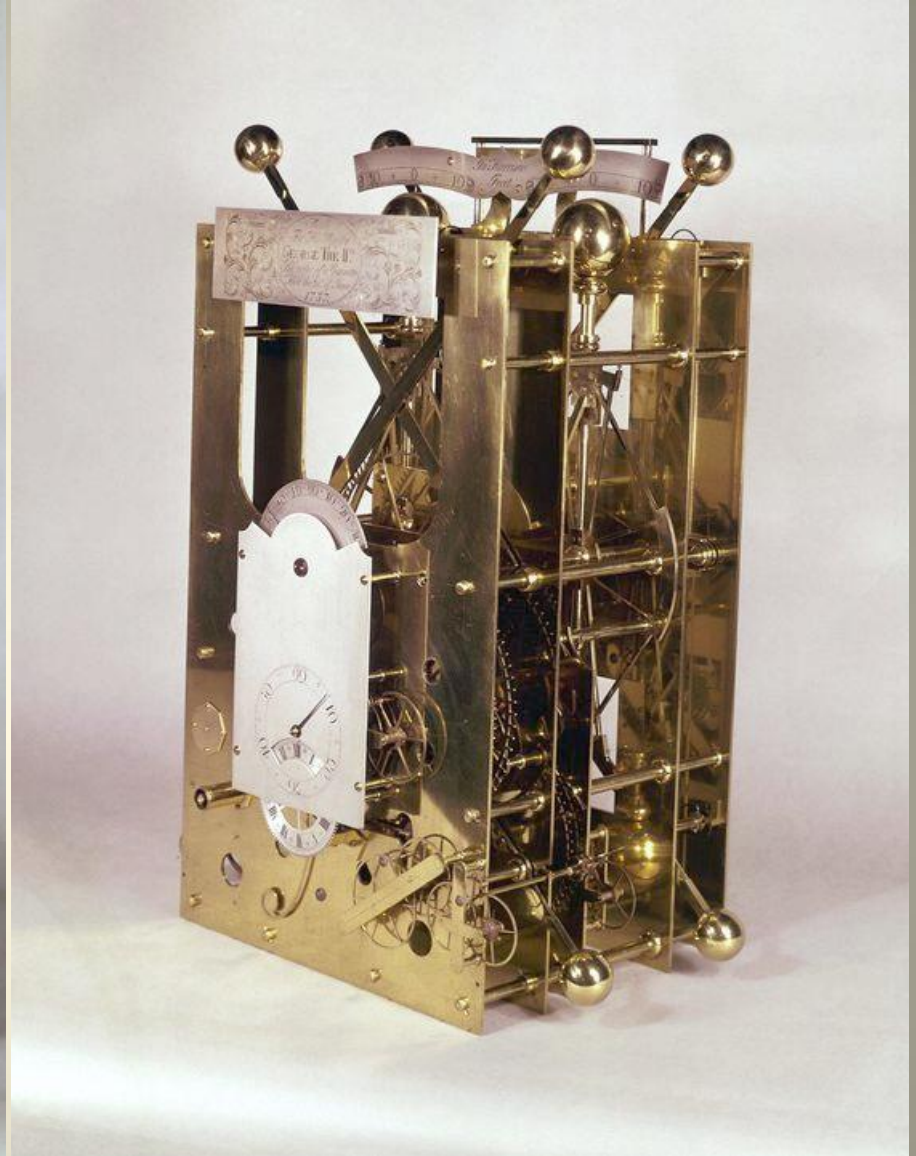
- **Flamsteed** (coordonnées des étoiles avec une lunette méridienne)
Huyghens, Cassini (irrégularités des satellites de Jupiter: explication par **Roemer**) **Richer** (triangulation de Mars sur le fond des étoiles donna la taille du système solaire et permit d'estimer la vitesse de la lumière) .
Amélioration spectaculaire des cartes des cotes françaises grâce à la mesure de la longitude obtenue par la méthode de Galilée (plusieurs échelles de longitude) protestation de Louis XIV!
- **MAIS toujours pas de méthode « idéale ».**
- Après la catastrophe des Scilly (1707) l'Angleterre promet 20000 livres pour le découvreur de la Longitude: Résultat: publication du catalogue de **Flamsteed** et calcul de la trajectoire de la lune par **Mayer** (Gottingen) en utilisant les observations de **Halley** et la théorie de **Euler**. L'ensemble est à l'origine du Nautical Almanac qui assura la suprématie maritime britannique à la fin du 18^{ème} siècle. D'autant que le **sextant** venait d'être mis au point par **Hadley**. On avait enfin résolu le problème de la longitude avec les occultations d'étoiles par la Lune
- **MAIS...**

L'utilisation du chronomètre et du soleil!

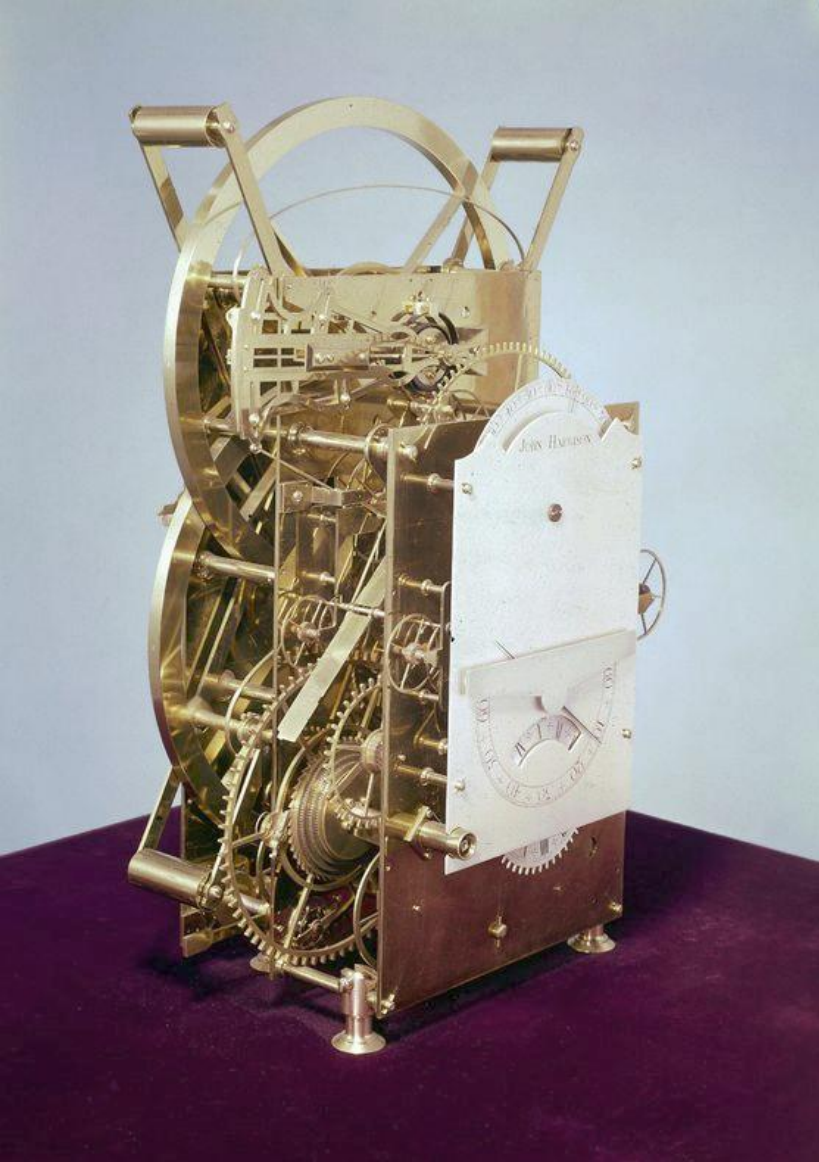
- « Relever » le midi solaire là où on se trouve et comparer avec l'heure au méridien « origine » (besoin des éphémérides du soleil, corrections diverses etc.)
- Le chronomètre: **John Harrison** mettra au point des chronomètres transportables d'une précision remarquable, chronomètres qui ont équipé, La Pérouse, Bougainville, d'Entrecastaux, Cook ou encore Bligh..
- Le « Longitude Board » sera indirectement responsable de la création du Bureau des Longitudes dont Henri Poincaré fut un des directeurs



H1 en 1735 (hauteur 67 cm)



H2 en 1739 (hauteur 68 cm et 40 kg)



H3 en 1757 (hauteur 62 cm)



H4 en 1759 (13cm de diamètre)



Chronomètre de Marine en 1815

- C'est donc le **chronomètre et le soleil qui ont gagné**. La prime gagnée par John Harrison ne lui sera payée qu'après sa mort!
- Le temps et la simultanéité ne sont pas des données immédiates de la conscience mais des conventions nécessairement soumises à des protocoles expérimentaux (Henri Poincaré in « La science et l'hypothèse »)

GPS doit être corrigé d'effets relativistes: Les horloges avancent de $38 \cdot 10^{-6}$ s alors que leur précision est de $5 \cdot 10^{-8}$ s correspondant à 15m de la lumière!

La cartographie

**Version Terrestre ou la Terre comme
étalon de mesure**

Rappels

- Nombreuses preuves de la sphéricité de la terre et cela depuis l'antiquité: navires, montagnes, éclipses..
- Taille de la terre par Erathostène (3^{ème} siècle) résultat perdu mais refait par Poseidonios (qui trouva une valeur plus faible)
- Carte du monde:
 - de Ptolémée: va de Gibraltar aux Iles de la Sonde
 - En 1492 contient l'océan indien et les cotes d'Afrique
 - En 1507, l'Amérique y est inclus
- Immense effort pour cartographier les cotes



Carte du monde selon Ptolémée



Carte du Monde de Amerigo Vespucci en 1526

Pourquoi mesurer un méridien?

Sur terre les distances doivent être exprimées dans les unités usuelles (sur mer seul l'angle a de l'importance: mille nautique= minute de latitude à 45° soit 1852 mètres)

- On doit donc connaître la taille de la terre avec précision, pour « calibrer » les distances usuelles. C'était d'ailleurs le problème d'Erathostène (il avait un angle mais comment le convertir en distance?)
- Il fallait donc mesurer un arc de méridien mais cette fois avec une plus grande précision (1% ou mieux soit mesurer au moins 100 milles car les visées astro ont une précision de 1 minute = 1mille)

Mesures d'un méridien (1 degré de Lat)

- Chine en 724 par Yi Xing cartographe
- Bagdad en 830 par Al Quarismi (méridien vers Ninive) mathématicien
- Au 16^{ème} siècle Jean Fernel entre Amiens et Paris avec un carrosse.
- Mesure par triangulation dès le début du 17^{ème} par Snellius (Hollande), Norwood (Angleterre), Picard (France)
- Beaucoup d'autres campagnes en Europe
- Dispersion des mesures = 3% ce qui est mauvais
- Cassini II et La Hire réalise la mesure d'un arc de 8 degrés entre Collioure et Dunkerque entre 1682 et 1718 (base de la cartographie de la France)

La forme de la terre

- La terre est-elle aplatie (pamplémousse) comme prédit par Newton mais aussi un pendule bat plus lentement à l'équateur.
- ou pointue aux pôles comme semblait indiquer la mesure de l'arc de la méridienne en France.

Grande controverse sous Louis XV: Newton a-t-il raison ou tort?

- Décision de mesurer un arc à l'équateur et au pôle (1736: Godin, La condamine et Bouguer en Equateur et Maupertuis en Finlande) Une autre en 1752 partira au cap de Bonne Espérance

**Vous avez confirmé en ces lieux plein d'ennuis
ce que Newton trouva sans sortir de chez lui**

Voltaire qui saluait ainsi la mission de Maupertuis près du cercle polaire

Système de mesure universel

- Prise de conscience de la nécessité de définir un système de mesure unique basé sur la « nature » à cause de la multiplicité des mesures existantes!
- Proposition pour définir le mètre: Comme les marins le baser sur la taille de la terre (**$1/10^7$ du méridien**)
- Tentative d'associer d'autres pays à la définition (longueur du pendule qui bat la seconde)
- La France, seule, en 1791 définit le mètre à partir de la $1/10^7$ partie d'un quart de méridien. Le mètre « étalon » fut adopté le 7/04/1795

Le mètre



- On décida de recommencer la mesure du méridien au milieu des turbulences de la révolution (Delambre et Mechain). Le résultat sera entériné par une commission internationale à la fin du 18^{ème} siècle qui confirmera les mesures précédentes. Le mètre « étalon » en platine fut définitivement créé en 1799.
- En 1889 on redéfinit le mètre comme la distance entre deux points sur une barre d'un alliage de platine et d'iridium.
- En 1960 c'est 1650763.73 fois la longueur d'onde d'une radiation orangée émise par le krypton 86.

Actuellement: Le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de $\frac{1}{299\,792\,458}$ seconde. Elle est basée sur la vitesse de la lumière qui est connue avec une très grande précision et qui est une constante universelle

L'équation du temps

La terre tourne t'elle rond?

Le problème du temps

- On utilise le système duodécimal égyptien (base 12) et sexagésimal babylonien (la révolution française a bien essayé de décimaliser tout cela..)
- La terre tourne en 24 heures de soleil moyen et en 23h56mn par rapport aux étoiles
- Le problème n'est pas de mesurer la durée du jour (quoique..) mais de la diviser. Or il n'existe aucun repère naturel pour cela.

La division du jour

- Division naturelle entre jour et nuit! Pendant longtemps les heures de jour et de nuit n'étaient pas égales (dans l'hémisphère nord plus courtes au printemps et en été et plus longues en automne et en hiver)
- Le jour commençait soit au lever du soleil (hébreux, grecs, romains, babyloniens) soit au coucher (islam et europe centrale); Les astronomes préfèrent les jours juliens (début à partir du 1^{er} janvier 4713 av JC à midi). A la fin du 19^{ème} le début est à 0h.
- La division de la journée en 24h (soit 12 h de nuit et 12h de jour) vient des décans stellaires égyptiens (décan correspond à un lever héliaque d'étoile).
- Tracé de l'ombre des « gnomons » pour indiquer l'heure, se transforme ensuite en cadran solaire.



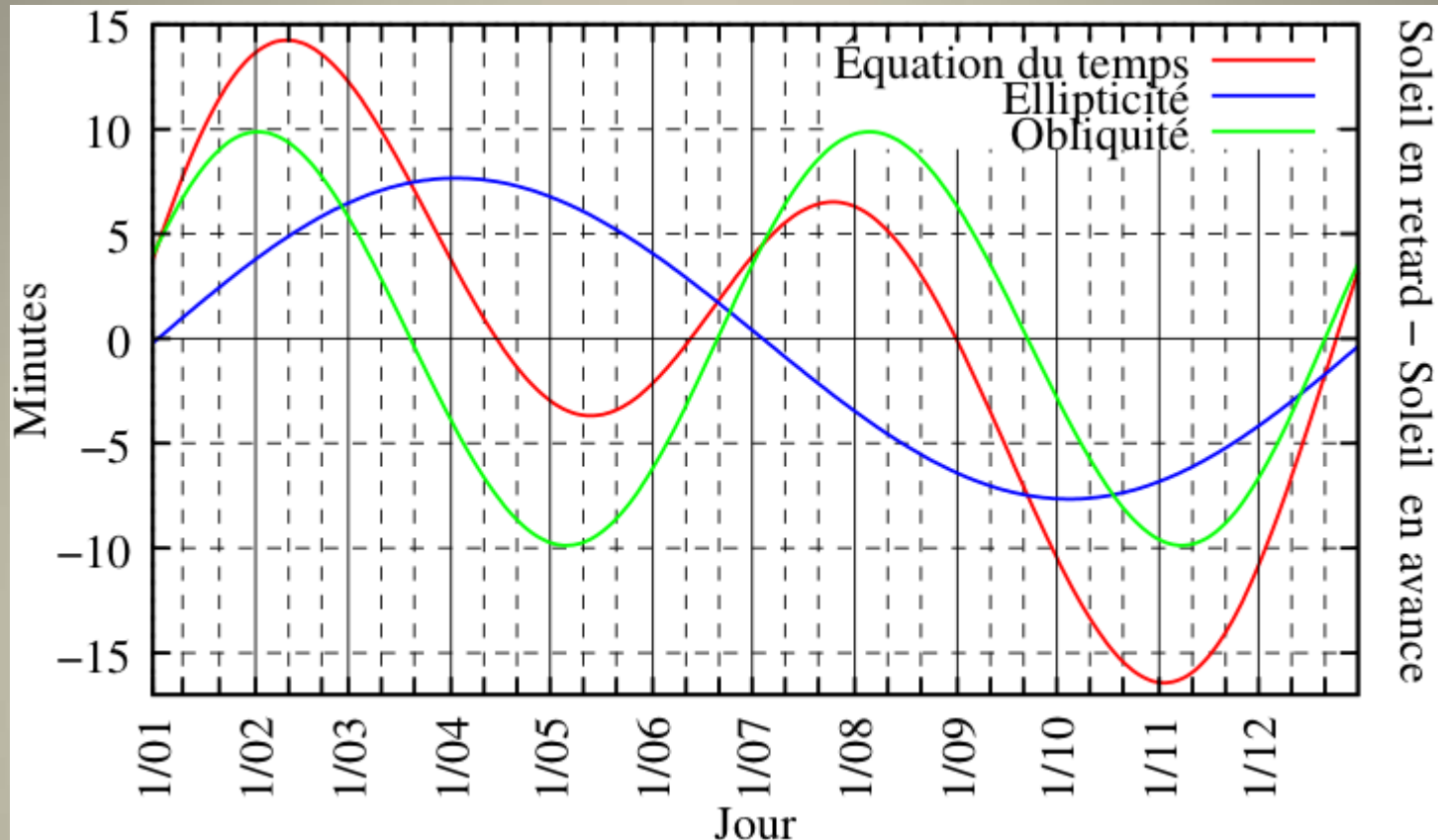
Demi-sphère creuse en marbre, de 50 cm de diamètre, dont l'intérieur est gradué et dans laquelle, à un endroit bien choisi, un petit trou permet aux rayons du Soleil de passer pour aller former une tache lumineuse permettant la lecture de l'heure.
"Scaphè à oeillette" Ier-IIe siècle ap. J.-C.



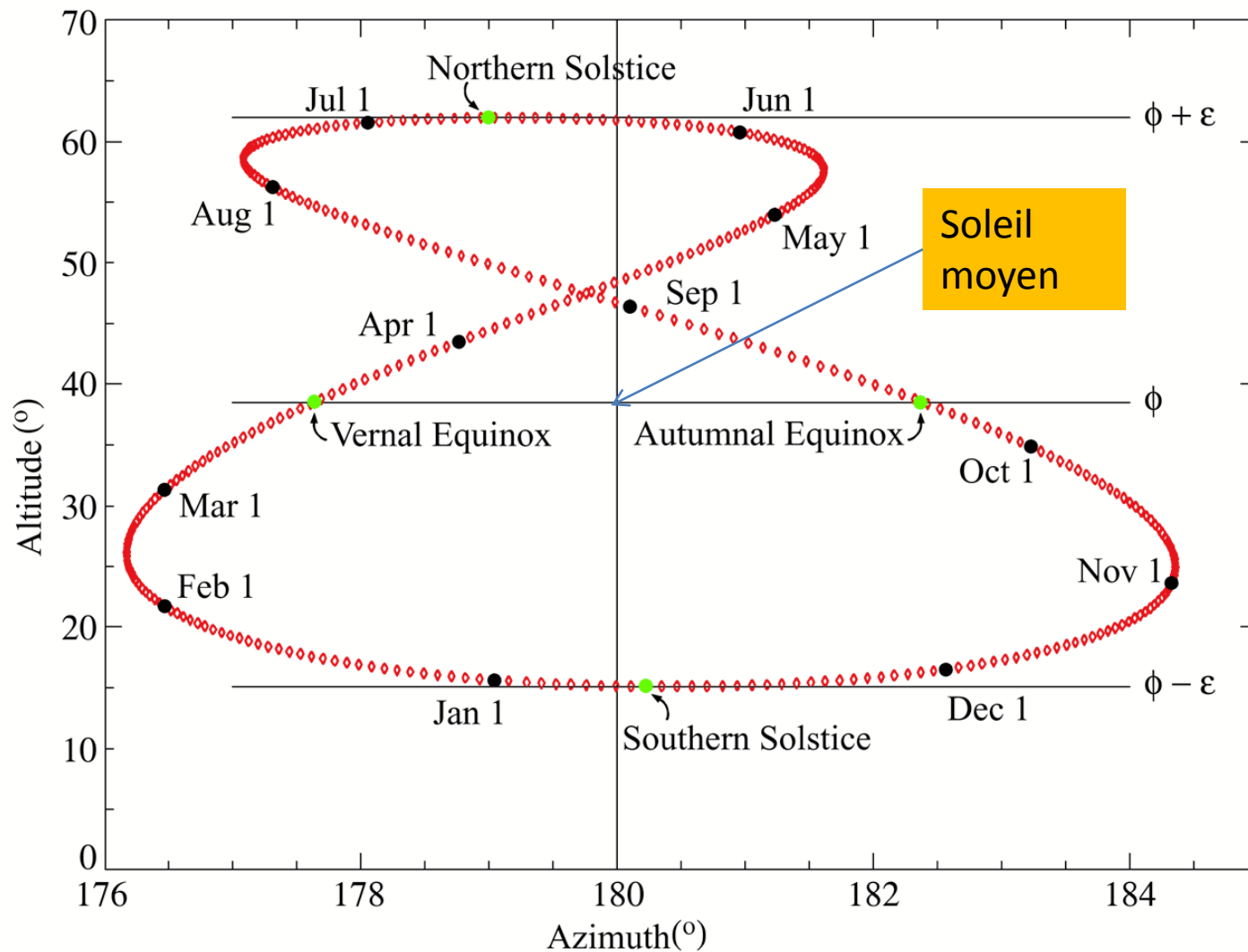
**Quelques exemples de
cadran solaire. Métier:
« horlogiographie »**

Autres mesures du temps

- Les clepsydras (horloges à eau), les sabliers, les bougies marquées, les bâtons d'encens (chine): Systèmes mécaniques (horloges) mus par des poids dont la chute était retardée par des mécanismes « d'échappement », puis chronomètres, montres etc..
- **Comment mettre tous ces instruments de mesure à l'heure?**
- Pour la mise à l'heure on continuait à les régler sur les cadrans solaires des bâtiments publics. Mais le soleil ne tourne pas rond au cours de l'année: il fallait donc régler sa montre pour suivre les inégalités du soleil (connu sous le nom d'équation du temps)



Sa forme résulte de la superposition de deux sinusoides: en bleu une sinusoïde résultant du mouvement de la terre suivant une ellipse (vitesse variable) et en vert une sinusoïde de période $\frac{1}{2}$ année résultant de l'obliquité de l'écliptique sur l'équateur. Il faut alors rapporter le mouvement du soleil dans le plan de l'équateur céleste (réduction à l'équateur)



Exemple d'analemne, pour Greenwich en 2006

Latitude 51,4791° nord, Co-Latitude = 38,5209°, Longitude= 0°

Les chemins de fer et les astronomes

- Pour être tous à la même heure: suivre le « soleil moyen » au lieu du soleil « apparent ». Donc donner la préséance aux « garde-temps » que sont les montres et chronographes par rapport aux cadrans solaires! (Genève 1780, Londres 1792, Paris 1816)
- Partout c'est l'heure « locale » qui était utilisée. Nécessité d'avoir des observatoires qui donnaient l'heure « locale » aux navires en partance mais aussi aux horlogers.
- Jusqu'à l'arrivée du chemin de Fer et du télégraphe (le chemin de fer anglais adoptera la même heure pour tout le pays, à la grande fureur des astronomes, suivi par les chemins de fer français) **Il y avait alors dans les villes deux heures: l'heure de la gare et l'heure de la ville!** (on vendait des montres avec deux grandes aiguilles réglables indépendamment)
- En Allemagne et en Italie le soleil moyen pour tout le pays ne sera adopté qu'à la fin du 19^{ème} siècle.

Solution

- Les USA et le Canada adoptent en 1882 un système d'heures légales par fuseau horaire basé sur le méridien de Greenwich.
- Grande bataille d'amabilités en Europe pour un méridien « neutre »: Greenwich ou Paris (méridien contre système métrique)?
- En 1883 décision de réunir une commission internationale pour consacrer Greenwich comme l'origine des longitudes et d'adopter un temps universel basé sur ce méridien (Adoption de Greenwich sans la France!). Problème de la ligne de changement d'heure.
- Un an plus tard en 1884 à Washington adoption du méridien de Greenwich et de l'heure universelle (La France en a la responsabilité).

- L'adoption de ce changement fut très progressive.
- En France l'heure légale unique fut adoptée en 1891 sans problèmes (+ 10 minutes depuis le méridien de Paris)
- Le passage au méridien de Greenwich pour les Français se fit difficilement en 1896 (il fallait tout modifier) mais ne fut appliqué qu'en 1911.
- Le dernier pays européen à passer à l'heure universelle fut la Hollande en 1956.
- Des progrès considérables furent faits dans la précision des horloges. Mais la terre est moins précise que les horloges et donc ne fut plus utilisée comme étalon de temps.

Changement de l'étalon de temps

Les horloges ultra-précises du 20^{ème} siècle confirmèrent le ralentissement de la terre (frottements dus à des effets de marée) et découvrirent:

- Des fluctuations imprévisibles (dérapage du manteau sur l'intérieur fluide?)
- De petites variations saisonnières (vent sur les montagnes?)
- Ralentissements sporadiques (éruptions solaires?)

Abandon de la rotation de la Terre comme étalon temporel international

Unité de temps

- La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de Césium 133



Horloge Atomique
(Laboratoire Syrte
Observatoire de Paris).
Précision: 10^{-14} s

Fontaine atomique à atomes
froids (1989): Précision 10^{-15} s
(1 erreur tous les 20 millions
d'années)

La mise en concordance des horloges atomiques avec l'heure astronomique entraîne ces petits décalages de 1s que l'on rajoute de temps en temps pour se caler avec le ralentissement de la terre.

Lot de consolation pour les Français. Quand on créa l'UAI en 1919 la France fut chargée de coordonner l'heure internationale soit plus de 220 horloges atomiques dans le monde