

CARTOGRAPHIE TERRESTRE ET CÉLESTE

par : André Ross

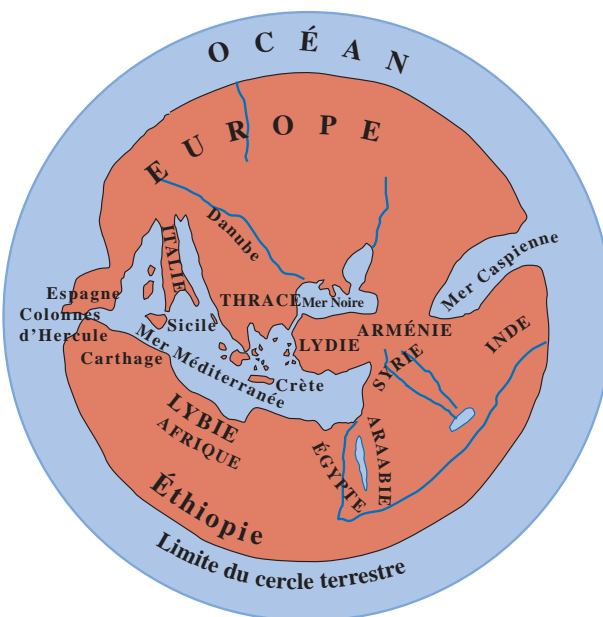
Professeur de mathématiques

Cégep de Lévis-Lauzon

Nous avons tous déjà regardé un globe terrestre, des cartes de différents pays, admiré des photos prises par satellite, vu des images prises à l'aide d'un télescope ou par des sondes spatiales. Toutes ces images et photos nous ont permis de développer graduellement une représentation mentale de notre univers.

Quelle serait notre représentation de l'univers si nous n'avions pas observé toutes ces images?

Le monde habitable tel que le concevait Hécateé de Milet qui vécut vers ~515 ressemblait à la carte suivante. On considère habituellement que ce système de représentation du monde habitable à trois continents entourés d'eau a été transmis des Grecs aux Romains puis à la Chrétienté médiévale.



Le modèle de cette carte représentant dans un cercle trois continents entourés d'eau a été utilisé jusqu'au Moyen Âge. Dans la Chrétienté médiévale, cette pratique était liée à l'histoire de Noé dont les trois fils auraient peuplé chacun un continent.

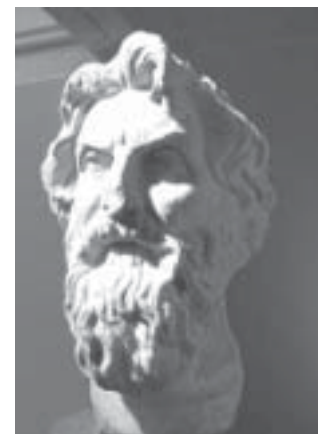
Au XVI^e et au XVII^e siècles, la traduction des ouvrages de Ptolémée et les grandes explorations contribueront à l'apparition de nouvelles cartes tracées grâce au système de longitude et de latitude. En les comparant aux *mappae mundi* circulaires du Moyen Âge, on supposera alors que les lettrés de cette époque considéraient que la Terre était un disque rond posé sur l'Océan. Ce mythe de la *Terre plate* n'est cependant pas appuyé par les textes accompagnant les *mappae mundi*. Au contraire, les textes plaident en faveur d'une terre sphérique.

Les premières cartes géographiques ont cependant été construites à l'aide des informations obtenues par les marchands, les voyageurs, les ambassadeurs et les soldats ayant participé à des expéditions guerrières. Tout naturellement les concepteurs de ces cartes se sont placés au centre du monde habitable et les cartes sont plus détaillées autour de la Méditerranée.

Nous allons rappeler les principales découvertes du monde grec qui ont permis l'évolution de la représentation de l'univers et du monde habitable. Cela nous permettra de comprendre en quoi les cartes médiévales représentaient un recul par rapport à l'héritage du monde grec.

ARISTARQUE DE SAMOS

Aristarque est né à Samos vers ~310 et est décédé vers ~230. Le seul ouvrage d'Aristarque qui a été conservé est un petit traité intitulé *Sur les dimensions et distances du Soleil et de la Lune*. Il y décrit comment il a cherché à déterminer ces distances et dimensions et



les résultats qu'il a obtenus. Il fut le premier à proposer un système héliocentrique, c'est-à-dire un système centré sur le Soleil. Ce système eut un certain succès mais fut rejeté principalement pour deux raisons.

La première de ces raisons est l'absence de parallaxe visible. On croyait que les étoiles fixes étaient beaucoup plus proches et que les constellations apparaîtraient déformées si la Terre se déplaçait autour du Soleil. On peut faire l'expérience de ce que signifie l'absence de parallaxe de la façon suivante :

- tendre le bras, index levé et, en regardant en direction de l'index, fermer alternativement l'œil droit et l'œil gauche. Observer comment la position apparente de l'index semble varier par rapport aux objets à l'extrémité de la pièce.
- demander à une autre personne d'aller à l'extrémité de la pièce et de tendre son index. Fermer alternativement l'œil droit et l'œil gauche. Observer comment la position apparente de l'index ne semble pas varier par rapport aux objets à l'extrémité de la pièce (lorsqu'on est seul dans la pièce, on peut faire la même chose en considérant un objet plus rapproché).

En fermant alternativement un œil, c'est comme si on changeait de point d'observation. La position du doigt semble changer par rapport aux détails sur le mur. Cependant, si le doigt est très éloigné de l'observateur, cette impression disparaît. Cette simple expérience illustre que : si la Terre est en mouvement, il faut que la sphère des étoiles soit très éloignée pour que ce déplacement ne se traduise par une déformation des constellations. On a longtemps considéré que la sphère des étoiles fixes était contiguë à celle de Saturne, la plus éloignée des planètes connues à l'époque. On ne pouvait se résoudre à ce que la sphère des étoiles fixes soit très éloignée car il aurait alors fallu envisager qu'il y avait un grand espace vide entre la sphère de Saturne et la sphère des étoiles fixes. L'existence du vide était incompatible avec la conception de l'univers d'Aristote. Celui-ci avait développé plusieurs raisonnements

par l'absurde pour démontrer l'impossibilité du vide¹.

La deuxième raison est que l'élément « terre », le plus lourd des quatre (terre, eau, air et feu) devait être au centre de l'univers. Cela permettait d'expliquer la gravité. Les corps lourds (appelés *graves*, comme les notes) cherchaient à rejoindre leur place naturelle au centre de l'univers et cela expliquait la chute des corps.

POSTULATS D'ARISTARQUE

Aristarque est né douze ans après la mort d'Aristote et dans son ouvrage il a procédé selon le modèle de construction de la connaissance élaboré par Aristote² en établissant des postulats à partir de l'observation et en utilisant le raisonnement par déduction pour « reproduire dans le langage et dans la pensée la complexité d'ensemble de l'organisation des choses ». Dans son étude des distances célestes, Aristarque pose d'abord les six postulats suivants :

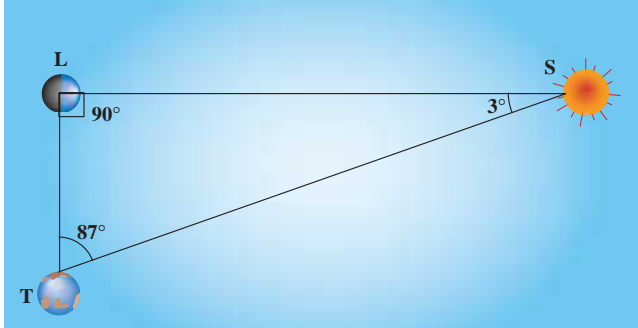
1. La Lune reçoit sa lumière du Soleil.
2. La Lune se déplace comme si elle était sur la surface d'une sphère dont la Terre est le centre.
3. Lorsque la moitié de la Lune est éclairée, le grand cercle qui sépare la partie sombre de la partie éclairée est dans la direction de notre œil³.
4. Lorsque la moitié de la Lune est éclairée, l'angle formé par les directions de la Lune et du Soleil est de 87°⁴.
5. La largeur de l'ombre de la Terre à la distance où la Lune la traverse lors d'une éclipse est de deux fois la largeur de la Lune.
6. La portion du ciel que la Lune couvre en n'importe quel moment est le quinzième d'un signe du zodiaque (cette mesure est erronée).

Voici son raisonnement pour déterminer les distances relatives Terre-Lune et Terre-Soleil.

1. Raisonner par l'absurde? Quelle idée! André Ross, Bulletin de l'AMQ, volume 45, no 1, mars 2005.

2. Logique aristotélicienne, du concept au raisonnement, André Ross, Bulletin de l'AMQ, volume 44, no 3, octobre 2004.
3. La frontière entre la zone éclairée et la zone d'ombre est alors une droite.
4. La valeur réelle est de 89°52'.

La Terre, la Lune et le Soleil forment un triangle dans l'espace. Lorsque la moitié du disque lunaire est éclairée, l'angle au sommet occupé par la Lune doit être de 90° .



Selon son quatrième postulat, l'angle en T mesure 87° (en notation moderne). L'angle en S est donc de 3° .

Il lui faut alors évaluer le rapport des côtés dans un triangle rectangle ayant de tels angles. En notation moderne, il doit évaluer le sinus d'un angle de 3° , soit le rapport du côté opposé à cet angle et de l'hypoténuse. Il estime que :

$$\frac{1}{20} < \sin 3^\circ < \frac{1}{18}$$

Le côté opposé à l'angle de 3° est la distance Terre-Lune (TL) et l'hypoténuse est la distance Terre-Soleil (TS). Il obtient donc :

$$\frac{1}{20} < \frac{TL}{TS} < \frac{1}{18}$$

En considérant la première inégalité, il détermine :

$$\frac{1}{20} < \frac{TL}{TS}, \text{ d'où } TS < 20 TL$$

La deuxième inégalité donne :

$$\frac{TL}{TS} < \frac{1}{18}, \text{ d'où } 18 TL < TS$$

Il conclut que la distance Terre-Soleil est entre 18 et 20 fois la distance Terre-Lune. Pour la première fois dans l'histoire, Aristarque a déterminé par une approche rationnelle, une estimation du rapport des distances Terre-Lune et Terre-Soleil. Cependant, ses instruments

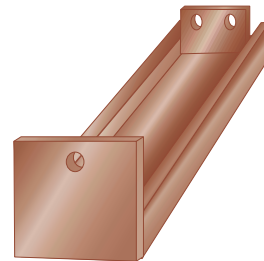
de mesure n'avaient pas la précision nécessaire pour bien évaluer l'angle LTS. En prenant la valeur de $89^\circ 52'$ pour l'angle en T, on trouve que la distance Terre-Soleil est environ 400 fois la distance Terre-Lune.

Ce qui est remarquable, c'est la méthode, la démarche plus que le résultat. C'est le développement de la méthode qui fait la gloire du scientifique, le résultat peut toujours être amélioré avec le développement d'instruments de mesure plus précis. C'est dans l'élaboration de la démarche qu'il faut faire preuve d'imagination et de créativité.

DISTANCES CÉLESTES

Dans la construction de la connaissance, il faut observer, prendre des mesures sans savoir nécessairement à l'avance lesquelles seront utiles, mettre en relation divers phénomènes, faire des hypothèses et tirer les conclusions de celles-ci. C'est ce que fait Aristarque pour comparer le rayon de la Terre et la distance Terre-Lune.

Pour prendre des mesures, il faut un instrument. L'illustration suivante présente l'un de ces instruments.



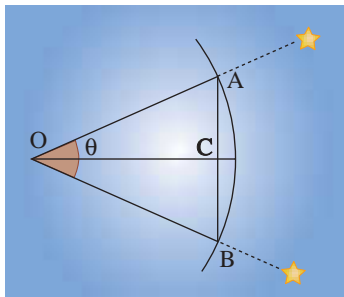
Cet instrument est muni d'une plaque fixe, percée d'un trou, et d'une plaque coulissante, percée de deux trous, que l'on peut déplacer dans une rainure.

L'instrument permet de viser, par exemple, les deux bords d'une planète. La distance entre la plaque fixe et la plaque mobile est la mesure cherchée. On détermine ainsi la grandeur angulaire de la planète.

On peut également déterminer la distance angulaire

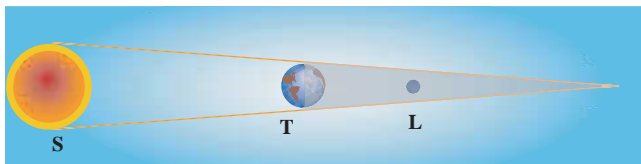
5. $1/10 = 0,5 < \sin 3^\circ = 0,052335956 < 1/18 = 0,05555\dots$

entre deux étoiles, celles-ci étant supposées être fixés sur la sphère extérieure aux confins de l'univers.



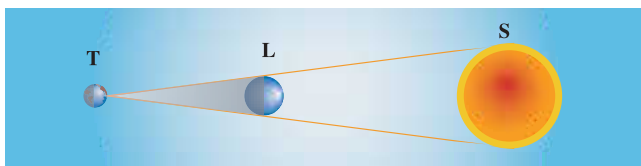
Puisque la distance entre les deux orifices de la plaque mobile est connue, on a alors la base et la hauteur d'un triangle isocèle et on peut caractériser l'angle au sommet par le rapport des côtés.

Durant une éclipse de Lune, Aristarque mesure le temps écoulé entre le moment où la Lune pénètre dans le cône d'ombre de la Terre et le moment où elle disparaît complètement. Il constate que ce temps est le même que celui durant lequel la Lune est complètement cachée.

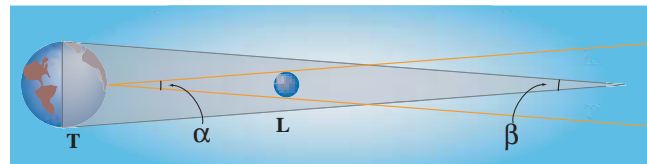
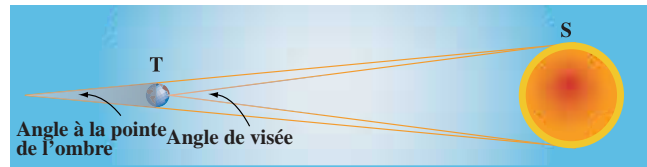


Il en conclut que la largeur de l'ombre de la Terre, à l'endroit où elle est traversée par la Lune lors d'une éclipse, est le double du diamètre de la Lune.

Durant une éclipse de Soleil, la Lune et le Soleil ont le même angle de visée.

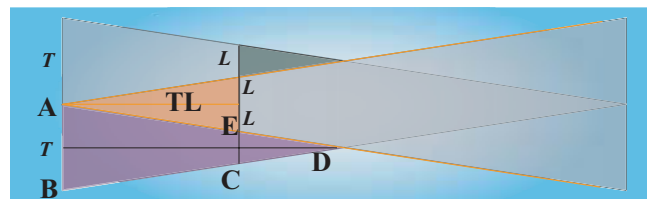


De plus, Aristarque considère que le Soleil est beaucoup plus gros que la Terre et fait l'hypothèse que l'angle à la pointe de l'ombre de la Terre doit être à peu près égal à l'angle de visée du Soleil.



Puisqu'au moment de l'éclipse de Soleil la grandeur angulaire de la Lune est la même que celle du Soleil. Aristarque faisait donc l'hypothèse l'angle β à la pointe de l'ombre est égale à la grandeur angulaire α de la Lune. Il y a alors un seul endroit où la Lune peut couvrir la moitié de la largeur de l'ombre.

Dans la figure précédente, le rayon de la Terre semble une quantité non négligeable car la figure n'est pas à l'échelle. En négligeant cette grandeur, on peut considérer que le sommet de l'angle α est au centre de la Terre et obtenir une configuration comme suit.



Puisque les angles α et β sont égaux, les triangles isocèles sont tous semblables et on peut facilement montrer, par le rapport de la base et de la hauteur des triangles CED et ABD que $T = 3L$, où T et L sont respectivement le rayon de la Terre et le rayon de la Lune. Aristarque en conclut que la Lune est trois fois plus petite que la Terre.

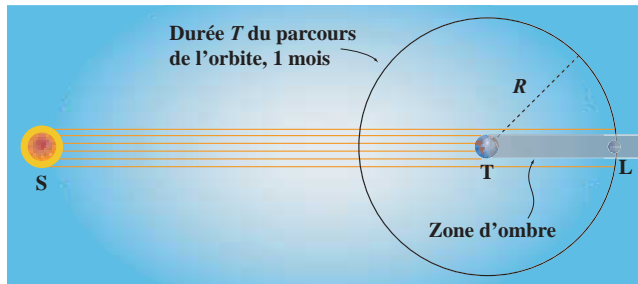
Sans l'hypothèse à l'effet que l'angle β à la pointe de l'ombre est égale à la grandeur angulaire α de la Lune, Aristarque ne serait pas parvenu à cette évaluation.

DISTANCE TERRE-LUNE

Considérant que la Lune décrit un grand cercle autour

de la Terre, Aristarque va en calculer la distance. Soit R le rayon de ce cercle et T le temps mis par la lune pour faire un tour, environ un mois. On a donc $T = 672$ heures. Pendant ce temps la lune couvre une distance de $D = 2\pi R$.

Une éclipse de lune se produit si la Lune, du côté opposé au Soleil, traverse l'ombre de la terre (c'est donc au moment d'une pleine Lune).



Si r est le rayon de la Terre, en considérant que les rayons du Soleil sont parallèles, la largeur de l'ombre est à peu près le diamètre de la Terre $d = 2r$. Dans les éclipses les plus longues qui se produisent quand la Lune passe par le centre de l'ombre de la Terre, le temps t nécessaire pour que le centre de la lune croise le centre de l'ombre est environ 3 heures.

Si la Lune se déplace autour de la terre à vitesse constante, on a :

$$\frac{D}{d} = \frac{2\pi R}{2r} = \frac{T}{t} = \frac{672}{3}$$

D'où :

$$\frac{2\pi R}{2r} = \frac{672}{3}$$

En simplifiant, il obtient :

$$\frac{R}{r} \approx 60^6$$

Cela donne la distance Terre-Lune utilisée de nos jours, soit une distance de 60 rayons terrestres.

Il y a plusieurs approximations dans ce calcul, la durée réelle du « mois lunaire » est de 29,53 jours, mais la

6. Aristarque a fait cette estimation vers ~270, Archimède avait alors 17 ans et n'avait pas encore estimé la valeur de π . Aristarque a utilisé une valeur trop grande pour π .

période orbitale sidérale de la Lune est plus courte de 2.21 jours, cela est dû au fait que le Soleil s'est déplacé durant ce mois lunaire. En raffinant la valeur de π et en corrigeant les approximations faites par Aristarque, on parvient quand même à environ 60 rayons terrestres (60 RT).

Aristarque avait obtenu précédemment que la distance Terre-Soleil (TS) est entre 18 et 20 fois la distance Terre-Lune (TL),

$$18 TL < TS < 20 TL$$

Il pouvait donc conclure que :

$$1080 RT < TS < 1200 RT$$

Les mesures et calculs d'Aristarque sont imprécis, mais sa principale conclusion est que le Soleil est beaucoup plus grand que la Terre. Il semblait donc raisonnable qu'il soit au centre de l'univers, plutôt que la Terre. Cette conclusion n'a été acceptée ni par Hipparque, ni par Ptolémée. Pour la raisons suivante :

Si la Terre tournait autour du Soleil, on serait des deux côtés opposés du Soleil tous les 6 mois. Si la distance était aussi grande qu'Aristarque le prétend, on devrait percevoir du changement dans les positions des étoiles relatives des étoiles.

Nous connaissons maintenant la réponse : les étoiles sont si éloignées de nous, que même nos meilleurs télescopes peuvent à peine observer le décalage des plus proches d'entre elles. Il a fallu presque 18 siècles avant que les idées d'Aristarque ne soient rétablies par Copernic. Celui-ci devra d'ailleurs repousser la sphère des étoiles fixes à une très grande distance pour expliquer cette absence

ÉRATOSTHÈNE DE CYRÈNE

Aristarque a calculé des distances relatives en exprimant le rayon de la Lune, la distance Terre-Lune et la distance Terre-Soleil en fonction du rayon de la Terre. Pour traduire ces distances en unité usuelle, il fallait déterminer la mesure du rayon de la Terre dans cette unité de mesure. Cette mesure sera obtenue grâce aux travaux d'Ératosthène et d'Archimède.

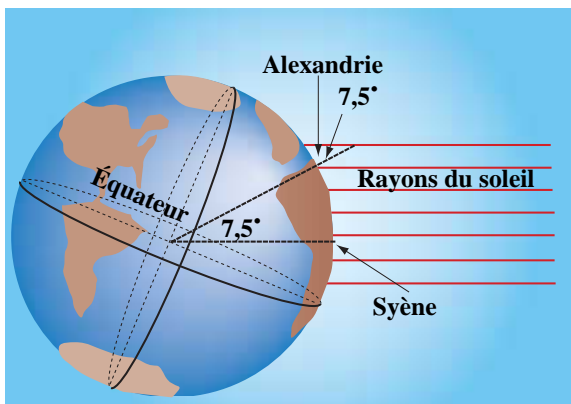
Ératosthène est né en ~276 à Cyrène (Shahhat, Libye) et est décédé à Alexandrie en ~194. Après avoir étudié à Alexandrie et à Athènes, il s'installe à Alexandrie où il devient directeur de la bibliothèque. Il fait des recherches en géométrie et en théorie des nombres. Il est surtout connu par la mesure de la circonférence terrestre et le *crible d'Ératosthène* qui consiste à éliminer de la liste des nombres tous les multiples des nombres premiers en succession pour ne retenir que les nombres premiers. Le crible, sous une forme modifiée, est encore un instrument important de nos jours en théorie de nombres. Il fut également géographe.



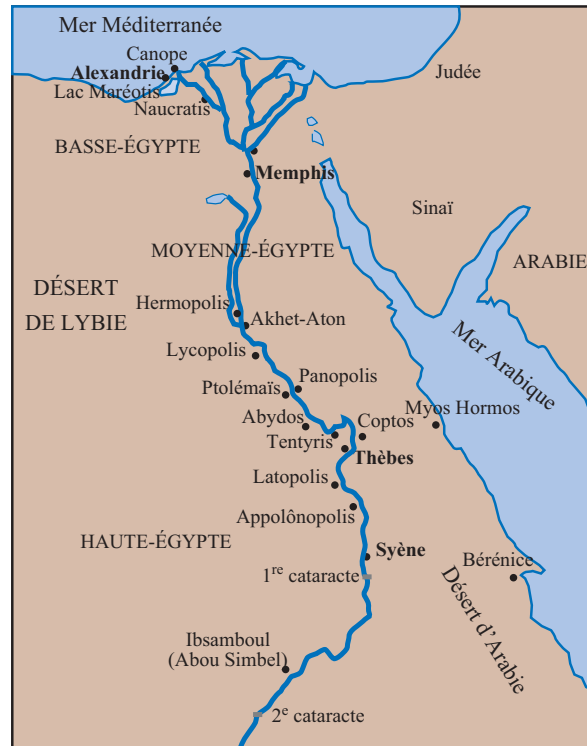
CIRCONFÉRENCE TERRESTRE PAR ÉRATOSTHÈNE

Disposant de tous les faits observés dans l'empire, Ératosthène a été en mesure de calculer la circonférence terrestre, il obtint environ 40 000 km (voir texte sur Ératosthène).

Ératosthène était bibliothécaire d'Alexandrie et il disposait de tous les renseignements sur les événements curieux observés dans l'empire d'Alexandre. C'est ainsi qu'il apprit qu'au solstice d'été, le Soleil se réfléchissait à midi dans l'eau d'un puits profond de Syène (aujourd'hui Assouan) non loin de la première cataracte du Nil. À ce moment, le Soleil était donc à la verticale du puits. Le même jour à midi, dans la ville d'Alexandrie, l'ombre d'un pilier permettait de déterminer que le Soleil était à 7,5 degrés de la verticale.



Il ne restait qu'à déterminer la distance d'Alexandrie à Syène. C'est en marchant qu'il faut le faire et en suivant le Nil. Il faut bien sûr marcher d'un pas constant et apporter les corrections pour les méandres du fleuve. C'est donc une expédition de plusieurs jours comme on peut le constater sur la carte ci-dessous.



En unité de mesure moderne, il a obtenu une distance de 830 km. En utilisant ces informations et le fait que la mesure de l'angle au centre est égale à la mesure de l'arc intercepté, il a fait le calcul suivant :

$$C = \frac{360^\circ}{7,5^\circ} \times 830 \approx 40\,000 \text{ km}$$

Connaissant la circonférence terrestre et la valeur de π , il était alors possible de calculer le rayon de la Terre. L'Homme a commencé à déterminer les dimensions de son univers.

CALCUL DE π PAR ARCHIMÈDE

Le calcul d'une valeur approchée du rapport de la circonférence sur le diamètre d'un cercle par Archimède⁷ (~287-~212) a permis de calculer le rayon de la Terre à partir des résultats d'Ératosthène.

7. De la comparaison d'aires au calcul de π , André Ross, Bulletin de l'AMQ, volume 44, no 1, mars 2004.

Archimède a calculé que :

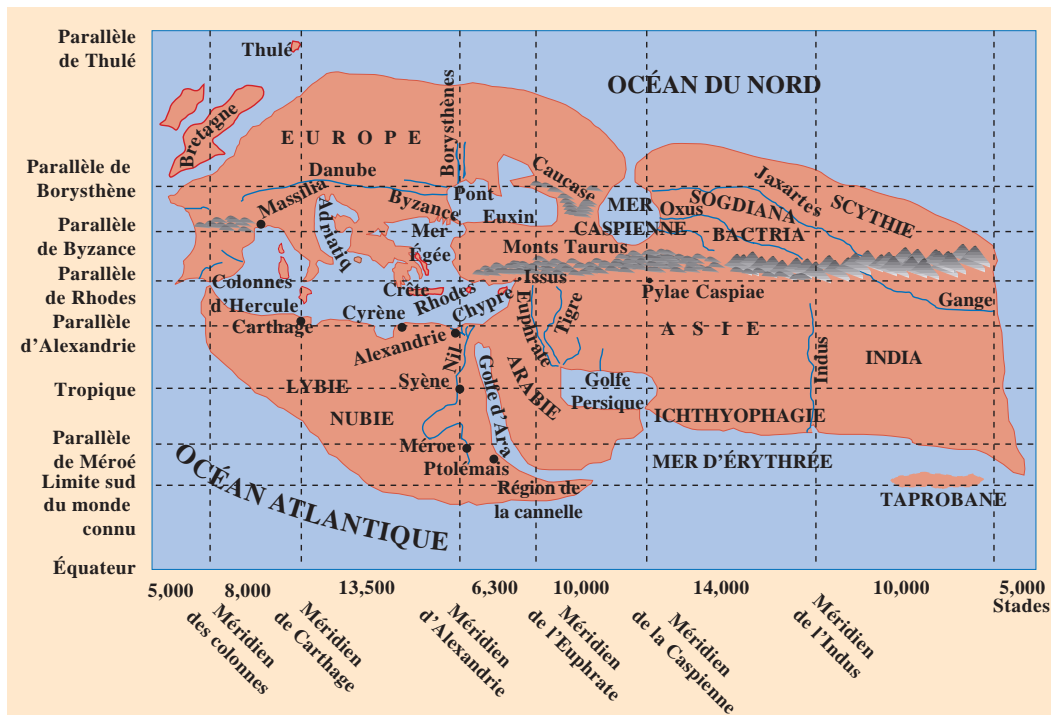
$$223/71 < \pi < 22/7$$

Ce qui permet de déterminer que le rayon de la Terre est d'environ 6 400 km. En utilisant cette valeur les calculs d'Aristarque, on obtient 1 600 km pour le rayon de la Lune et 384 000 km pour la distance Terre-Lune.

MONDE HABITABLE SELON ÉRATOSTHÈNE

Ératosthène a également introduit l'usage des parallèles

et méridiens dans les cartes géographiques. Peut-être a-t-il été inspiré par le plan d'urbanisme d'Alexandrie. La ville fut développée à partir d'un plan constitué de rues rectilignes se coupant à angle droit. Elle a un quartier égyptien, un quartier grec et un quartier juif. Nous sommes habitués à ce type de plan d'urbanisme et nous savons que cela permet de s'orienter facilement et de tracer simplement la carte d'une ville.



HIPPARCOS DE NICÉE

Considéré comme le plus grand astronome de toute l'antiquité classique, Hipparque de Nicée, fit des observations d'une bonne précision entre ~161 et ~127 depuis Rhodes et Alexandrie.

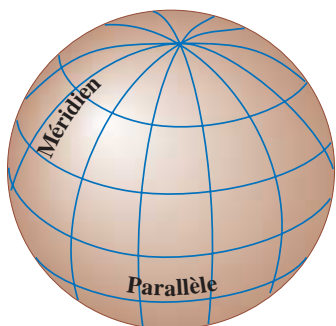


Il mit en évidence un grand nombre de phénomènes insoupçonnés auparavant, détermina une valeur de 365j 5h 55 min 12 s pour la durée de l'année tropique, valeur bien plus précise que tout ce qui avait été proposé avant lui, cependant encore trop surestimée par rapport à la vraie valeur égale à 365j 5h 48 min 46 s.

Hipparque a transformé l'astronomie grecque d'une science descriptive à une science prédictive. Il a lui aussi estimé les distances Terre-Lune et Terre-Soleil, ainsi que les tailles réelles de ces astres, obtenant une valeur tout à fait correcte pour la distance Terre-Lune et la taille de la Lune et une valeur dix fois trop petite pour la distance Terre-Soleil. Il trouva tout de même que le Soleil devait être dix fois plus gros que la Terre.

Il a dressé un catalogue de 800 étoiles, notant leur position avec précision et en évaluant leur grandeur apparente. Il fut le premier à reconnaître la précession des équinoxes, c'est-à-dire le déplacement lent du point vernal (équinoxe de printemps) sur le zodiaque.

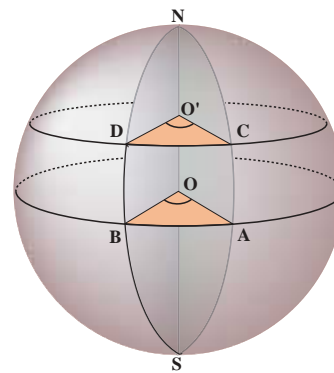
Hipparque a développé l'idée d'Ératosthène d'utiliser des méridiens et des parallèles. Il a étendu cette idée à toute la sphère terrestre.



Cette extension l'a amené à poser les fondements de la trigonométrie sphérique, soit l'étude des triangles sur la surface d'une sphère, pour pouvoir déterminer la distance entre deux points qui ne sont pas sur le même méridien ni sur le même parallèle.

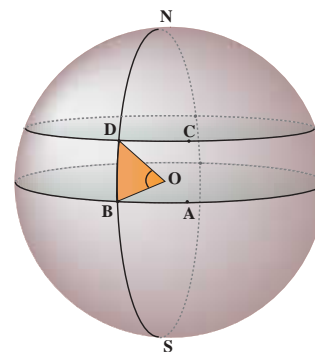
LONGITUDE ET LATITUDE

La longitude du point B, à l'équateur, est donnée par la mesure de l'angle AOB, où O est le centre de la sphère. Le point D sur le même méridien a la même longitude, les angles AOB et CO'D étant égaux, où O' est le centre du cercle parallèle à l'équateur.



La différence de longitude est l'angle au centre entre deux grands cercles passant par les pôles.

La latitude du point D est donnée par la mesure de l'angle au centre BOD. La latitude est la même pour tous les points sur un cercle parallèle à l'équateur.

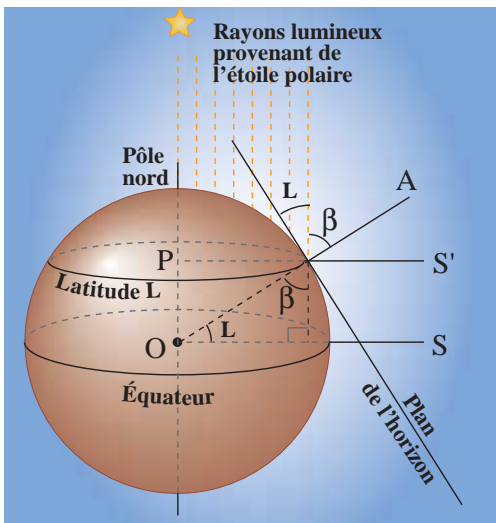


La différence de latitude est l'angle au centre entre deux cercles parallèles à l'équateur.

Pour donner la position d'un point sur la sphère, il suffit alors de donner sa longitude et sa latitude.

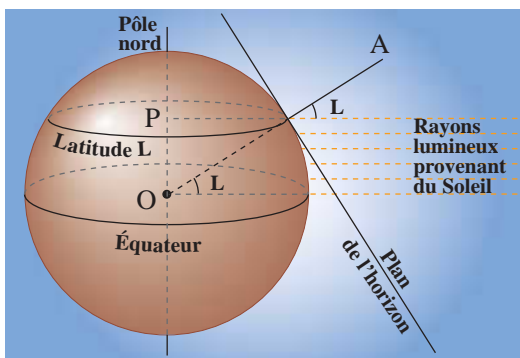
CALCUL DE LA LATITUDE

Évidemment, il n'est pas possible de se rendre au centre de la Terre pour y mesurer des angles. Cependant la géométrie nous permet de pallier à cet inconvénient. Dans l'hémisphère nord, on peut calculer la latitude à l'aide de l'étoile polaire.



En mesurant l'angle d'élévation de l'étoile polaire par rapport à l'horizon dans la direction nord, on obtient directement la latitude du point.

On peut également mesurer la latitude en mesurant la distance zénithale du Soleil à midi aux équinoxes. Le Soleil est alors à la verticale de l'équateur.



L'angle entre le zénith et la direction du Soleil à midi aux équinoxes est égal à l'angle au centre, soit la latitude, puisque ce sont des angles correspondants.

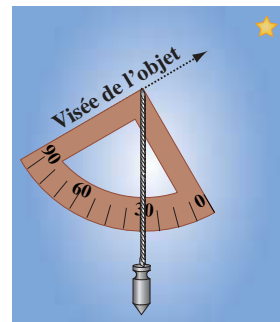
CALCUL DE LA LONGITUDE

Pour calculer la longitude en un point, il faut, à midi, déterminer la différence d'heures entre ce point et le méridien de référence. Il y a 24 méridiens et une différence d'une heure avec le méridien de référence signifie une différence de longitude de 15° .

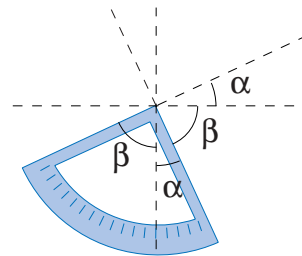
Le méridien de référence qui fut d'abord celui de Paris est maintenant situé à Greenwich en Angleterre.

LES INSTRUMENTS

On peut facilement mesurer l'angle que fait une direction avec la verticale à l'aide d'un quadrant gradué et d'un fil à plomb.

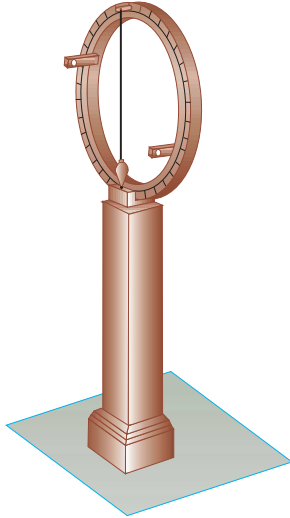


L'angle avec l'horizontale est alors l'angle complémentaire à celui avec la verticale.



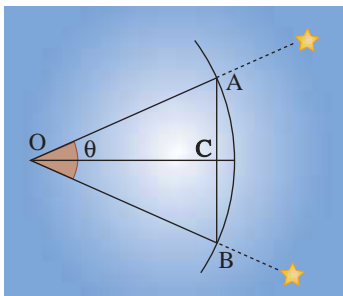
Pour assurer une bonne précision, il faut utiliser un instrument stable. Le fil à plomb de l'instrument suivant permet de s'assurer qu'il est bien aligné dans la direction zénithale. Il est muni de deux anneaux dont l'un est fixe et l'autre est mobile.

La partie mobile de cet instrument comporte deux viseurs. La lecture de l'angle de visée se fait sur l'anneau gradué. C'est le type d'appareil qui a été utilisé par Ptolémée pour mesurer l'obliquité de l'écliptique.



GÉOMÉTRIE DES CORDES

Hipparque a développé une géométrie des cordes qui est l'ancêtre de la trigonométrie moderne.



La géométrie des cordes consiste à déterminer dans un cercle de rayon OC donné la longueur de la corde AB sous-tendue par un angle au centre θ . Selon Théon d'Alexandrie (vers 365), Hipparque aurait rédigé un traité en 12 livres sur le calcul des cordes dans un cercle.

PTOLÉMÉE

Claude Ptolémée (85-165) est un astronome, mathématicien et géographe grec membre de l'Université d'Alexandrie. Il y fit ses observations de 127 à 141 et

publia un ouvrage qui est un exposé complet du système géocentrique.



La carte ci-dessous a été réalisée en utilisant les méridiens et les parallèles pour situer les lieux. Ce planisphère qui serait dû à Ptolémée marque le début de la science des cartes.

On est frappé par l'évolution lorsqu'on compare cette carte à celle reconstruite à partir des données d'Hécatée de Milet.

CONCLUSION

Les astronomes d'Alexandrie ont posé les fondements de la cartographie terrestre et céleste. Ils ont développé des méthodes pour construire des cartes géographiques et pour déterminer les positions des étoiles. Ils ont cherché à déterminer les rayons et distances de la Terre, de la Lune et du Soleil. La tâche n'était pas facile mais en persévérant ils sont parvenus à obtenir certaines estimations correctes, d'autres moins. Ils ont également voulu développer une astronomie prédictive, ce qui les amena à raffiner les modèles décrivant les orbites des planètes.

Cependant, pour répondre adéquatement aux exigences de la navigation, la science des cartes va devoir évoluer. En plus de la longitude et de la latitude, des notions mathématiques liées au développement de la perspective et de la géométrie projective seront utilisées.

BIBLIOGRAPHIE

Astronomy before the telescope, Édité par Christopher Walker, The trustees of the British Museum St.Martin press, New-York.

Ferguson, Kitty, Measuring the universe, New-York, Walker and company, 1999, 342 p.

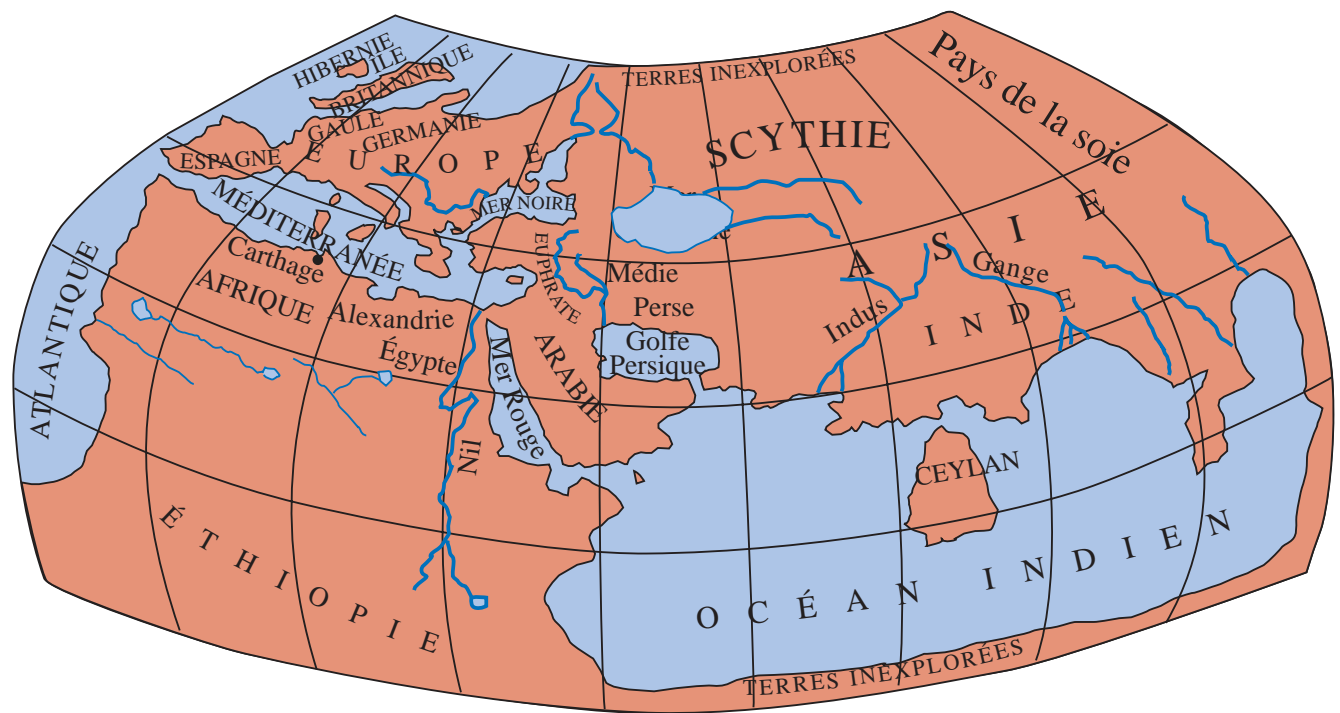
Kline Morris, *Mathematics, a cultural approach*, Reading, Mass. : Addison-Wesley, 1962, 70 p.

Kline, Morris, *Mathematics in western culture*, New York, Oxford University Press, 1974, 484 p.

Ptolemy's Almagest, translated and annotated by G.J. Toomer, Princeton, Princeton University press, 1998, 693 p.

Maor Eli, *Trigonometric Delights*, Princeton, Princeton University press, 1998, 236 p.

<http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/>



Planisphère de Ptolémée