

CONFERENCE du MERCREDI 4 MAI 2016

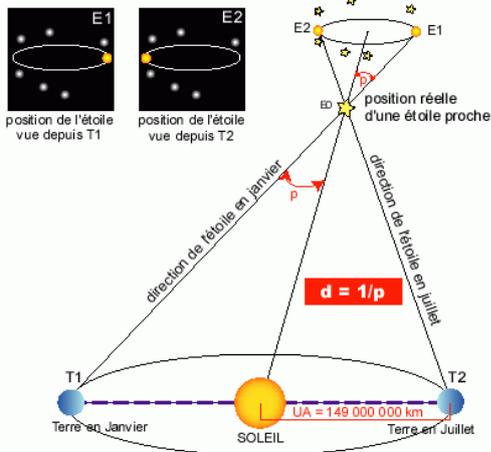
# LES PASSAGES de MERCURE et VENUS devant le SOLEIL

Monsieur Jean-Eudes ARLLOT  
Astronome à l'Observatoire de Paris



Depuis Eratosthène, astronome grec qui le premier réalisa une mesure astronomique, purement géométrique, (celle de la circonférence terrestre, deux siècles av JC, qu'il l'estima à 39 375 km, alors que la valeur actuellement admise est autour de 40 070 km), les astronomes cherchent à mesurer avec la plus grande précision possible les distances dans l'Univers. Ils ont aujourd'hui à leur disposition trois outils adaptés à l'éloignement des objets à mesurer:

**Lorsque la mesure concerne des astres assez proches, jusqu'à quelques centaines d'années-lumière de distance**, ils utilisent la méthode de la **parallaxe**



Décalage périodique des positions apparentes des étoiles proches du à la position variable de la Terre sur son orbite autour du Soleil. Plus l'étoile est proche, plus ce mouvement est important. La distance d'une étoile en parsecs<sup>1</sup> est simplement 1/parallaxe, (soit en années lumière 3.2616/parallaxe) si la parallaxe est exprimée en secondes d'arc.

**Quand la distance à mesurer devient trop importante, les astronomes se tournent vers les céphéides.** Etoiles variables dont la périodicité est proportionnelle à l'éclat.

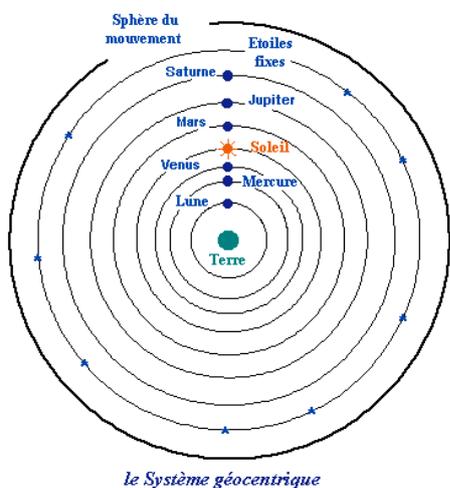
**Restent les astres les plus lointains** : là, plus d'étoile observable individuellement, mais des galaxies et certains astres exotiques comme les quasars. Les astronomes ont alors recours à la mesure du décalage vers le rouge : plus l'astre est éloigné, plus son spectre a des raies (d'émission et d'absorption) décalées vers les grandes longueurs d'onde, c'est-à-dire vers le rouge.



# LA NECESSITE D'UN MODELE THEORIQUE EN ASTRONOMIE

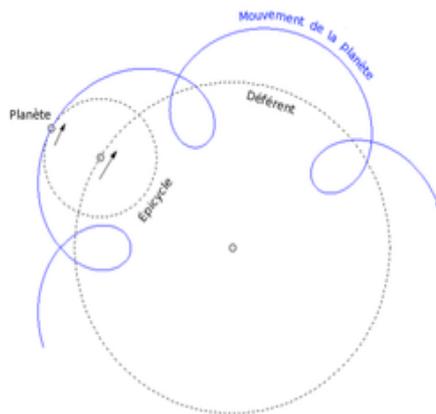
Les astronomes de l'Antiquité ont déjà modélisé leur vision du Ciel

## UNIVERS D'ARISTOTE



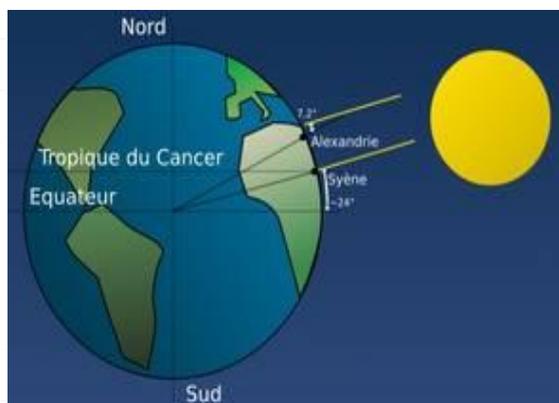
S'opposant au monde sublunaire, complexe et perturbé, existe le monde Céleste. C'est un monde parfait et immuable, dont les constituants (Lune, Soleil, planètes, Etoiles) sont chacun sur des sphères concentriques, centrées sur la Terre, et qui tournent autour de celle-ci. Le cercle représente un mouvement fondamental et parfait. Les objets les plus proches de la Terre (la Lune et le Soleil) tournent le plus rapidement. Les plus éloignés (les étoiles fixes), sont les plus idéaux, les plus parfaits, ils sont à l'origine de tous mouvements, et ne se déplacent pas. La Terre est au centre, puis viennent la Lune, Mercure, Venus, le Soleil, Mars, Jupiter et Saturne.

Contrairement à une idée reçue, Ptolémée ne reprit pas à son compte l'idée d'Aristote selon laquelle les astres étaient placés sur des sphères de cristal. Il dit même expressément que « les astres nagent dans un fluide parfait qui n'oppose aucune résistance à leurs mouvements ». On ignore si cette vision, proche de la notion de vide, était déjà présente chez Hipparque ou si elle doit être mise au crédit de Ptolémée. Pour celui-ci, déférents et épicycles sont donc immatériels.



## UNIVERS DE PTOLEEMEE

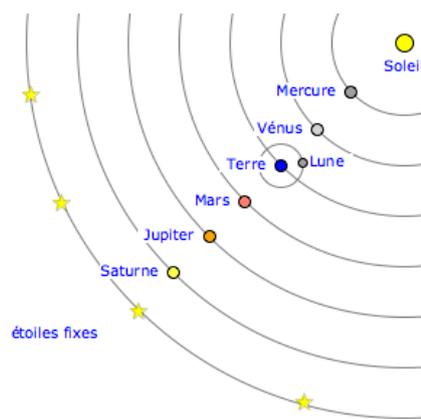
Les planètes tournent sur un épicycle qui lui-même tourne sur un déférent. Ce système permet de modéliser le mouvement rétrograde des planètes.



Le calcul fait par Eratosthène repose sur quelques suppositions:  
**La première**, c'est bien sûr que la Terre est ronde !  
**La deuxième** supposition, c'est que les rayons du Soleil qui frappent la Terre sont bien parallèles entre eux. Cela revient à supposer que le Soleil est situé suffisamment loin, ce qui en l'espèce est une approximation tout à fait raisonnable.  
**Enfin la dernière hypothèse faite par Eratosthène, c'est que Syène et Alexandrie sont situées sur le même méridien**  
 Heureusement, Eratosthène commisa une autre erreur qui compensa celle-ci : par la technique du chameau il sous-estima légèrement la distance entre les deux villes (il devait avoir des chameaux de compétition)  
 Ce calcul d'Eratosthène est donc surtout devenu célèbre une fois qu'on a su véritablement qu'il était proche de la réalité, et est resté en second plan pendant plus de 1500 ans !

## UNIVERS d'ERATOSTHENE: Calcul de la circonférence de la Terre

Copernic va affirmer que la Terre n'est ni immobile, ni au centre du monde. Elle est en effet animée de 2 mouvements : l'un sur elle-même en 24h (qui remplace le mouvement de la sphère des fixes des Grecs anciens) et l'autre autour du Soleil en un an, faisant de la Terre une planète comme les autres. Contrairement à ce que l'on croit parfois, Copernic ne va pas démontrer l'héliocentrisme, car il faudra attendre plus de 150 ans pour avoir une preuve du mouvement de la Terre. L'argument de Copernic est que son modèle est plus simple, plus logique et plus "harmonieux" que celui de Ptolémée (même si dans le détail le fonctionnement mathématique du système copernicien est assez complexe).



## LE SYSTEME HELIOCENTRIQUE DE COPERNIC



Tout au long des siècles, depuis l'Antiquité préhellénique, de la vision géocentrique des astronomes grecs à la vision héliocentrique de Copernic, cette astronomie empirique se construit avec "les briques" apportées par chacun des acteurs de cette période. Ils ont mis en place les premiers modèles théoriques de l'Univers.

Depuis le 15<sup>ème</sup> siècle, avec la lunette de Galilée, les nouveaux instruments, au sol puis dans l'espace, ont permis d'acquérir un volume croissant de données et ont conduit à des modèles théoriques de plus en plus élaborés.

L'astronome observe essentiellement des angles sur un ciel que l'on appelle la sphère céleste. Pourtant, tous les astres ne sont pas à la même distance de l'observateur. La Terre paraît plate et immobile. Comment, à partir de simples mesures d'angles, va-t-on pouvoir mesurer la taille de la Terre, son mouvement dans l'espace, la distance qui la sépare et du Soleil et des astres du ciel ?

**Deux notions vont être nécessaires :**

### **La première est la notion de parallaxe**

Si deux observateurs voient un même objet sous deux angles différents, c'est que l'objet n'est pas à l'infini. La différence de vue ne dépend que de la position des observateurs et de la distance de l'objet observé. C'est le phénomène de relief, créé par notre cerveau à partir des images différentes reçues par nos deux yeux. Plus la distance de l'objet est grande, plus la distance entre les deux observateurs (entre les deux "yeux" qui observent) doit être grande.

### **La deuxième notion est celle d'un modèle théorique d'univers :**

Si Eratosthène, deux siècles av/J.C., réalisa une approche de la circonférence de la Terre, Cassini et Picard, en collaboration, déduisirent en 1671, le rayon de la Terre avec une exactitude jusque là inégalée.

La Terre, modèle théorique, permettra d'évaluer la distance Terre/Soleil (Mais pour le Soleil, c'est très difficile : car étant un corps gazeux et incandescent, il n'est pas facile de délimiter ses bords). Cassini devra, en premier, évaluer la distance de Mars lorsqu'elle est au plus

près de la Terre . Il mettra , pour cela, la 3<sup>ème</sup> loi de Kepler en application.

Assistant de Tycho Brahé, héritier de ses observations, **Kepler** mit à profit les travaux empiriques de son maître pour formuler les trois lois qui portent son nom :

- ▶ **1<sup>ère</sup> Loi** : Les planètes décrivent des ellipses dont le Soleil occupe l'un des foyers.
- ▶ **2<sup>ème</sup> Loi** : Le rayon vecteur Planète/Soleil balaie des aires proportionnelles au temps mis pour les balayer.
- ▶ **3<sup>ème</sup> Loi** : Le carré de la durée de révolution est proportionnel au cube du grand axe de l'orbite.

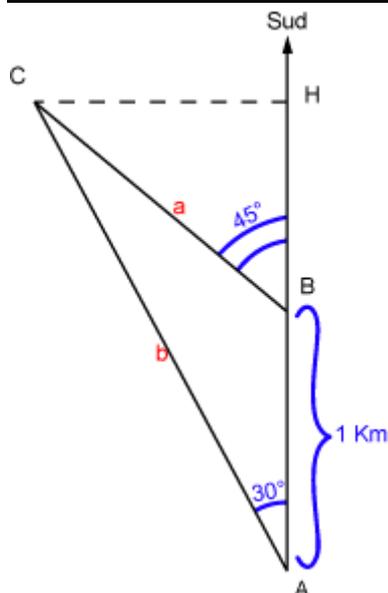
Kepler ne pouvait pas démontrer ses lois : il lui manquait les principes fondamentaux de la mécanique ainsi que la loi de Newton, c'est-à-dire les fondements de la dynamique, qui, appliqués aux astres, forment la mécanique céleste. Kepler introduit la notion de trajectoire elliptique qui va complètement modifier la modélisation du système solaire.



## COMMENT PEUT-ON MESURER L'UNIVERS ?

Si la méthode de la **parallaxe** est appliquée en astronomie, la méthode de la **triangulation** est utilisée en géométrie pour mesurer la distance d'un objet sur la Terre. Elles utilisent le même principe pour déterminer la distance d'un objet éloigné. On remarque que la précision de la mesure dépend de la longueur de la base.

### Mesure de distance par triangulation



La triangulation est une technique permettant de déterminer la position d'un point. Elle est aussi le processus qui permet de déterminer une distance en calculant la longueur de l'un des côtés d'un triangle, et en mesurant deux angles de ce triangle.

Pour calculer la distance CH, il suffit de résoudre le triangle ABC connaissant les deux angles en A et B et la base AB. On applique une des relations entre angles et côtés dans un triangle.

dans un triangle quelconque ABC, on a la relation :

$$\frac{a}{\sin \bar{A}} = \frac{b}{\sin \bar{B}} = \frac{c}{\sin \bar{C}}$$

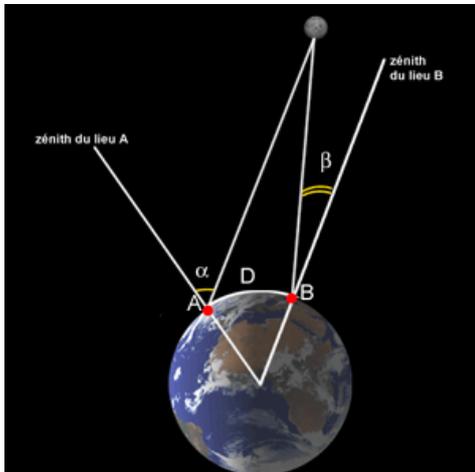
L'importance de la mesure par triangulation se retrouve dans bien des thématiques:

C'est en opérant des triangulations astucieuses que Kepler a déterminé la nature de l'orbite de Mars, pour en dériver ses **lois** ; il lui fallut se positionner dans le bon référentiel, héliocentrique, et considérer différents événements à différentes dates pour conduire les mesures.

De manière plus moderne, c'est à une sorte de triangulation que se livrent les astrophysiciens pratiquant l'**interférométrie** pour mesurer de très

petits diamètres angulaires : en élargissement la base d'observation, ils arrivent à retrouver l'information de la distance.

### Mesure par la parallaxe



L'image ci-contre montre le principe de détermination de la distance Terre-Lune par la parallaxe (on connaît D et le rayon terrestre et on mesure  $\alpha$  et  $\beta$ ). Comme nous l'avons vu précédemment, il est impératif de disposer d'instruments capables de mesurer une différence entre les angles  $\alpha$  et  $\beta$ . Cela limite la distance à la Terre mesurable.

En astronomie, la parallaxe est l'angle sous lequel on pourrait voir une longueur connue, depuis un astre quelconque. On distingue généralement deux types de parallaxe :

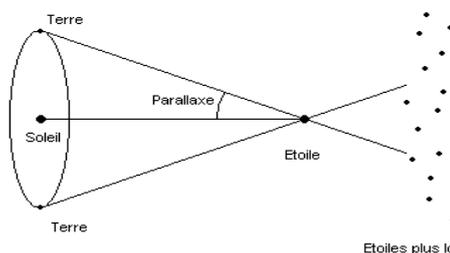
la parallaxe diurne et la parallaxe annuelle.

-La parallaxe diurne est utilisée pour les objets du Système solaire : c'est l'angle sous lequel on voit, depuis l'un d'entre eux, le rayon terrestre.

-La parallaxe annuelle est utilisée pour les étoiles (proches) : c'est l'angle sous lequel on voit le demi-grand axe de l'orbite terrestre depuis une étoile.

### **Le mouvement des étoiles**

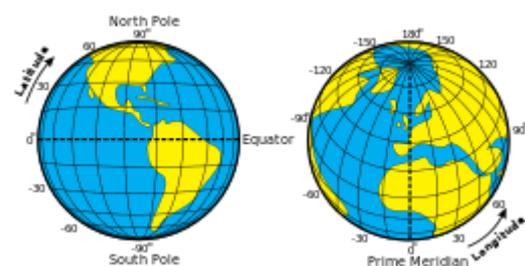
En 1718 Edmond Halley mit en évidence que les étoiles n'étaient pas fixes dans le ciel. Les étoiles pouvaient librement se mouvoir les unes par rapport aux autres. Depuis la Terre, cela se traduisait par de légères modifications de leur position dans le ciel, de l'ordre d'une seconde d'arc par an pour les étoiles les plus proches.



*Du fait de la révolution de la Terre autour du Soleil, la position apparente d'une étoile proche par rapport aux étoiles lointaines varie légèrement. En mesurant le déplacement angulaire, on peut déterminer la distance à l'étoile. Si le petit déplacement angulaire est mesurable, on peut à partir de quelques connaissances géométriques calculer la distance à l'étoile.*



pour se repérer à la surface de la planète on utilise les Pôles, l'Equateur, **LES COORDONNEES GEOGRAPHIQUES** : parallèles (ou latitudes nord, sud) et les méridiens (ou longitudes)



## COORDONNEES EN ASTRONOMIE :

En fonction des astres que nous voulons observer, certains systèmes de coordonnées sont plus ou moins pratiques à utiliser pour un astronome amateur. Il existe principalement 4 types de coordonnées utilisés en astronomie :

- 1) [Le système de coordonnées horizontales ou azimutales](#)
- 2) [Le système de coordonnées équatoriales](#)
- 3) [Le système de coordonnées écliptiques](#)
- 4) [Le système de coordonnées galactiques](#)

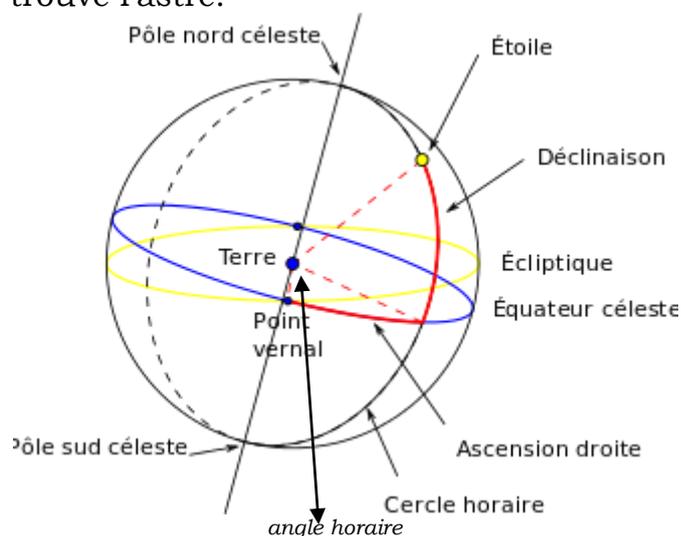
### **LE TEMPS SIDERAL LOCAL**

Le **temps sidéral** est à un instant et en un lieu donné l'angle horaire du point vernal.

Par définition, le temps sidéral est nul lorsque le point vernal passe dans le plan méridien du lieu considéré, et il augmente d'une heure sidérale à chaque fois que la Terre tourne de  $15^\circ$  par rapport au point vernal. En quelque sorte le *temps sidéral* mesure le déplacement de la voûte céleste en un lieu donné par rapport au méridien local.

Malgré son nom, le temps sidéral n'est pas un **temps** au sens habituel, mais la mesure de l'angle entre le point vernal et le plan méridien.

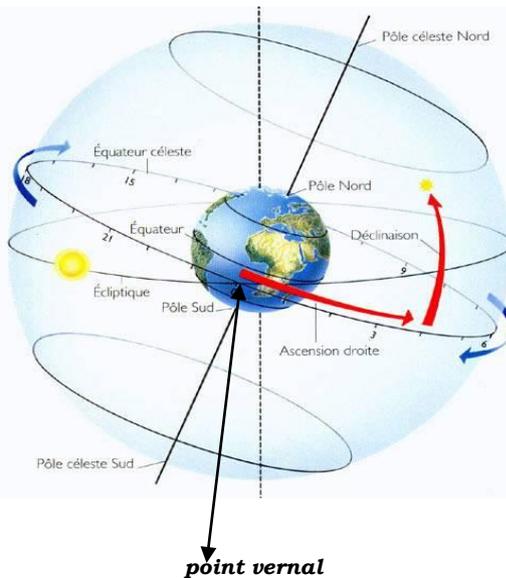
En astronomie, la position d'un astre sur la sphère céleste est repérée par deux coordonnées, l'ascension droite et la déclinaison. À tout instant la somme de l'ascension droite d'un astre et de son angle horaire est égale au temps sidéral. Connaissant les coordonnées de l'astre, ainsi que le temps sidéral local, cette propriété permet de savoir sur quel méridien se trouve l'astre.



**Cercle horaire** ([Le Repérage des astres](#)). - c'est l'intersection avec la sphère céleste d'un plan qui passe par l'astre considéré et la ligne des pôles. C'est l'analogue d'un méridien sur le globe terrestre.

En astronomie, l'**angle horaire** d'un astre est défini comme la différence, prise dans le sens direct, entre le temps sidéral et son ascension droite. Autrement dit c'est la portion d'arc d'équateur comprise entre le plan du cercle horaire passant par l'astre et le plan du méridien céleste.

On a une relation simple entre l'ascension droite, l'angle horaire et le temps sidéral local :  $H = T - \alpha$



Quand on doit spécifier un point à la surface de la Terre, on utilise les **LATITUDES & LONGITUDES**. En projetant ces latitudes et ces longitudes sur la sphère céleste, nous obtenons alors respectivement les **DECLINAISONS**, et les **ASCENSIONS DROITES**. L'intersection de l'équateur céleste et de l'écliptique donne une droite appelée ligne des nœuds. Les deux plans se coupent en deux points (deux nœuds) et l'angle formé par ces deux plans est de  $23^{\circ}27'$  : c'est l'obliquité de l'écliptique. L'un de ces points est **POINT VERNAL** (ou *point gamma*) : il correspond au nœud ascendant. C'est le point de référence de notre système, il se trouve dans le plan de l'équateur céleste. Toutes les ascensions droites seront comptées à partir de ce point zéro.

**point vernal**

Durant l'année, le soleil passera donc au-dessus de l'équateur céleste (déclinaison positive) entre le printemps et l'automne, puis en-dessous (déclinaison négative) de l'équateur céleste entre l'automne et le printemps suivant. Ainsi le Soleil coupe dans sa course montante l'équateur céleste au niveau du nœud ascendant au moment de l'équinoxe du printemps. Puis il coupe l'équateur céleste dans sa course descendante au niveau du nœud descendant au moment de l'équinoxe d'automne.



La troisième Loi de Kepler permet de connaître les dimensions du système solaire en unités relatives, par exemple en "**unités astronomiques**" (UA), où 1 UA est la distance moyenne du Soleil à la Terre. Cependant exprimer l'UA en kilomètres ou en milles nécessite l'utilisation d'une certaine variété de **parallaxe**). Les objets planétaires étant considérablement éloignés, le problème est que la différence de leur position apparente, vue depuis deux endroits éloignés de la terre, est tout à fait infime.

Edmond Halley(1716) avait suggéré d'utiliser le passage de Venus devant le disque du soleil et qu'une information équivalente pouvait être obtenue en **chronométrant** les passages de Venus vus de deux endroits A à B.

**Les transits de Vénus** font partie des phénomènes astronomiques prévisibles les moins fréquents et se produisent actuellement suivant une séquence qui se répète tous les 243 ans, avec des paires de transits espacés de 8 ans séparées par 121,5 puis 105,5 ans. Avant 2004, la paire de transit précédente date de décembre [1874](#) et décembre [1882](#). Le premier de la paire de transits du début du XXI<sup>e</sup> siècle [a eu lieu le 8 juin 2004](#) et le suivant [a eu lieu le 6 juin 2012](#). Après 2012, les prochains transits auront lieu en 2117 et 2125.

Il y a en moyenne 13 **passages de Mercure** par siècle. De nos jours tous les passages de Mercure se produisent à quelques jours du 8 mai ou du 10 novembre (le phénomène se répétant à des intervalles de 13 ou 33 ans en mai, ou tous les 7, 13 ou 33 ans en novembre). Lors du passage du mois de novembre, Mercure est proche de sa périhélie et a un diamètre de 10 secondes d'arc. Tandis que Mercure est proche de son aphélie lors du passage en mai et nous apparaît alors avec un diamètre de 12 secondes d'arc.

**Johannes Kepler** (1571-1630) réussit alors, après des années d'un travail acharné, à découvrir les lois qui commandent les mouvements des planètes, ce qui lui permit de mettre au point de nouvelles tables de calcul des positions des planètes appelées Tables Rudolphines. Il avait prédit, juste avant sa mort, le transit de Mercure du **7 novembre 1631** qui sera le premier à être observé consciencieusement en Europe par Pierre Cassendi (Digne, 1592 – Paris, 1655) qui fait ses observations depuis Paris.

**4 décembre 1639** est le premier transit de la planète Vénus dont on connaît des observations astronomiques, réalisées par les astronomes anglais Jeremiah Horrocks et William Crabtree qui ont appliqué les lois de Kepler.

**7 novembre 1677**- Ile de St Hélène - Transit de Mercure observé par Halley.

**6 juin 1761** - Expédition en Sibérie de Chappe d'Auteroche - Transit de Vénus

- Expédition de Le Gentil à Pondichéry: ayant manqué de peu le transit précédent, passe huit ans à voyager avant de tenter d'observer celui de 1769 à Pondichéry. Le jour venu, les nuages l'empêchent de réaliser ses observations. Son échec lui fait presque perdre la raison et, à son retour en France après onze ans d'absence, il découvre qu'il a été déclaré mort, qu'il a été remplacé à l'Académie des sciences, qu'il est ruiné et que sa femme s'est remariée.

**Juin 1769** : - Transit de Vénus en Californie- Chappe nommé pour cette mission y mourut le 1er août 1769.

- Tahiti : L'observation du transit est l'une des raisons du premier voyage de James Cook. L'équipage débarque à Tahiti, alors possession française, et construit un petit observatoire au nord de l'île à un endroit nommé depuis Pointe Vénus. L'astronome Charles Green réalise les observations: Comme lors du précédent transit, le **phénomène de la goutte noire** empêche de mesurer correctement l'instant où le disque de Vénus se détache du limbe solaire.



## RESULTATS OBTENUS :

**18<sup>ème</sup> siècle** : Le calcul de l'UA par le transit de Vénus, distance moyenne séparant la Terre du Soleil. Grâce à la 3<sup>ème</sup> loi de Kepler et à la méthode dite de Halley, les astronomes ont pu affiner cette valeur pour comprendre notre place dans le système solaire et estimer les distances qui nous séparent des autres étoiles.

### **19<sup>ème</sup> siècle : Progrès scientifiques**

Le Télégraphe Optique Chappe constitue le premier moyen de télécommunications au monde.

Première expérience de Niepce pour fixer les images.

### **20<sup>ème</sup> siècle : L'expédition de l'Amiral Mouchez à Saint-Paul en 1874**

les astronomes se sont intéressés aux transits de Mercure et de Vénus. Le chronométrage en divers lieux sur Terre des

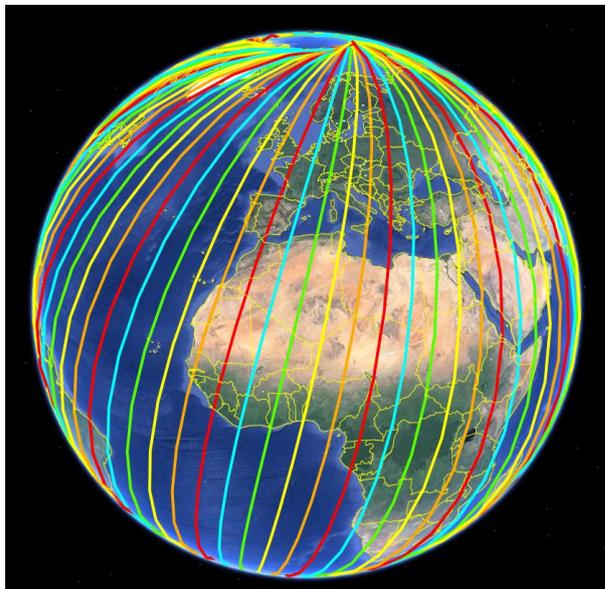
solaire permettant de déterminer la distance entre le Soleil et la Terre. Le passage de Vénus devant le Soleil étant très rare l'observation du transit de cette planète des 8 et 9 décembre 1874 a été activement préparée, dans un esprit de coopération et d'émulation internationale, avec pas moins de 62 missions d'observation à travers le globe. Ce fut un succès total.

### 1874 - JAPON :

Scientifique, l'astronome Jules Janssen (1824-1907), fut un des principaux acteurs du vaste mouvement d'émancipation de la photographie à la fin du XIXe siècle. À l'origine de sa notoriété une expérience singulière: celle effectuée en 1874, à l'occasion du transit de la planète Vénus devant le Soleil, avec un dispositif de son invention, le "Revolver photographique". Ce fut le premier film du transit de la planète Vénus devant le Soleil.

### 6 décembre 1882 - AMERIQUE CENTRALE ET AMERIQUE DU SUD :

Le transit de 1882 est le dernier à posséder un intérêt scientifique substantiel : les techniques modernes utilisant des sondes spatiales et la télémétrie radar permettent de calculer la valeur de l'unité astronomique avec une précision de 30 m et rendent obsolète la méthode des parallaxes dans ce cadre.



- Âge : 4,6 milliards d'années
- Unique dans le système solaire : premières traces d'êtres vivants il y a 3,5 milliards d'années (bactéries)
- Plantes : 600 millions d'années
- Vertébrés : 500 millions d'années
- Hominidés : 6 millions d'années
- Homo sapiens : 200 000 ans
- % temps : 0,0043 %
- MAIS : IMPACT CONSIDERABLE

Source Wikipedia

lydia-cretin@sfr.fr