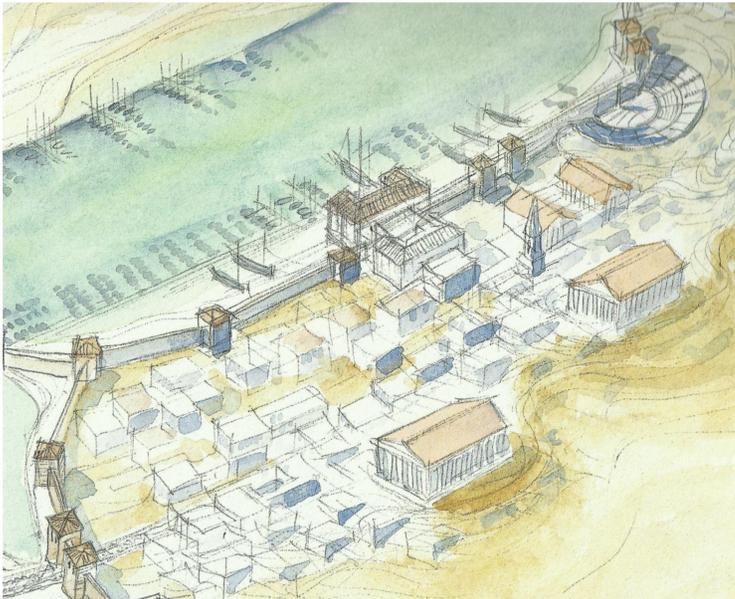




PYTHEAS MESURE L'OBLIQUITE DE L'ECLIPTIQUE

REPERER

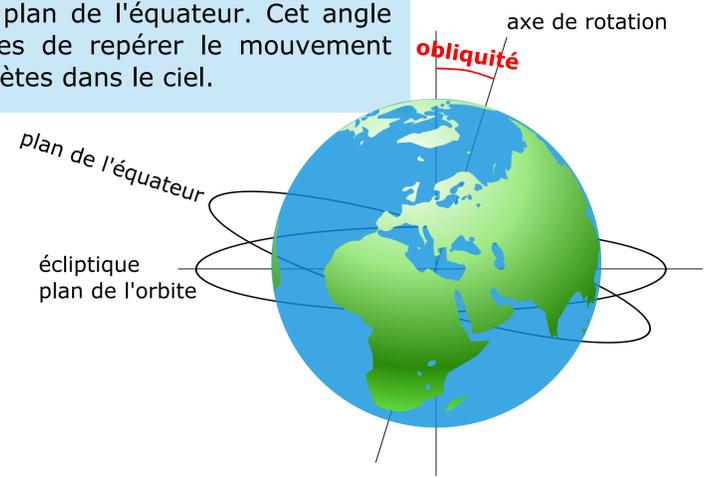


Evocation de Marseille à l'époque de Pythéas (c) J-M.Gassend

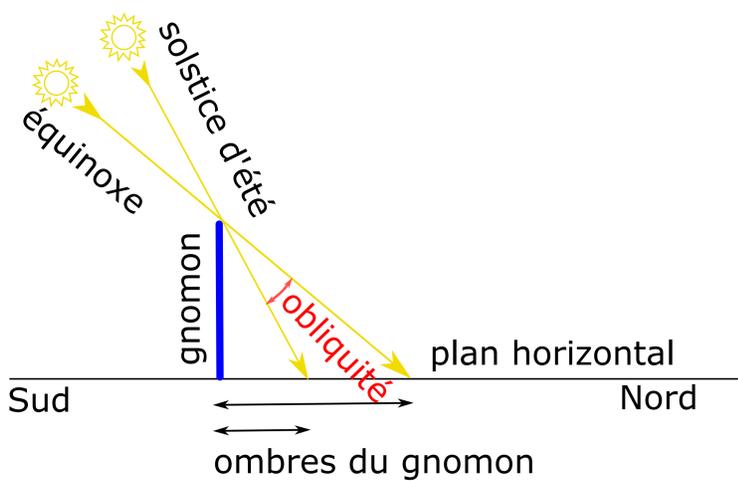
Pythéas, navigateur et astronome marseillais, environ 300 avant J-C. Il a fait un voyage célèbre jusqu'aux confins de l'Europe du Nord et réalisé plusieurs mesures astronomiques, dont celle de la latitude de Marseille.



L'obliquité de l'écliptique est l'angle entre le plan de l'orbite terrestre et le plan de l'équateur. Cet angle permet aux astronomes de repérer le mouvement des étoiles et des planètes dans le ciel.



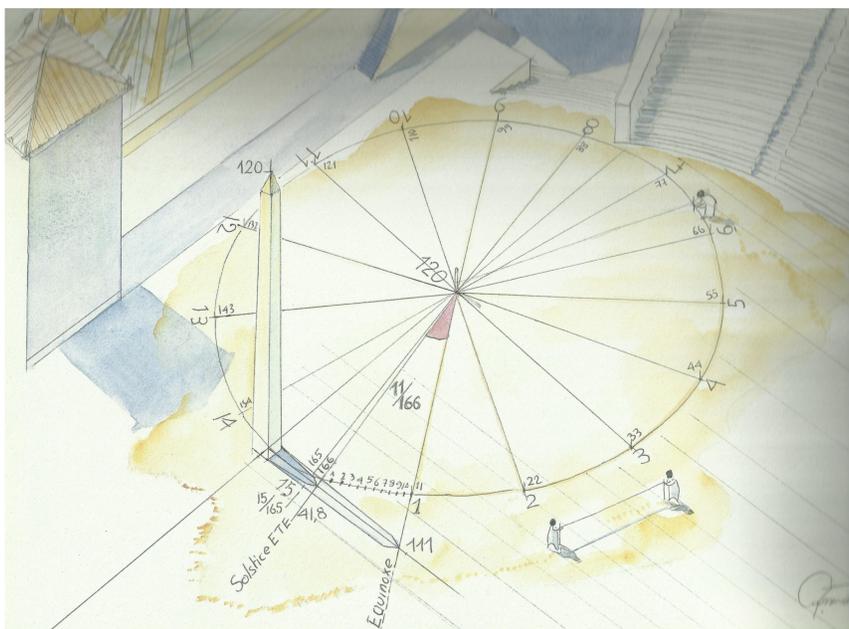
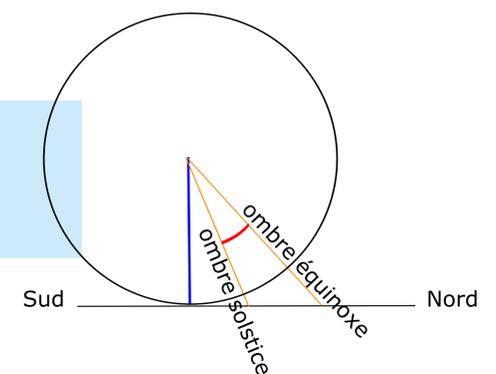
Quel est le procédé de Pythéas ?



Pythéas utilise un gnomon, obélisque vertical dont il mesure l'ombre au solstice d'été et à l'équinoxe. L'angle entre les deux rayons est l'angle cherché.

Comment Pythéas a-t-il calculé l'angle ?

La figure verticale est d'abord reportée sur le sol afin de faire la mesure plus facilement. L'angle est mesuré en fraction de circonférence, ce qui était une habitude à l'époque.



L'angle est d'abord reporté dans la circonférence, 15 fois, et il y a un reste. Le reste est reporté 11 fois dans l'angle et on néglige le second reste.

La circonférence vaut $15 \times 11 + 1 = 166$ fois le reste, l'angle vaut donc $11/166$, ce qui fait $23^\circ 51'$, valeur légèrement supérieure à la valeur actuelle $23^\circ 27'$, ce qui est dû, entre autres causes, aux variations à long terme de l'inclinaison de l'axe de la Terre.

$$\text{L'écriture } \frac{11}{166} = \frac{1}{15 + \frac{1}{11}}$$

est ce qu'on désigne actuellement comme une **fraction continue**

Pour en savoir plus



HISTOIRES DE SPHERES

REPERER

Des problèmes d'astronomie

La voûte céleste est représentée par une sphère. Les astres, étoiles ou planètes, sont connus par leurs coordonnées célestes, en général ascension droite, équivalent de la longitude, mesurée par rapport à un méridien de référence et exprimée en heures, minutes, secondes, et déclinaison, équivalent de la latitude, mesurée par rapport au plan de l'horizon. Les astronomes ont des questions du type :

- quel est l'angle entre deux astres connus par leurs coordonnées ?
- quelle est la distance angulaire parcourue par une planète en un temps donné ?

Des problèmes de navigation

La Terre est assimilée à une sphère. On se repère avec la latitude, angle Nord ou Sud à partir de l'équateur et la longitude, angle par rapport au méridien d'origine Greenwich, Est ou Ouest. Les navigateurs ont deux questions fondamentales :

- quelle est la distance à parcourir entre deux points connus par latitude et longitude ?
- quel cap doit-on suivre ? (angle entre la route du bateau et le Nord)

Le calcul de la distance orthodromique

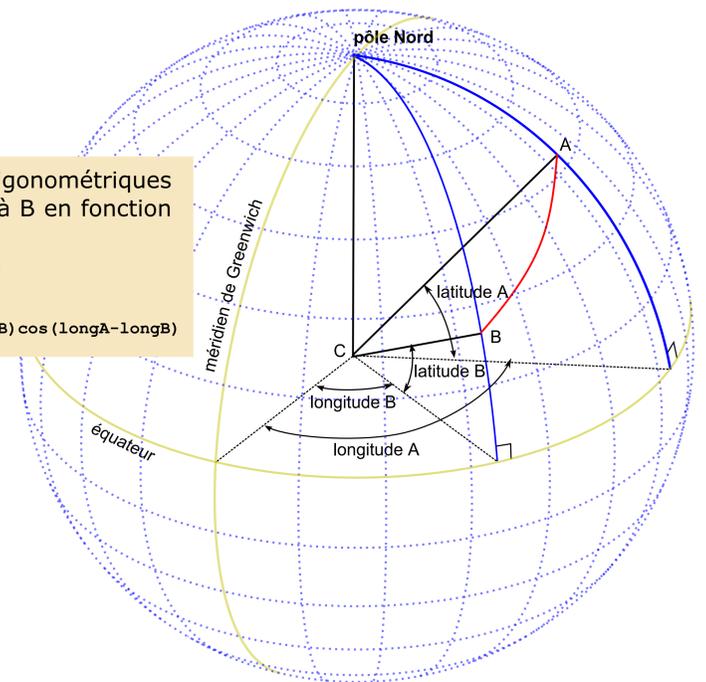
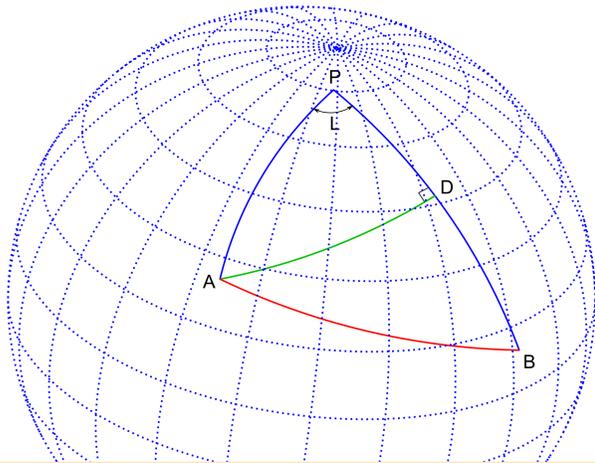
le plus court chemin d'un point A à un point B sur la Terre

Depuis le XIXe siècle des formules trigonométriques donnent directement la distance de A à B en fonction des latitudes et des longitudes.

$$AB = \text{rayon} \times \text{angle}(ACB)$$

L'angle ACB est donné par la formule :

$$\cos(\text{ACB}) = \sin(\text{latA}) \sin(\text{latB}) + \cos(\text{latA}) \cos(\text{latB}) \cos(\text{longA} - \text{longB})$$



Du XVIe au XVIIIe siècle les navigateurs et les astronomes ont beaucoup utilisé la décomposition en triangles sphériques rectangles pour lesquels les calculs étaient plus faciles. L'apparition des logarithmes avec Neper a facilité ces calculs qui comportaient des formules du type $\cos(a) = \cos(b)\cos(c)$. PAB triangle quelconque, pour obtenir AB on calculait successivement AD et DP dans le triangle rectangle DAP, puis DB et AB dans le triangle rectangle DAB.

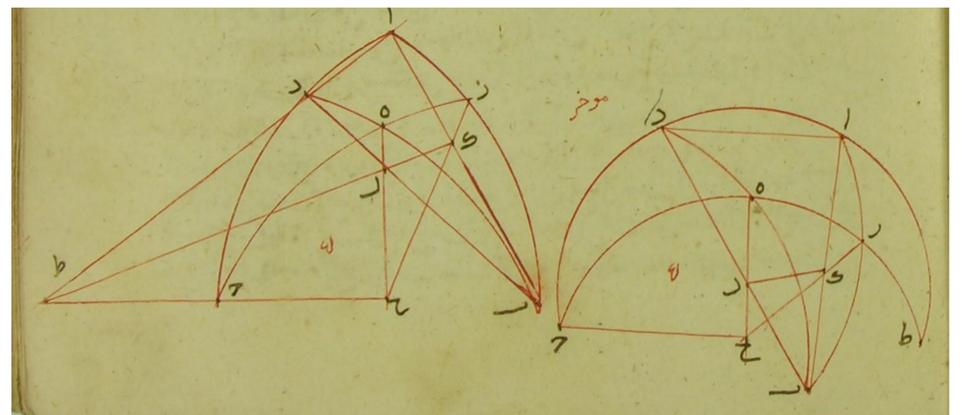


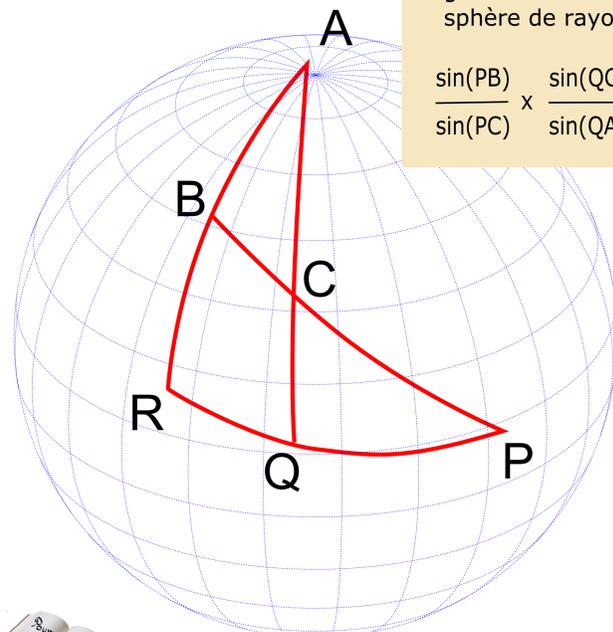
Figure du manuscrit Ahmet III-3464 des Sphériques de Ménélaus, 1227, Topkapi Saray, Istanbul

De l'Antiquité à la Renaissance c'est le **théorème de Ménélaus** qui est à la base de tous les calculs sur la sphère, terrestre ou céleste. Ptolémée dans l'Almageste développa les applications à l'astronomie, qui sont restées valides et utilisées pendant plus d'un millénaire. Ce théorème était peut-être connu par Hipparque mais il est attribué à Ménélaus dans son ouvrage "Les Sphériques" qui fut, à partir des manuscrits grecs, traduit en syriaque, arabe et latin.

Le théorème de Ménélaus

ABR, BCP, ACQ, arcs de grand cercle tracés sur une sphère de rayon 1

$$\frac{\sin(PB)}{\sin(PC)} \times \frac{\sin(QC)}{\sin(QA)} \times \frac{\sin(RA)}{\sin(RB)} = 1$$



La diffusion des "Sphériques" de Ménélaus



LES PREMIERS TEMPS DE L'ASTRONOMIE

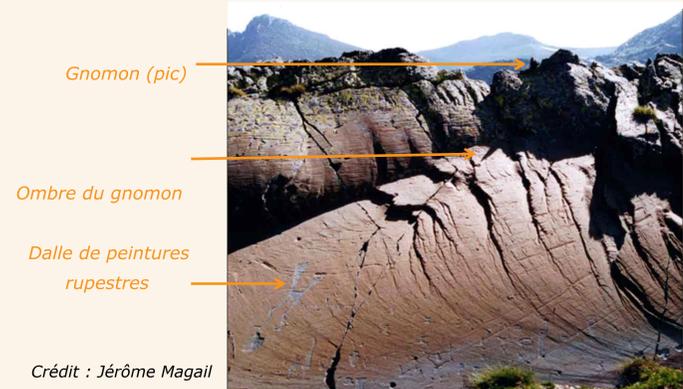


DANS LA PREHISTOIRE DÉJÀ

C'est par l'observation du ciel que l'homme a appris à se repérer dans l'espace et dans le temps.

On trouve de nombreuses traces laissant supposer des observations astronomiques grâce auxquelles, avant l'écriture, il semble que les hommes étaient capables de mesurer le temps.

Gnomon cadran solaire
Mont Bego, Vallée des Merveilles (Alpes Maritimes)



Gnomon (pic)

Ombre du gnomon

Dalle de peintures rupestres

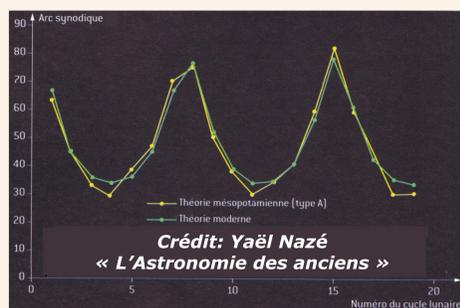
Crédit : Jérôme Magail

L'ASTRONOMIE MÉSOPOTAMIENNE: Une astronomie basée sur l'observation et l'arithmétique

On doit aux mésopotamiens le partage du cercle en 360°

Les mésopotamiens recherchent des modèles mathématiques permettant de prévoir des phénomènes célestes (éclipses, phases de la Lune, positions des astres ...). Pour repérer les astres sur la voûte stellaire, ils partagent le cercle en 360 parties (Ils calculent en base 60).

Leurs calculs sont d'une incroyable précision comme en témoigne cette comparaison avec les théories modernes pour le calcul de la longitude de Mars

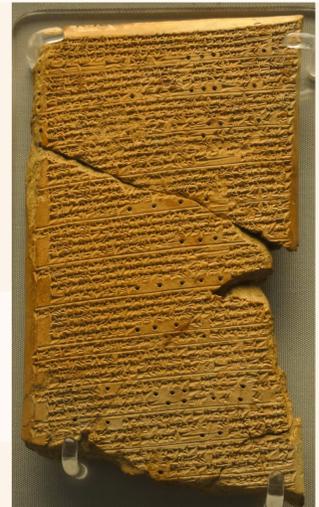


La plus ancienne des tablettes astronomiques :
La tablette de Vénus (XVII^e av. J.C.)
sur laquelle sont relevés les levers et couchers de la planète Vénus sur 21 ans.
Ici une copie du VII^e siècle av. J.C.

Les tablettes Mul Apin :

un ensemble de 70 tablettes constituant le premier grand catalogue stellaire

(II^e millénaire av. J.C.)



L'ASTRONOMIE ÉGYPTIENNE: Une astronomie pratique

Les égyptiens ont remarqué que l'apparition de Sirius (l'étoile la plus brillante du ciel nocturne) dans le ciel de l'aube (le lever héliaque), après 70 jours d'absence coïncidait avec le début des crues du Nil apportant la fertilité dans la vallée. C'est l'étoile Sirius qui sert donc de base à l'élaboration des premiers calendriers.



Texte mentionnant la date de réapparition de l'étoile Sirius (vers 1450 av. J.C.)

Une année est constituée de 12 mois de 30 jours plus 5 jours (épagomènes), soit 365 jours.

Dans une année, il y a 3 saisons:

l'Inondation, les Semailles (l'hiver), les Récoltes (l'été).

Dans une saison il y a 4 mois.

Dans chaque mois, il y a 3 décades (période de 10 jours).

Une journée est découpée en 2 parties :

12h pour le jour et 12h pour la nuit .

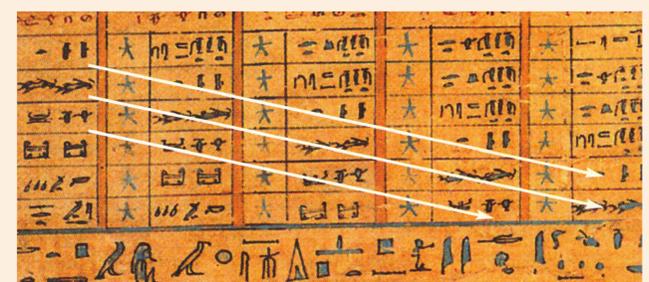
On doit aux égyptiens l'année de 365 jours et le jour de 24h

Les premières horloges stellaires (indiquant les heures de la nuit) datent du début du deuxième millénaire avant J.C.. Une horloge est un tableau dont les colonnes correspondent aux différentes décades et dont les 12 lignes correspondent aux 12 heures de la nuit. Dans chaque case, on trouve le symbole d'un décan (étoile ou groupe d'étoiles) marquant la première heure de la nuit lors de son lever.

Le jour sidéral* étant plus court de 4 min que le jour solaire**, les étoiles se lèvent chaque jour un peu plus tôt.
D'où le décalage en diagonale observé dans l'horloge stellaire ci-contre

*Le jour sidéral est le temps que met la planète pour faire un tour complet sur elle-même (pour se retrouver dans la même position par rapport aux étoiles).

** Le jour solaire est l'intervalle de temps séparant deux passages du Soleil au méridien





PHILOSOPHIQUE ET PRATIQUE, L'ASTRONOMIE GRECQUE

REPERER

THALES DE MILET (-625, - 547)

est le premier à expliquer les phénomènes naturels sans intervention divine.

Il arrive ainsi à prévoir une éclipse.

LES PYTHAGORICIENS (du VIe au IVe av. J.C.)

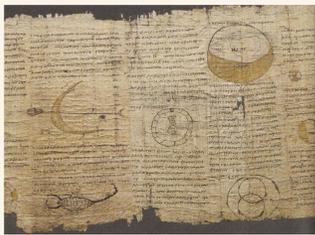
Pour eux, l'astronomie devient, avec l'arithmétique, la géométrie et la musique, **l'un des quatre arts mathématiques**.

Ils sont **les premiers à proposer un modèle dans lequel la Terre est sphérique**, car la sphère est le « volume parfait »

Philolaos de Crotona est le premier à imaginer la Terre en mouvement

Eudoxe de Cnide est le premier à proposer un modèle géométrique tenant compte de la réalité.

Il tente de modéliser le mouvement complexe des planètes comme le mouvement rétrograde de Mars.



Papyrus astronomique d'Eudoxe

ANAXIMANDRE DE MILET (-610, - 546)

propose le premier modèle mécanique de l'Univers

La Terre est un cylindre. Elle est entourée d'un cylindre percé de trous laissant passer le feu extérieur, créant ainsi les astres.

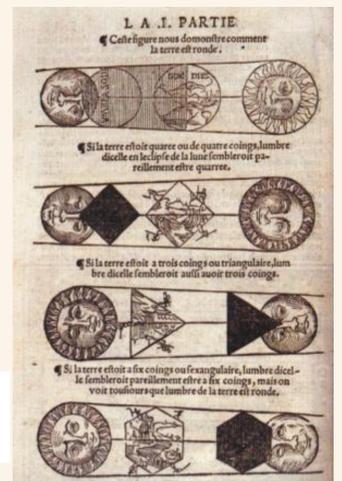
ARISTOTE (-384, -322)

Aristote ne tient pas compte des observations.

Son modèle géocentrique est d'ordre philosophique

Aristote divise l'Univers en deux parties:
-Le monde sublunaire (la Terre, la Lune, les planètes), imparfait et corruptible, composé de quatre éléments: la Terre, l'Eau, l'Air et le Feu
-Le monde supralunaire (au-delà de la Lune), parfait et immuable

Démonstration par réfutation de la sphéricité de la Terre par Aristote illustrée dans la cosmographie d'Apianus (1581)

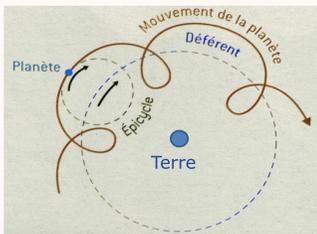


ARISTARQUE DE SAMOS (-310, -230)

évalue les distances Terre-Soleil et Terre-Lune en observant une éclipse. Il est le premier à envisager, sans succès, un système héliocentrique.

APOLLONIUS DE PERGAME (-262, -190)

invente un nouveau modèle tenant mieux compte des observations: Les planètes tournent sur un petit cercle (épicycle) tournant lui-même sur un cercle (défèrent) légèrement excentré par rapport à la Terre

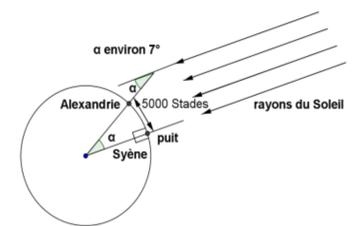


HIPPARQUE DE NICÉE (-190, -120)

découvre l'excellente précision des éphémérides mésopotamiennes.

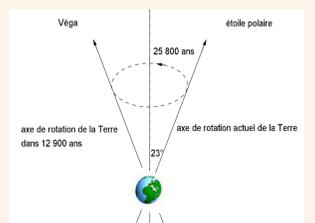
On lui doit aussi des résultats très importants:

- ★ La découverte de **la précession des équinoxes** (La direction de l'axe de la Terre n'est pas fixe: La Terre tourne comme une toupie, revenant dans la même position tous les 25 800 ans)
- ★ Le premier catalogue d'étoiles classées selon leur luminosité, classement à l'origine de notre échelle décroissante des magnitudes.
- ★ Une évaluation des distances Terre-Lune et Terre-Soleil plus précise que celle d'Aristarque



ÉRATOSTHÈNE (-276, -196)

calcule le diamètre de la Terre en observant les rayons du Soleil. Il compare l'ombre de deux objets verticaux (un gnomon et un puits) situés à Alexandrie et à Syène (Assouan) au solstice d'été et à midi.



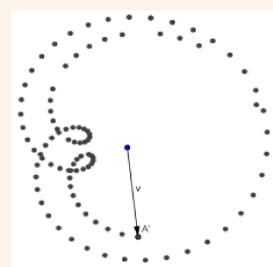
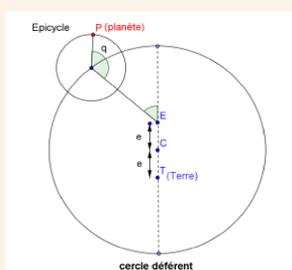
La vision du monde de Ptolémée fut considérée valide jusqu'au XVIe siècle

PTOLÉMÉE (90, 168) rédige une œuvre majeure: L'ALMAGESTE

(Le nom actuel d'Almageste est une déformation du titre arabe)

Ptolémée perfectionne les modèles précédents:

- ★ La Terre n'est pas au centre du système
- ★ La planète se meut sur un petit cercle dont le centre se déplace sur le cercle défèrent
- ★ Ptolémée explique ainsi le mouvement rétrograde apparent des planètes qui semblent revenir en arrière et décrire des boucles



L'Almageste traduit en arabe : manuscrit, daté du début du XIIIe siècle.

- L'Almageste est constitué de 13 livres :
- ★ Dans les **livres I et II** il expose une conception philosophique et mathématique de l'Univers ainsi que les bases de la trigonométrie.
- ★ Dans le **livre III** il décrit le mouvement du Soleil (trajectoire circulaire sur un cercle excentrique par rapport à la Terre)
- ★ Dans les **livres IV à VII** il s'intéresse aux mouvements de la Lune et adopte les principes des épicycles. Il y décrit correctement les éclipses.
- ★ Dans les **livres VIII et IX** : il dresse un **catalogue de 1022 étoiles organisées en 48 constellations, précisant leur position et leur magnitude.**
- ★ Dans les **livres X à XIII** : il s'intéresse aux **planètes : leurs tailles, leurs orbites, leurs mouvements rétrogrades, leurs levers et couchers héliaques...**





RELIGIEUSE ET MATHÉMATIQUE, L'ASTRONOMIE PERSE ET ARABE

REPERER



Astronomes au travail dans l'observatoire d'Istanbul (miniature du XVIe siècle)

Après Ptolémée, sur plus de mille ans, les connaissances en astronomie stagnent en Europe. Dans le monde islamique, en revanche, d'importants progrès vont se produire entre le IXe et le XIe siècle, tant dans les outils mathématiques de l'astronomie que dans l'observation du ciel.

L'astronomie pour organiser le culte

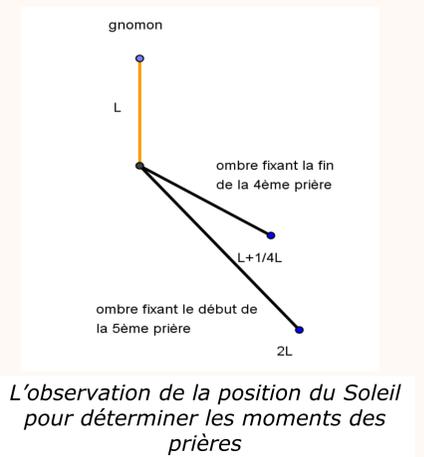
Les astronomes du Xe siècle créent la trigonométrie sphérique pour déterminer la direction de la prière par rapport à la Mecque.

Le calendrier islamique est d'abord lunaire : l'année comporte 12 mois de 29 ou 30 jours (une révolution synodique), soit 354 ou 355 jours.

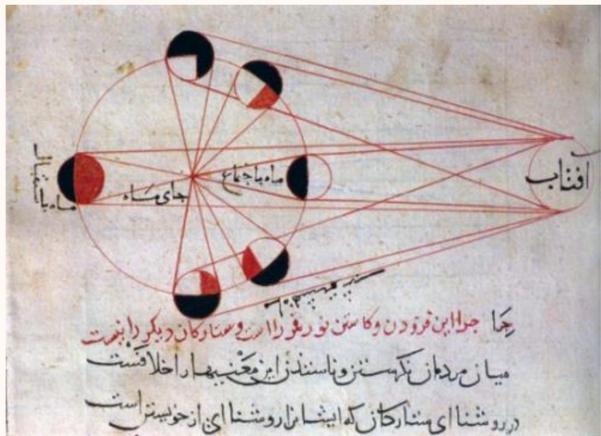
Omar Khayyâm (1048-1131), directeur de l'observatoire d'Ispahan en 1074, réforme ce calendrier imprécis, en désaccord avec le rythme des saisons et donc l'économie.

Il introduit comme dans le calendrier julien **une année bissextile** et mesure la longueur de l'année comme étant de 365,24219858156 jours.

Ce calendrier se révélera plus exact que le grégorien créé cinq siècles plus tard !



L'observation de la position du Soleil pour déterminer les moments des prières



Une astronomie qui propose des modèles mathématiques précis cohérents avec les observations

Les calculs sont d'une remarquable précision **Al-Battani (855-923)** par exemple a calculé la précession des équinoxes (54.5" par an), corrigé certains calculs de Ptolémée et trouvé 23° 35' pour l'inclinaison de la Terre.

Al Bîrunî (973-1048) observe une éclipse depuis l'observatoire de Kath. Un autre astronome l'observe depuis Bagdad. Le décalage de temps entre leurs deux observations leur permet de calculer la longitude des deux villes.

Les astronomes arabes créent de nombreux observatoires. Ils vont y étudier, critiquer, améliorer le système de Ptolémée. Malgré l'intuition qu'en eurent plusieurs astronomes tels **Ibn al-Haytham, dit Alhazen (965-1039)** qui écrit «*Les doutes sur Ptolémée*», le système géocentrique ne fut jamais vraiment remis en cause jusqu'au XV^e siècle.

Une astronomie qui génère des progrès technologiques

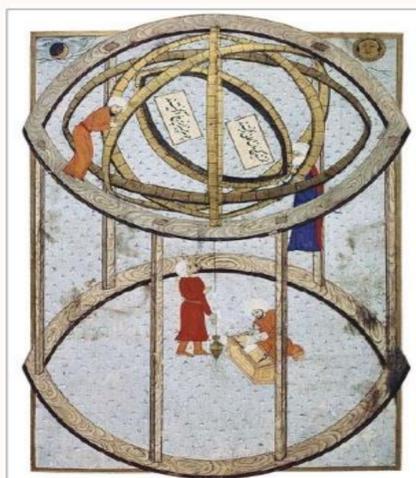
Les astronomes, tels Ibn al-Shâtir qui réalisa cadrans solaires, astrolabes..., fabriquent des instruments d'une extrême précision.

Al-Tûsi (1201- 1274) imagine un système combinant deux mouvements circulaires uniformes, la planète tournant sur le petit cercle intérieur deux fois plus vite qu' autour du grand cercle. Son modèle sera amélioré et complexifié par **Al-Shirasi et Al-Urdi**.

Son manuscrit parviendra en Italie et **COPERNIC** en aura connaissance



Astrolabe du Xe siècle



Gigantesque sphère armillaire « Si grande qu'un cheval pouvait passer entre les anneaux » (miniature persane de 1581)



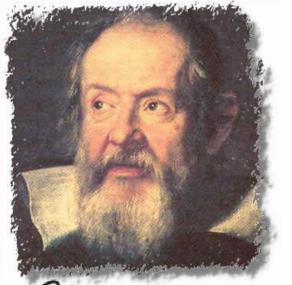
Le couple d'Al-Tûsi





Pise 1564

Arcetri-1642

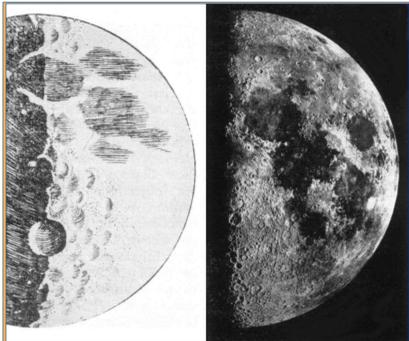


Galileo Galilei

Octobre 1604: une nouvelle étoile apparaît dans le ciel, aussi brillante que Vénus. En montrant qu'il s'agit bien d'une étoile, par ses méthodes purement observationnelles, libérées du dogmatisme ambiant, Galilée (alors professeur de mathématiques à Padoue) va porter un premier coup de boutoir au modèle Aristotélicien et à l'immuabilité de sa « sphère des fixes ».

Des lunettes circulaient en Europe depuis quelques années déjà, mais pendant l'été et l'automne 1609, Galilée s'approprie et perfectionne cet instrument «grâce auquel des objets très éloignés de l'oeil de l'observateur sont vus très distinctement comme s'ils étaient proches » et.

Les lunettes qu'utilisait Galilée étaient très petites (37mm de diamètre et un grossissement de 20x) et de qualité optique très inférieure à ce qu'on peut trouver aujourd'hui pour quelques euros. Son acuité visuelle était impressionnante.



Dessin de Galilée

Photo actuelle

RELIEFS SUR LA LUNE

Début 1610, il est déjà en mesure de présenter ses observations sur la Lune « *irrégulière, rugueuse, pourvue de cavités et de gonflements, tout comme la Terre* » et la voie lactée « *amas de toutes petites étoiles* ». Quelques jours plus tard, il découvre les satellites de Jupiter.



SATELLITES DE JUPITER

Date	Ori.	*	*	○	*	Occ.
7 janvier 1610		*	*	○	*	
8 janvier 1610				○	*	*
10 janvier 1610		*	*	○		
11 janvier 1610		*	*	○		
12 janvier 1610		*	*	○	*	
13 janvier 1610		*	○	*	*	
15 janvier 1610			○	*	*	*
15 janvier 1610			○	*	*	*
16 janvier 1610		*	○	*	*	



La succession des positions des satellites de Jupiter telle que décrite dans le « *Messenger des étoiles* »

Galilée « offre » à Cosme II de Médicis les satellites de Jupiter en les appelant « *planètes Médicées* », ce qui lui vaut l'honneur d'un poste bien payé à Florence, sans obligation d'enseignement et donc l'opportunité de disposer de tout son temps pour ses recherches. Ils portent aujourd'hui les noms de Io, Europe, Ganymède et Callisto.

SIDEREVS
NUNCIVS

MAGNA, LONGEQVE ADMIRABILIA
Speſtacula pandens, ſuſcipiendaque proponens
vnicuique, præſertim verò
PHILOSOPHIS, atq; ASTRONOMIS, qua à
GALILEO GALILEO
PATRITIO FLORENTINO
Patauini Gymnaſij Publico Mathematico
PERSPICILLI

Nuper à ſe reperi beneficio ſunt obſeruata in LUNE FACIE, FIXIS IN
NUMERIS, LACTEO CIRCVLO, STELLIS MERVLIOſIS,
Aprime verò in
QVATVOR PLANETIS
Circa IOVIS Stellam diſpartibus interualis, atque periodis, celeſtitate mirabili circumuolutis; quos, nemini in hanc vltique diem cognitos, nouiſſimè Author deprehendit primus; atque

MEDICEA SIDERA
NUNCVPANDOS DECREVIT.



VENETIIS, Apud Thomam Baglionum. M D C X.
Superiorum Permiſſu, & Præſidio.

Le 12 mars 1610 paraît à Venise le « *Messenger céleste* » (*Sidereus Nuncius*), annonçant l'ensemble de ces découvertes révolutionnaires, un des livres les plus importants de l'histoire des sciences et des idées cosmologiques.

Les multiples influences qu'ont exercé sur lui son environnement familial, social et artistique sont fondamentales dans ses travaux et les interprétations qu'il a pu en faire.

SATURNE



Toujours cette même miraculeuse année 1610, Galilée observe les tâches solaires, puis en juillet la forme étrange de Saturne « *qui n'est pas une étoile unique mais trois ensemble, qui se touchent, immobiles l'une par rapport aux autres* » et en septembre les phases de Vénus « *La mère des amours imite les phases de la Lune* ».

PHASES DE VÉNUS

