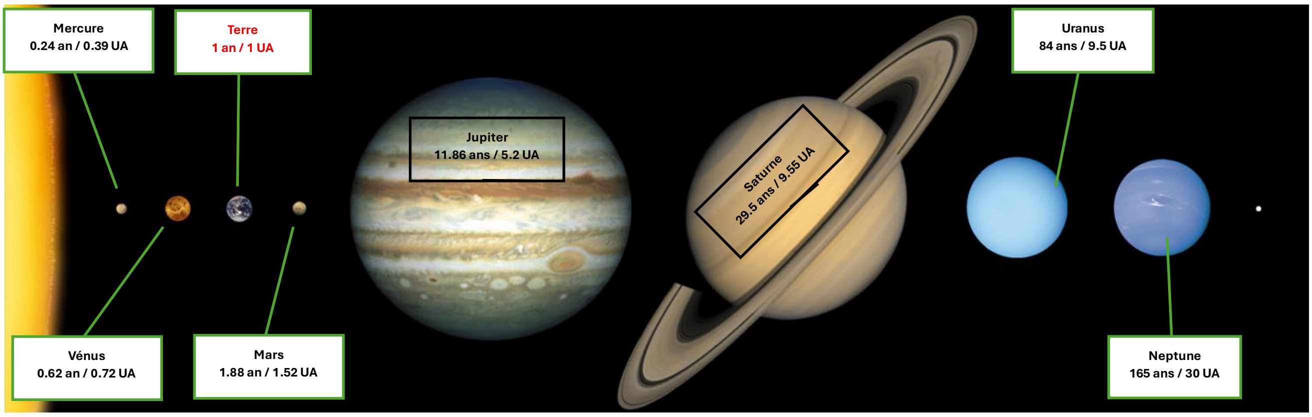
Exposé Neptune Astro : mesurer l'univers

Sommaire

Les mesures



Les tailles des planètes sont à l'échelle mais pas les distances

La **mesure de l'unité astronomique (UA)**, c'est-à-dire la distance moyenne entre la Terre et le Soleil, a été un enjeu central de l'astronomie des XVIe et XVIIe siècles. À cette époque, on ne pouvait pas la mesurer directement, mais plusieurs astronomes ont cherché à en estimer la valeur par des **méthodes géométriques et des observations astronomiques et beaucoup d'astuce et d'inventivité.**

Exposé Neptune Astro : mesurer l'univers

Nous sommes à une époque (16 et 17ième siècle soit sous Louis 14 mais surtout Louis 15 et Louis 16) ou toutes les connaissances de base de l'astronomie sont connues, a savoir :

- La terre est ronde et tourne autour du soleil en **365 jours**
- Elle mesure 40 000 Km de circonférence => son diamètre est de **12 732 Km**
- **La lune** tourne autour de la terre en **27.3 jours.**
- Son diamètre est de+/- **1/3** de celui de la terre (D=3 472 Km) et elle est située à **384 000 Km de la terre.**
  Mais à cette époque les scientifiques n'ont aucune idée des dimensions du système solaire.
  Par contre , grâce aux lois de Kepler on connait les proportions du système solaire

Les lois de Kepler

Grâce aux lois de **Johannes Kepler** (1571−1630) on connait les **distances relatives** des cinq planètes de l'époque par rapport au Soleil. En d'autres termes, on connait les distances dans **une unité inconnue**, la distance Terre-Soleil mais on ne connait pas la distance Terre-Soleil en km.
La mesure d'une seule distance (planète-Soleil) et la trigonométrie va donner l'échelle de tout le système et donc la distance Terre-Soleil en km tant attendue par les astronomes. En 1687, Isaac Newton découvre la loi de la gravitation qui lui permet d'expliquer les trois lois de Kepler quib avait procédé par tatonnements.

Rappel des 3 lois de Kepler :

1 : loi des orbites (1609)

Les planètes se déplacent sur une orbite elliptique dont le soleil est un des foyers

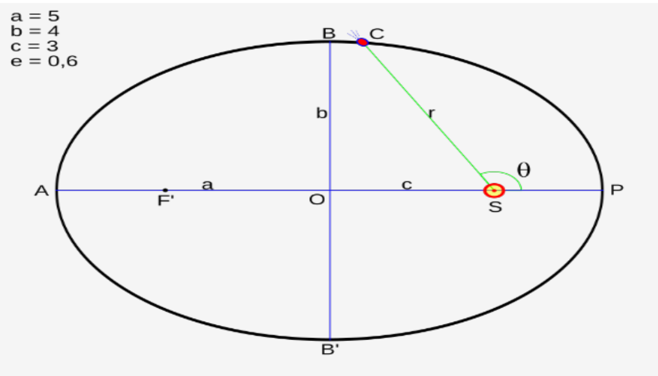
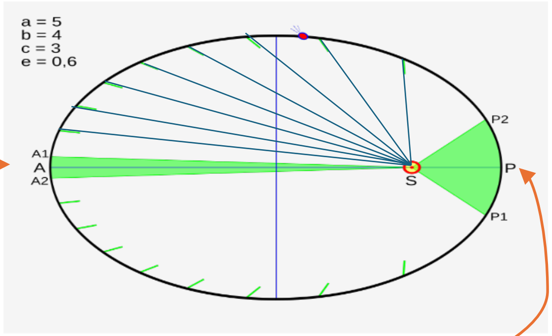


Schéma d'une orbite elliptique, **l'excentricité étant très exagérée** vis-à-vis de celles des planètes du système solaire.
L'orbite de la terre se rapproche d'un cercle.

2 : loi de aires (1609)

Des aires égales sont balayées dans des temps égaux



Le temps pour balayer l'aire SP2P1 est le même que pour balayer l'aire SA1A2 => la planète va moins vite **ici**…………………………………… que **là**

3 : loi des périodes (1619)

Le **carré** de la période sidérale d'une planète est directement proportionnel au **cube** du **½ grand axe de son orbite (Distance)** soit :

$$\boldsymbol{Période^2 / Distance^3 = constante}$$

Vérification de la loi des périodes:

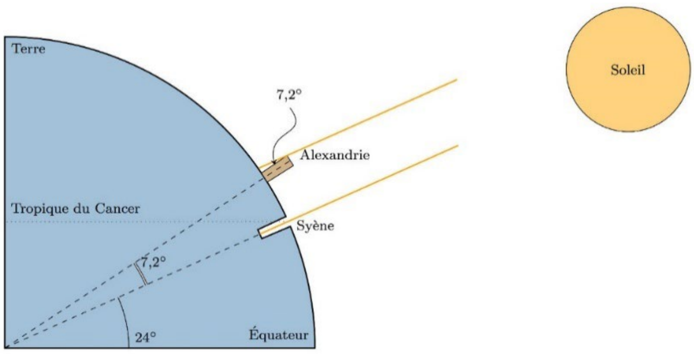
	Période		Distance au soleil		$Période^2 / distance^3$	
	Année terrestre	Jour terrestre	UA	M de Km		
Mercure	0,24	87,6	0,39	58,5	**0,97**	**0,038**
Venus	0,62	226,3	0,72	108	**1,03**	**0,041**
Terre	1	365	1	150	**1,00**	**0,039**
Mars	1,88	686,2	1,52	228	**1,01**	**0,040**
Jupiter	11,86	4328,9	5,2	780	**1,00**	**0,039**
Saturne	29,5	10767,5	9,55	1 432,5	**1,00**	**0,039**

Exposé Neptune Astro : mesurer l’univers

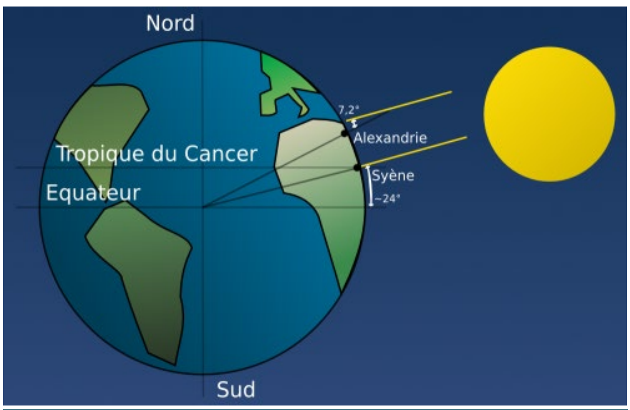
Je vais maintenant vous raconter les aventures des savants fous qui ont entrepris de mesurer l’univers en commençant par le système solaire
On commence par mesurer la terre.
<u>Mesure de la circonférence de la terre par les Grecs</u>

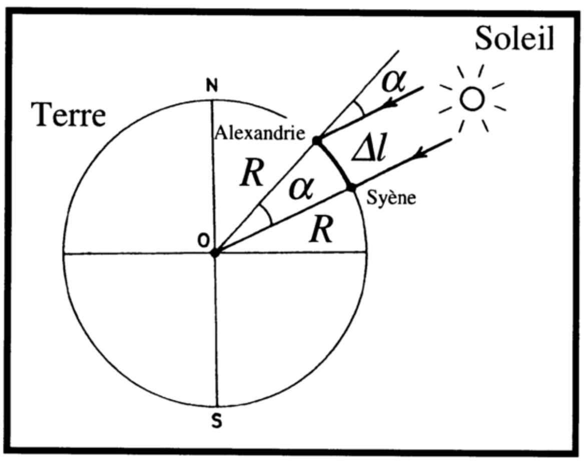
Ça a commencé très tot :

Ératosthène (-276 ; -230)) a lu (c’était le conservateur de la bibliothèque d’Alexandrie) qu'à Syène en Haute-Égypte (l'actuelle Assouan), les rayons tombent verticalement dans un puits à midi (solaire), le jour du solstice d'été. Cela veut dire que le Soleil passe par le zénith, il n'y a alors pas d'ombre. Plus au nord, au même moment, les rayons atteignent Alexandrie sous un angle non nul, qu'il mesura par la mesure de l'ombre portée par des piquets .
L'angle mesuré est = 7.2 ° c’est-à-dire de $\frac{1}{50}$ de la circonférence de la terre.
IL déduit que la circonférence de la Terre est **50 fois plus grande que la distance Syène-Alexandrie**.
Ératosthène avait lu également que les caravanes de chameaux partant de Syène mettaient 50 jours pour arriver à Alexandrie en parcourant 100 <u>stades</u> par jour. Il calcula que la distance entre les deux villes était de 50 jours x 100 std /jour = 5 000 stades. Le stade équivaut à 158 m soit+/- 800 Km
=> circonférence de la terre =50 fois 800 Km soit 40 000 Km . Cette mesure est exacte à 2% près



Il en déduisit le diamètre de la Terre = 40 000 Km / 3.14 x 2 **=+/-25 500 Km.**

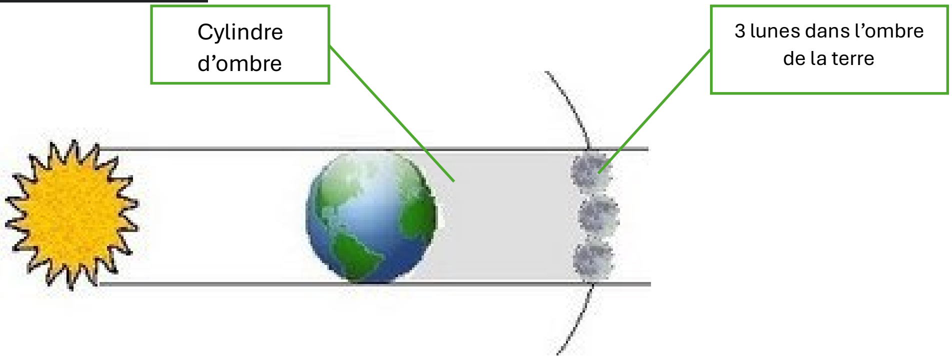




Ensuite on s’attaque à la lune.
On connaissait également les dimensions et la distance de la lune depuis **Aristarque de Samos** (-310 ; -230) vers +/- 270 avant JC.

Mesure du diamètre de la lune

.



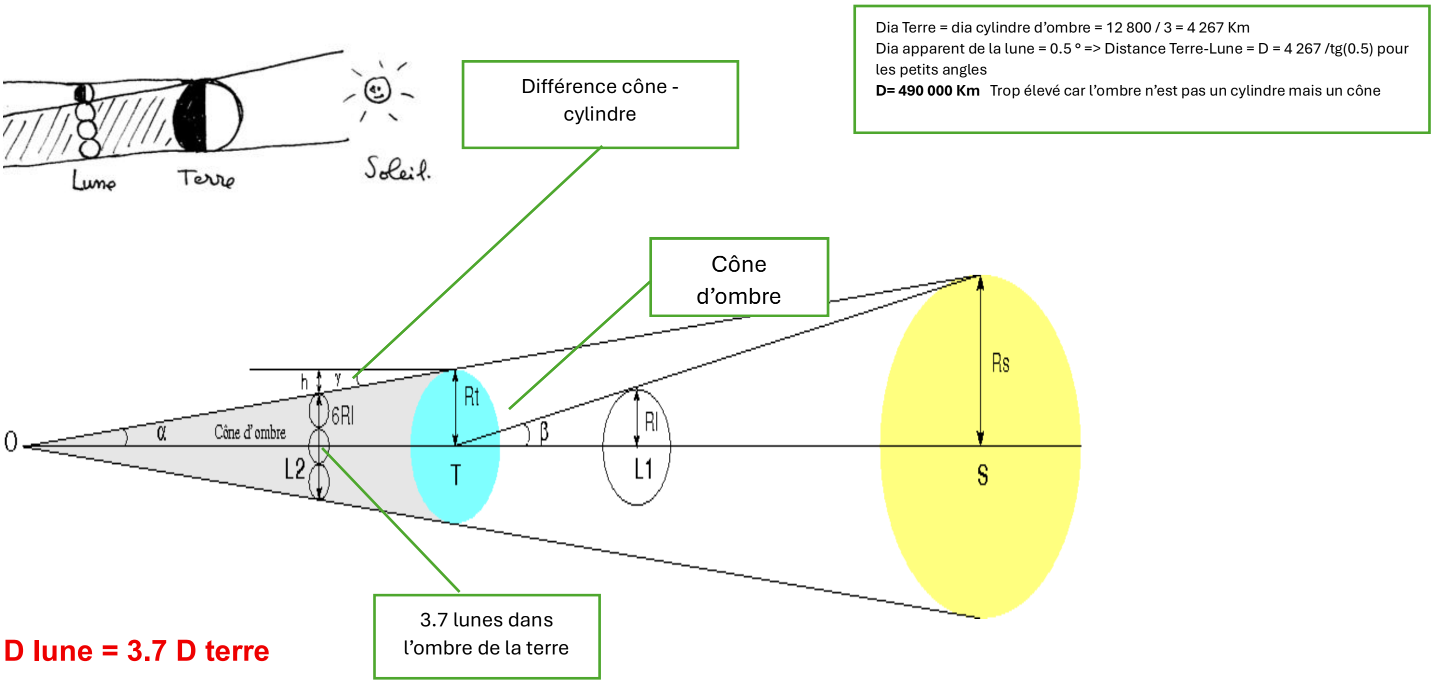
Aristarque étudie l'ombre de la Terre lors des éclipses afin de déterminer le diamètre relatif de la Lune par rapport a celui de la Terre.
Il trouve approximativement :

D lune = 1/3 D terre (en fait 0.27) =12 800 Km / 3 = 4 300 Km

En effet l'éclipse est totale quand la Lune est complètement dans l'ombre et elle se termine quand elle commence réaparaitre, donc l'ombre couvre 3 Lunes pendant l'éclipse totale.

En fait c'était très approximatif car l’ombre de la terre est un cône et non un cylindre mais l'ORDRE DE GRANDEUR était exact (la vraie valeur du diamètre de la Lune est : 0,27 diamètre Terre au lieu de 0.33 (1/3)).

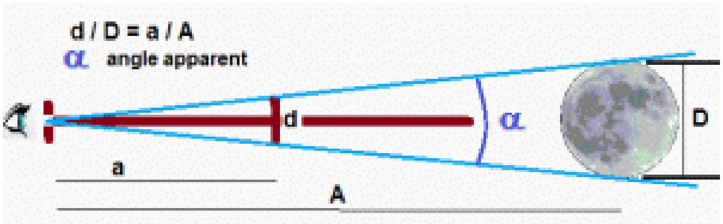
C’est Hipparque (env. 190-120 av. J.-C.) qui précisa ce diamètre en découvrant que la projection de l’ombre de la Terre est conique et non cylindrique: il corrigea la valeur ci-dessus à 4 fois, ce qui est assez proche de la réalité. Encore fallait-il connaître le diamètre de la Terre



D lune = 3.7 D terre

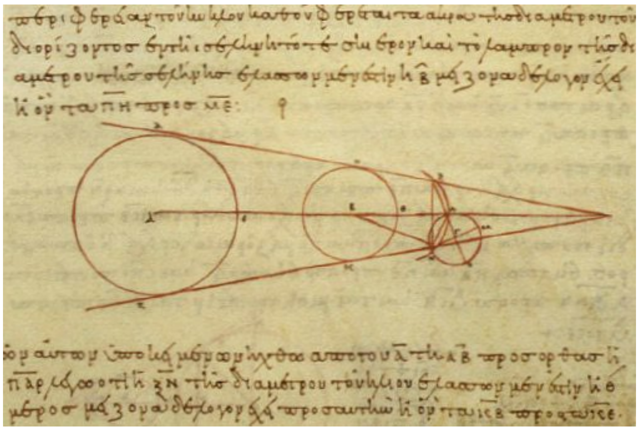
Mesure de la distance Terre-Lune

Archimède avait inventé, dès le 3e siècle av J.-C. le « dioptre », un instrument rudimentaire composé d'une règle graduée qui portait à son extrémité une petite plaque percée d'un trou servant



Dia lune D=0.3 dia de la terre T .
Alpha étant très petit => tg alpha = D/A = 0.0093
A= 0.3 T / 0.0093 = **32 T**

d'oculaire, et un élément coulissant d'une largeur bien définie. En déplaçant celui-ci jusqu'à ce qu'il cache l'objet visé (la Lune par exemple), un petit **calcul trigonométrique** permettait de définir l'angle apparent sous lequel se présente l'astre. Connaissant le diamètre de la Terre, donc celui de la Lune, un autre petit **calcul de proportionnalité** aboutit à la distance Terre-Lune.
Aristarque s'est aussi attaqué à la mesure de la distance Terre-Lune
Il avait déjà appliqué cette méthode, mais il lui manquait a cette époque cette donnée essentielle: **le diamètre de la Terre**. Il pouvait juste dire que cette distance était d'environ **32 diamètres terrestres.** La valeur correcte est **60** diamètres terrestres



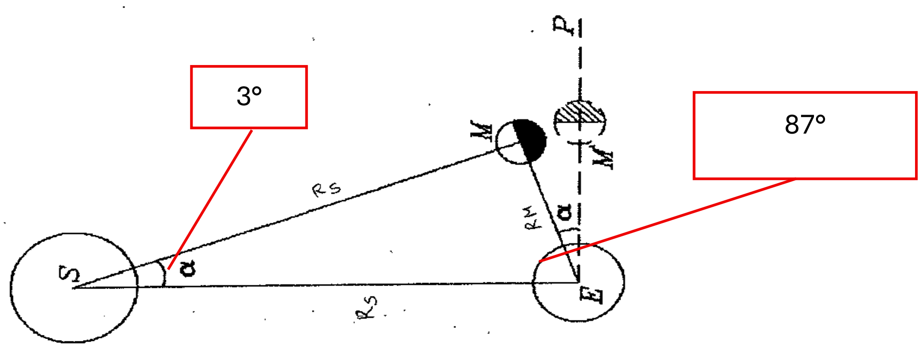
Et enfin, le soleil

Première évaluation de l'Unité Astronomique (U A)

Premier essai de calcul de la distance terre-soleil par Aristarque de Samos au 3ième siècle BC

Aristarque sentait bien que le Soleil était très loin et il voulut avoir une idée de sa distance. A cet effet il va utiliser la Lune. Il comprit que quand la Lune est dans son premier ou dernier quartier (voir figure), le Soleil fait un angle de 90° avec celle-ci et que s'il pouvait mesurer l'angle α il aurait une idée de la distance Terre-Soleil par triangulation. Il mesura cet angle avec l'imprécision due à la difficulté de bien déterminer **l'exact premier quartier et a la rusticité des appareils de mesure de l'époque**.

Il trouva 3° et en déduisit que le Soleil était à au moins **19 fois le diamètre terrestre**. Là l'ordre de grandeur était quand même **un peu faux**, la vraie valeur (qui ne fut déterminée que 15 siècles plus tard !!!) est de **400**, il s'était trompé d'un **facteur 20.** En fait l'angle à mesurer est tellement faible que sa mesure n'était pas faisable à l'époque ;



Ce résultat constitue néanmoins la première mesure de la distance Terre-Soleil au 3ième siècle avant JC.

Même si leurs résultats sont souvent approximatifs, on peut en déduire que les Grecs étaient de grands observateurs et de grands géomètres.

Avec les lois de Kepler (de 1609 à 1619) et en particulier la loi des périodes ($\text{Période}^2/A^3$ = constante) ont connaissait les distances relatives des planètes et du soleil mais on n'avait aucune idée des distances réelles.

Première mesure de l'UA

C'est par la mesure de **la distance Terre-Mars** que les astronomes et mathématiciens du 17ème siècle ont pu se faire une idée des dimensions du système solaire. A cette époque, l'observation se résume principalement par la mesure des angles des objets célestes vus de la Terre. Ensuite ce sont les calculs de trigonométrie qui donnent les distances.

Mesure de la distance Terre-Mars

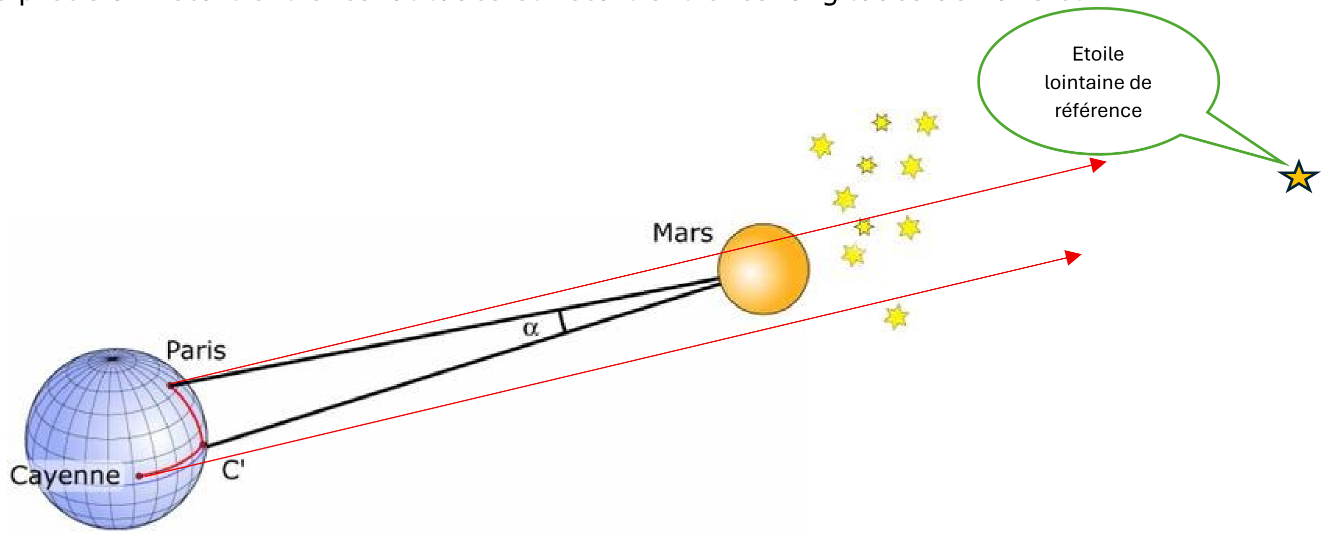
Comment a été calculée la distance Terre-Mars pour la première fois ?

On utilise **la méthode de la parallaxe** appliquée à la planète Mars

La parallaxe de Mars est l'angle sous lequel Mars voit la Terre

En septembre 1672, Jean-Dominique Cassini (1625−1712), Jean Picard dit l'abbé Picard (1620−1682) et Jean Richer (1630−1696) mesurent la parallaxe horizontale de Mars quand cette planète passe au plus près de la Terre (Mars se trouve alors, vu de la Terre, à l'opposé du Soleil). Pour réaliser cette mesure, il faut observer les positions de Mars par rapport aux étoiles beaucoup plus lointaines depuis deux points très distants (trait rouge).

Cassini depuis **Paris** et Richer (avec Meurisse qui y laisse la vie)) depuis **Cayenne** mesure la parallaxe de Mars en 1672. Cette mesure rapportée à la base formée par le rayon équatorial de la Terre donne une parallaxe horizontale de alpha =24"
⇒ Terre-Mars = 54 746 000 km. Pour déterminer la parallaxe de Mars à partir des observations faites depuis Paris et Cayenne, il est nécessaire de connaitre avec un maximum de précision l'écart entre les latitudes et l'écart entre les longitudes de Paris et Cayenne.

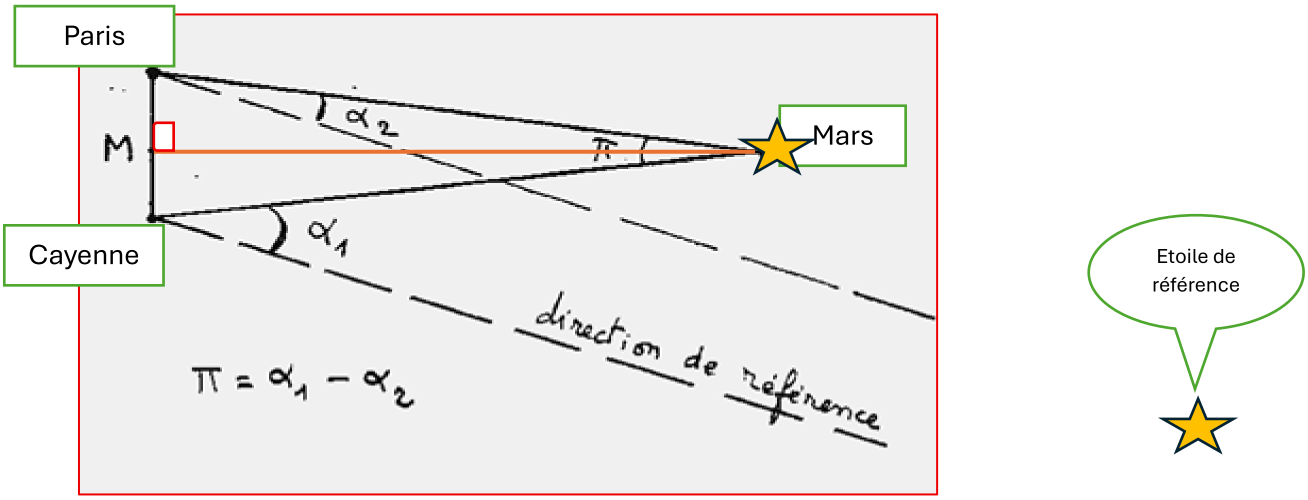


La latitude est facile à mesurer mais la longitude est beaucoup plus difficile, à l'époque.

Cassini précise cependant qu'il a mesuré la longitude par plusieurs méthodes pour obtenir une moyenne :

- L'observation **d'une éclipse** dont les différentes phases sont repérées en heures du méridien de Paris, dans les recueils astronomiques.
- L'observation des éclipses des **satellites Galiléens de Jupiter** qui se produisent plusieurs fois par jour.
- L'observation des **hauteurs méridiennes du Soleil**.

Une fois connue la parallaxe de Mars, la trigonométrie permet d'obtenir la distance Terre-Mars (D) en fonction du rayon (R) de la Terre : la parallaxe de Mars est l'angle sous lequel Mars voit le rayon de la Terre. Le calcul de proportionnalité entre l'angle Paris Cayenne et la parallaxe de Mars donne **24" ± 5"**



Tout ceci permit de mesurer la parallaxe de Mars donc la distance Terre-Mars

D = R×3 600/24×180/π soit **8 600 R** avec R = rayon de la terre = 6 371 Km
D = 8 600 * 6 371 = **54 790 600 km = distance Terre-Mars**

Dès que la distance Terre-Mars fût connue, la distance Terre-Soleil pu être calculée grâce à la **troisième loi de Kepler.**.
Cassini savait que Mars était à **0.38 ua = 3/8 ua** (loi des périodes) =>Terre-Soleil = 8/3 x 8 600 R = 23 000 R
Cassini nous donne la valeur du rayon terrestre en lieues : R = 5 560 Km

Distance Terre-Soleil = **127 891 500 km en 1672**

Cette distance va donner **l'échelle de tout le système solaire .**

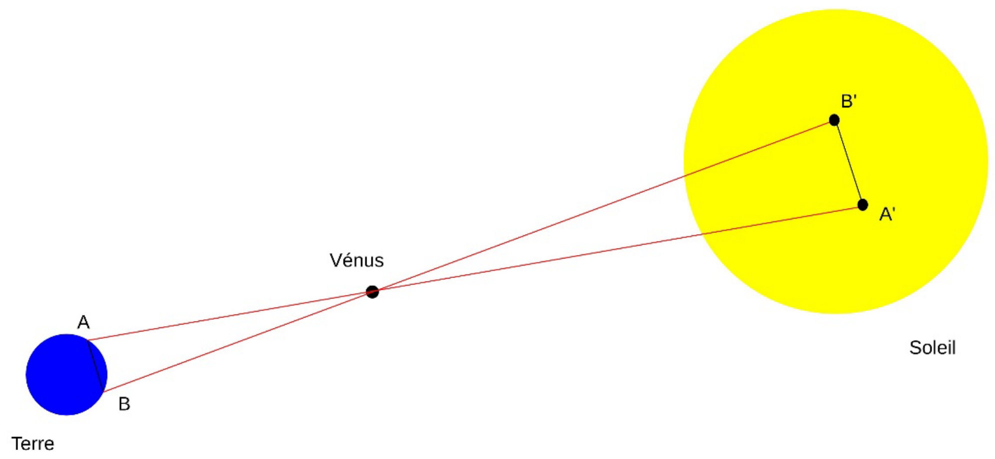
Tout d'un coup l'Univers devenait **énormément plus grand** que ce qui était couramment admis à l'époque.

Mais cette méthode en utilisant Mars **est peu précise** car la différence d'angles est très petite a évaluer, Cassini a eu beaucoup de chance de trouver une valeur qui est maintenant on le sait très proche de la vérité. Il a sans doute bénéficié d’erreurs qui se sont compensées

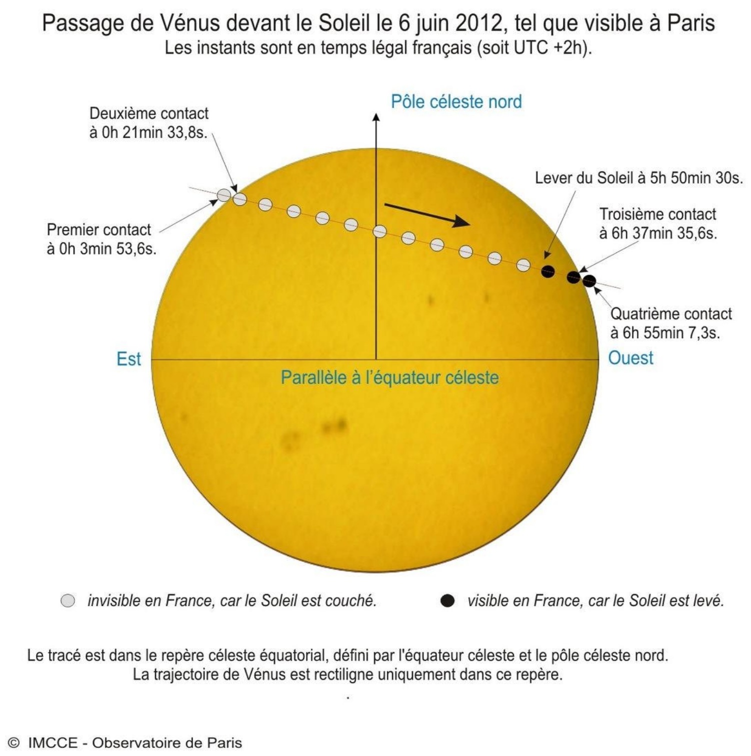
Une idée révolutionnaire : Le transit de Vénus

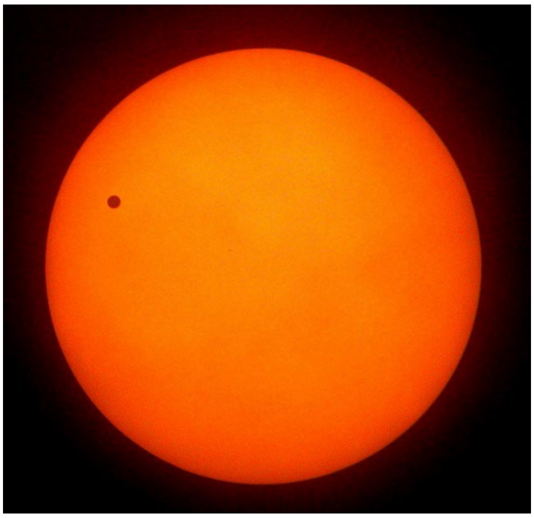
L'idée nouvelle et révolutionnaire était **de remplacer la mesure d'angles par la mesure de temps**.
C'est Halley qui va mettre au point la **méthode du transit de Venus .**

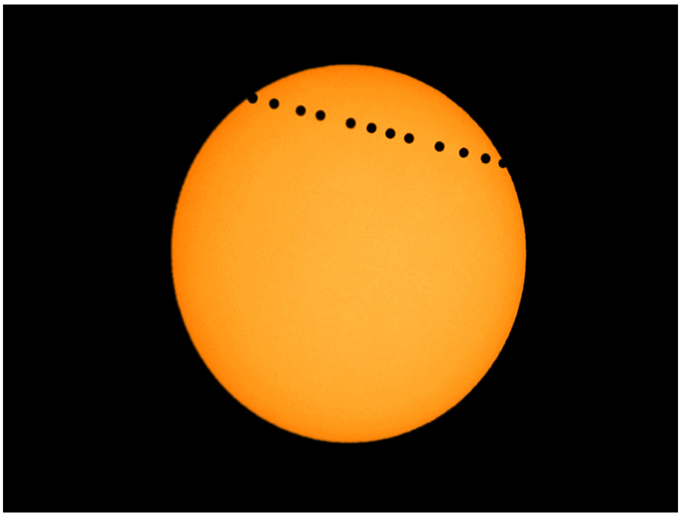
On mesure les temps d'entrée et de sortie de transit a partir de deux points éloignés sur terre : A et B.
On sait que venus prend 8 heures pour traverser le diametre du soleil (en effet 225 jours de revolution pour 360°=21600',donc 32'en 8h), on connait le diamètre angulaire du soleil et on peut déterminer par la mesure le temps du trajet en A' et B' en % du diamètre solaire.



De deux points d'observations A et B, on observe deux taches A' et B'. Les distances relatives Terre-Vénus-Soleil sont connue, le rapport A'B'/AB est égal au rapport des distances Vénus-Soleil/Vénus-Terre (théorème de Thalès).



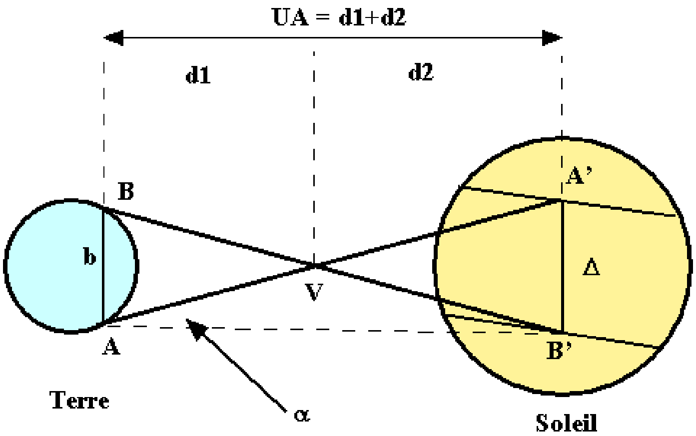


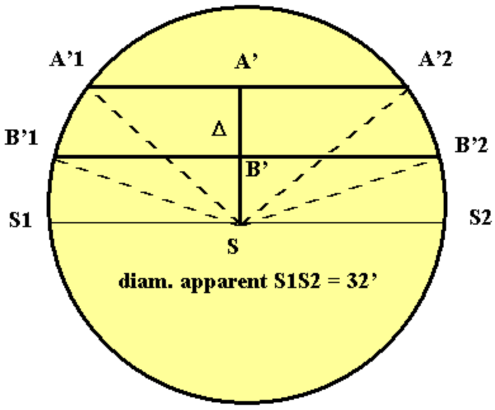


Observation du transit de Vénus en 2004

Observation du transit de Vénus en 2012

Détails d'un calcul





on a mesuré les temps de transit de Vénus sur le soleil à partir différents points A et B du globe :

ta et tb qui sont proportionnels à la = a'1a'2 et lb = b'1b'2
Le diametre apparent du soleil est 32 '
on a : la = 32' x (ta/8) et lb = 32' x (tb/8)
avec la et lb en ' ta et tb en heures
a'b' =sa' – sb' en utilisant les triangles rectangles sa'1a' et sb'1b' on a :

$$A'B' = \sqrt{16^2 - (lA/2)^2} - \sqrt{16^2 - (lB/2)^2}$$ que l'on peut aussi écrire

$$A'B' = \alpha = 16\left[\sqrt{1 - \frac{tA^2}{64}} - \sqrt{1 - \frac{tB^2}{64}}\right]$$ avec ta et tb en heures

mesures effectuées en 1761 :ta = 5h 53min tb = 5h 30min
cela donne a"b" = 0,783' = 2,3 10^{-4} radian
et avec b = 13 400km dans la formule précédente :

Terre-Soleil = **153 000 000 km en 1771** (20 ans après la mort de Halley)

L'histoire

Colbert présentant à Louis XIV les membres de l'Académie royale des Sciences,

L'expédition de Richier et Meurisse en Guyane en 1672

Un jour de pluie de mai 1673, dans une forêt tropicale de Guyane française, un scientifique est décédé. Seul son prénom, **Meurisse**, est connu des historiens. On pourrait imputer sa mort à une maladie ou un accident fatal mais aucune description complète n'en a été retrouvée. La seule personne qui se trouvait avec lui était son partenaire de voyage, l'astronome Jean Richer, alors tombé gravement malade et luttant pour rester en vie. L'année précédente, ils avaient été envoyés, depuis Paris vers Cayenne, sur la côte nord-est de l'Amérique du Sud, à 4 400 km de distance. L'Académie française des sciences, à la demande de l'astronome Giovanni **Cassini, leur avait confié pour mission d'effectuer une mesure qui révélerait la distance entre la Terre et le Soleil, une valeur qui n'était, à l'époque, pas encore connue.**
Depuis que le regard de l'humanité s'était tourné vers le ciel, des tentatives avaient été faites pour déterminer la distance séparant la Terre du Soleil. Les scientifiques de l'Antiquité, tels qu'Ératosthène et Ptolémée, avaient produit des estimations qui variaient considérablement, sous-estimant souvent la valeur réelle.

Dans les années 1670, des instruments astronomiques avaient été nouvellement développés et Cassini était déterminé à s'en servir pour répondre à cette question une bonne fois pour toutes. Il habitait le deuxième étage de l'Observatoire de Paris et travaillait sans relâche sur le problème. « Il n'avait pas de passe-temps », explique Gabriella Bernardi, auteur de *Giovanni Domenico Cassini: A Modern Astronomer in the 17th Century*
(« On perçoit, dans son journal, un homme entièrement dévoué à sa profession ».
À bien des égards, le voyage vers la Guyane française constituait un voyage de routine à la fin du 17^{e} siècle. Il s'inscrivait dans le cadre d'une série d'expéditions scientifiques envoyées par Cassini. Deux ans plus tôt, Richer et Meurisse s'étaient déjà rendus dans le nord-est de l'Amérique du Nord pour mesurer les latitudes et les hauteurs des marées, et des expéditions scientifiques françaises se préparaient à faire de même dans des destinations telles que le Sénégal et l'Équateur.
Ce voyage en Cayenne permit cependant de recueillir l'information clé qui, associée aux prouesses mathématiques de Cassini, produisit la première mesure précise de la distance entre la Terre et le Soleil.

Un projet vaste et visionnaire

Le 11 janvier 1667, cinq ans avant la mission en Guyane, l'astronome Adrien Auzout se tenait dans la salle de réunion de la somptueuse Bibliothèque du Roi à Paris. Il exposait un audacieux programme de recherche scientifique à une petite assemblée d'hommes portant de longues perruques épaisses.

« Au moment où l'Académie est conçue, on pense déjà à organiser des expéditions astronomiques »,
. « Auzout en était le planificateur… Il avait pour idée d'utiliser les réseaux commerciaux coloniaux pour envoyer des observateurs tout autour du globe afin d'effectuer des observations en astronomie

Il s'agissait d'un projet vaste et visionnaire. Azout se rendait bien compte que certaines questions astronomiques, notamment les distances entre les planètes et le Soleil, **nécessitaient d'effectuer des observations simultanées depuis deux endroits différents**, par exemple à Paris et dans un lieu éloigné. Il plaidait en faveur d'un voyage jusqu'à Madagascar, où la Compagnie britannique des Indes orientales devait s'implanter et où la proximité avec l'équateur aurait permis aux astronomes de faire des observations essentielles.

. À la fin du 17e siècle, Paris était le foyer d'une activité intellectuelle et commerciale foisonnante, où une population nombreuse et aisée se mêlait librement aux membres d'une communauté scientifique avant-gardiste. Un grand nombre des fabricants d'instruments scientifiques les plus compétents vivaient alors à Paris et à la périphérie de la ville, la construction d'un nouvel observatoire astronomique de grande envergure commençait.
En avril 1669, deux ans après le discours d'Auzout, Cassini arriva à Paris. Il avait été personnellement invité par le roi Louis XIV et allait rapidement devenir l'une des figures illustres les plus modestes de l'Académie.

« Cassini avait quarante-quatre ans lorsqu'il partit pour Paris. Un célibataire avec un carrosse rempli d'instruments astronomiques »,

Alors que l'Académie continuait de préparer une expédition astronomique vers l'équateur, l'intérêt des scientifiques passa de Madagascar à Cayenne. Cette colonie française était plus proche et l'Académie devait agir rapidement pour ne pas manquer un évènement notable : à l'automne 1672, **Mars et la Terre** seraient à leur point le plus proche l'une de l'autre en quinze ans.-
Cassini prit conscience que des informations précises au sujet de Mars pouvaient être obtenues à ce moment-là et servir à calculer sa parallaxe, c'est-à-dire la mesure de la différence apparente de la position d'une planète depuis deux points d'observation différents. Cette mesure clé pourrait alors permettre de calculer la distance entre la Terre et le Soleil. La proximité avec Mars était donc une opportunité considérable.

LA PRÉPARATION AU VOYAGE

Richer et Meurisse passèrent des jours et des nuits à travailler aux côtés de Cassini pour se préparer aux observations communes qu'ils allaient devoir effectuer quand ils se trouveraient à des milliers de kilomètres de là. Les deux apprentis savaient qu'ils embarquaient pour un voyage périlleux.
« Tous ceux qui avaient été envoyés sur ces navires à cette époque avaient un statut inférieur », explique Dew.
« Les voyages dangereux, effrayants et de longue durée étaient effectués par des personnes de rang inférieur et moins bien payées. »
Richer et Meurisse se rendirent d'abord au port français de La Rochelle, où ils passèrent trois mois à tester et à calibrer méthodiquement leurs instruments, dont un octant, un quadrant, plusieurs télescopes de différentes tailles et quelques horloges à balancier.

Le 8 février 1672, ils mirent les voiles vers Cayenne à bord d'un navire marchand, potentiellement un navire négrier vide dont la destination finale était le Sénégal.
Cassini avait donné plusieurs objectifs à Richer : il devait mesurer la position des étoiles australes, la hauteur des marées et la durée du crépuscule, observer les lunes de Jupiter et prendre des notes détaillées sur les mouvements de Vénus, Mars et Mercure. Meurisse et lui avaient également pour mission de prendre des mesures barométriques et d'être attentifs à la faune et à la flore inhabituelles. Le 22 avril 1672, le duo arriva à Cayenne.

LES CONFLITS DU NOUVEAU MONDE

La petite colonie désolée ne pouvait pas être un spectacle encourageant pour Richer et Meurisse. Visitée par seulement deux ou trois navires par an, l'« île » de Cayenne était séparée du reste de la Guyane, d'un côté par l'étroit estuaire du Mahury, long de 1.6 kilomètre et de l'autre par la mince rivière de Cayenne.
Le duo se rendit sûrement compte en descendant du bateau qu'ils avaient choisi la pire période de l'année pour leur voyage. La fin avril est presque l'apogée de la saison des pluies en Amazonie, un climat d'une humidité oppressante où grouillent les moustiques. Le rideau de pluie sans pitié qui leur tombait dessus faisait déborder la rivière mais ne les soulageait pas de la chaleur étouffante.
Au centre de la colonie se tenait le Fort Cépérou, une structure morne et solitaire, auparavant en bois mais qui avait été reconstruite en pierre après la dernière attaque de la population indigène, signe de la détermination des colons français à rester. À quelques pas du fort se trouvait un magasin général qui approvisionnait la colonie et dont les rayons étaient rarement très garnis.
Une modeste église jésuite et une maison missionnaire se trouvaient également là. Un récit de 1685, cité dans l'ouvrage de Catherine Losier, *Approvisionner Cayenne sous l'Ancien régime : Archéologie et histoire des réseaux commerciaux*, la décrit comme une habitation occupée par quatre pères et un frère, ainsi que par quatre-vingt-deux esclaves africains dont trente-deux hommes, vingt-trois femmes et vingt-sept enfants, devant travailler les cultures des Jésuites et s'occuper de leur bétail. Les Africains asservis représentaient environ 85 % de la colonie.

Puis, il y avait les Kalina. Ce peuple indigène, également appelé Galibi, résidait dans la région de Cayenne depuis plus de deux mille ans avant l'arrivée des Européens. Comme l'écrivit un colon du nom de Paul Boyer, après une visite vers 1654, ils « ne pensaient qu'à se débarrasser des Français ».
Par le passé, les interactions entre les deux groupes avaient été conflictuelles. Moins de trente ans avant l'arrivée de Richer, en 1644, le gouverneur français Charles Poncet de Brétigny était arrivé à Cayenne avec quelques centaines d'hommes et avait marqué au fer rouge les Kalina qui lui déplaisaient, les avait obligés à porter des vêtements, avait enlevé les femmes indigènes et les avait enfermées dans ses quartiers. Au bout d'un an, un membre de la tribu enfonça une hache dans le crâne de Bretigny, à l'issue d'une embuscade sanglante qui ne laissa qu'une poignée de Français en vie dans un village réduit en cendres.
Les Kalina n'étaient pas la seule source de tourment des Français. Dix ans après le règne de Bretigny, les Hollandais parvinrent à s'emparer de la colonie, avant d'en être chassés par de nouvelles troupes françaises lors d'une attaque surprise. Les colons français furent ensuite chassés par les Britanniques en 1667, qui reprirent le contrôle de la colonie un an plus tard, quatre ans seulement avant l'arrivée de Richer.
Pour Louis XIV, la Guyane constituait une position stratégique permettant à la France de s'implanter sur le continent sud-américain. Ce n'était cependant pas la seule raison pour laquelle les nations européennes étaient attirées par la région. Une autre explication était souvent divulguée à voix basse : l'*El Dorado*. Les Européens qui se battaient pour contrôler Cayenne pensaient que la légendaire cité d'or se cachait quelque part en Guyane, et que celui qui contrôlerait Cayenne aurait la voie libre vers les richesses.
Richer et Meurisse, eux, étaient partis à la recherche d'un trésor scientifique.

L'ASTRONOMIE D'OUTRE-MER

Loin de la colonie, de l'autre côté de l'étroite rivière qui donna son nom à Cayenne, s'étendait le reste de la Guyane, une forêt tropicale dense et primitive, où l'on trouvait des plantes et des animaux que l'on ne voyait nulle part ailleurs dans le monde. L'environnement devait être si étranger à Richer et Meurisse, si différent des rues pavées de Paris, qu'il est difficile d'imaginer quels animaux attirèrent leur regard en premier : les fourmiliers, les iguanes ou les singes-araignées ? Selon les archives de l'Académie, Richer et Meurisse prirent des notes détaillées sur la flore et la faune, mais presque toutes furent perdues au fil du temps. À un moment donné, Richer tomba nez à nez avec une anguille électrique (*E. electricus)* et écrivit plus tard qu'un « simple contact avec un doigt ou le bout d'un bâton engourdissait tellement le bras et la partie du corps la plus proche que l'on restait environ quinze minutes sans pouvoir bouger ».

Dès son arrivée(1672), Richer se mit à explorer la jungle à la recherche du meilleur endroit pour construire un observatoire. Après quelques semaines, il trouva un endroit adéquat et les deux hommes recrutèrent des travailleurs indigènes qui construisirent une structure composée de branches, d'écorces d'arbres et de feuilles de palmiers, avec un grand trou dans le toit pour leurs télescopes.
L'observatoire fut terminé avant la mi-mai. La première observation de Richer eut lieu le 14 mai, et il calcula la hauteur de l'étoile polaire, un début prometteur pour ce qui allait être une mission très difficile.
La pluie était impitoyable et Richer écrivit à Cassini que le mauvais temps l'avait empêché, pendant plusieurs jours, de faire des observations. « Depuis notre arrivée, il ne s'est pratiquement pas passé un jour sans qu'il

pleuve. »
À un moment donné, les fourmis s'introduisirent en si grand nombre dans les horloges à pendule des scientifiques qu'elles bloquèrent la délicate machinerie des rouages, provoquant l'arrêt complet d'au moins une d'entre elles.
Richer et Meurisse dépendaient fortement des fournitures qu'ils avaient apportées de leur pays, même si la nourriture locale était disponible sous forme de gibier, de poissons et de plantes comestibles telles que les bananes, les avocats et les mangues. Les deux Français préféraient manger des aliments familiers, notamment des paquets de viande séchée, de la farine, du vin de Bordeaux, du café et du fromage, rarement réapprovisionnés par les navires de passage.
L'envoi de nourriture aux colonies était un problème constant. « Les Européens voulaient manger ce qu'ils avaient l'habitude de manger. Ils se disaient qu'il leur fallait du pain et du vin ».
La lenteur du courrier et la rareté des navires de passage obligeaient Richer et Meurisse à se débrouiller seuls.

QUAND LE CIEL S'ÉCLAIRCIT

En **octobre 1672**, la saison des pluies s'arrêta enfin, juste à temps pour observer Mars. Sur plusieurs semaines, Richer s'attela à mesurer la planète et les étoiles alentours.
De l'autre côté de l'Atlantique, à **7 000 kilomètres**, Cassini et l'astronome danois Ole Rømer prirent aussi des mesures aux moments décidés au préalable, en regardant par la fenêtre de l'Observatoire de Paris.
Pendant ce temps, à Londres, l'astronome John Flamsteed, de la Royal Society, mesurait également la parallaxe de Mars afin de déterminer la distance qui la sépare du Soleil, en observant astucieusement Mars une fois en début de soirée, avant d'attendre plusieurs heures que la Terre tourne et d'effectuer une nouvelle mesure. Son calcul final fut proche de celui de Cassini, mais pas aussi précis.
La mort de Meurisse en 1673 était peut-être due à la fièvre jaune, à la malaria, à la pneumonie, ou encore à une malnutrition sévère. « Quand quelqu'un quittait les côtes européennes pour se rendre de l'autre côté de l'océan, on partait du principe que cette personne allait mourir », dit Dew.
Richer se retrouva alors seul et trop malade pour continuer. Il chercha des spécimens à ramener à l'Académie, comme un crocodile vivant qu'il enchaîna dans la cale du navire. Dévasté par la maladie, il remit les voiles et quitta Cayenne **le 25 mai 1673** avec le brouillon de son rapport de mission. Au cours de son long voyage de retour, le crocodile mourut de faim mais Richer se rétablit.
En 1679, Richer publia son rapport officiel, *Observations astronomiques et physiques faites en l'isle de Caienne*. Grâce aux informations rapportées dans ce dernier, Cassini put enfin effectuer ses calculs et annonça dans une **publication en 1684** que le Soleil, qui paraissait pourtant si proche, se trouvait en fait à

140 millions de kilomètres de nous,

un résultat remarquablement proche de la véritable distance entre le Soleil et la Terre, environ **150 millions de kilomètres l'un de l'autre.**

Les nouvelles de l'expédition et la révélation de la vraie taille du système solaire se répandirent rapidement, notamment grâce aux écrits de Bernard le Bovier de Fontenelle, dont les écrits scientifiques étaient rédigés dans un style romanesque.

UN HÉRITAGE SCIENTIFIQUE

Le calcul de notre distance avec le soleil n'est pas le seul héritage laissé par l'expédition de Richer à Cayenne. Pendant son séjour en Amérique du Sud, l'astronome a également mesuré la longueur d'un pendule et a comparé les résultats à ses horloges, calibrées avec précision..
Les secondes indiquées par le pendule semblaient plus courtes à Cayenne qu'à Paris.
Il faut savoir que la période de rotation d'un pendule ne dépend pas du poids du pendule .
Elle est donné par la formule = $T = 2\Pi\sqrt{\frac{L}{g}}$ *Avec g = accélération de la pesanteur =gravité = 9.81 m/s² à Paris*
Quelque chose clochait C c'était donc **g** qui avait varié

Bien que Richer ne l'ait pas réalisé à l'époque, cela était dû au fait qu'il y a un peu moins de **gravité** près de l'équateur, là où la Terre se gonfle en tournant, ce qui explique cette mesure plus courte des secondes. Isaac Newton en découvrit la raison une quinzaine d'années plus tard, en utilisant les mesures de Richer pour étayer ses nouvelles théories sur la gravité.

« Songez, milord, » **écrivait Voltaire en 1740**, dans une lettre adressée à Milord Hervey, « que, sans le voyage et les expériences de ceux envoyés à Caïenne, en 1672, [...], jamais Newton n'eût fait ses découvertes sur l'attraction. »

Selon Bernardi, le succès du voyage est dû à l'approche moderne prise par Cassini. « À l'époque, il s'agissait d'une totale innovation « Cassini a été le premier à comprendre qu'un plan d'observation régulier, en collaboration avec de nombreux autres collègues, permettait de s'attaquer à des problèmes plus difficiles et d'obtenir des résultats importants, comme c'est le cas aujourd'hui dans les grandes sciences ».

Le triomphe du calcul exact de la distance entre le Soleil et la Terre fut presque complètement attribué à Cassini. Une fois arrivé en France, Richer se retira de l'Académie et accepta un poste d'assistant d'un ingénieur militaire.

Un autre héros : Guillaume Le Gentil de la Galaisière

Guillaume Le Gentil

Voué dès son plus jeune âge à entrer dans les Ordres, Guillaume Joseph Hyacinthe Jean-Baptiste Le Gentil de la Galaisière passe son enfance à Coutances en Normandie, où il est né le 12 septembre 1725. Mais à une carrière ecclésiastique, il préfère finalement celle d'astronome. Si derrière ce choix se cache une femme qu'il épouse peu après leur rencontre, le jeune homme fait preuve de perspicacité dans son travail et démontre un certain talent. Ce succès lui donne très vite accès à une chaire au sein de l'Académie royale des Sciences à Paris.
Guillaume le Gentil fait par la suite plusieurs découvertes dans le domaine de l'astronomie. On peut notamment citer certains amas d'étoiles ainsi qu'une galaxie elliptique compacte, qui ont par la suite été répertoriées par Charles Messier .

Etablissement de l'Académie des Sciences et fondation de l'observatoire, 1666. Credit: Charles Le Brun

Visibilité de Vénus en 1874

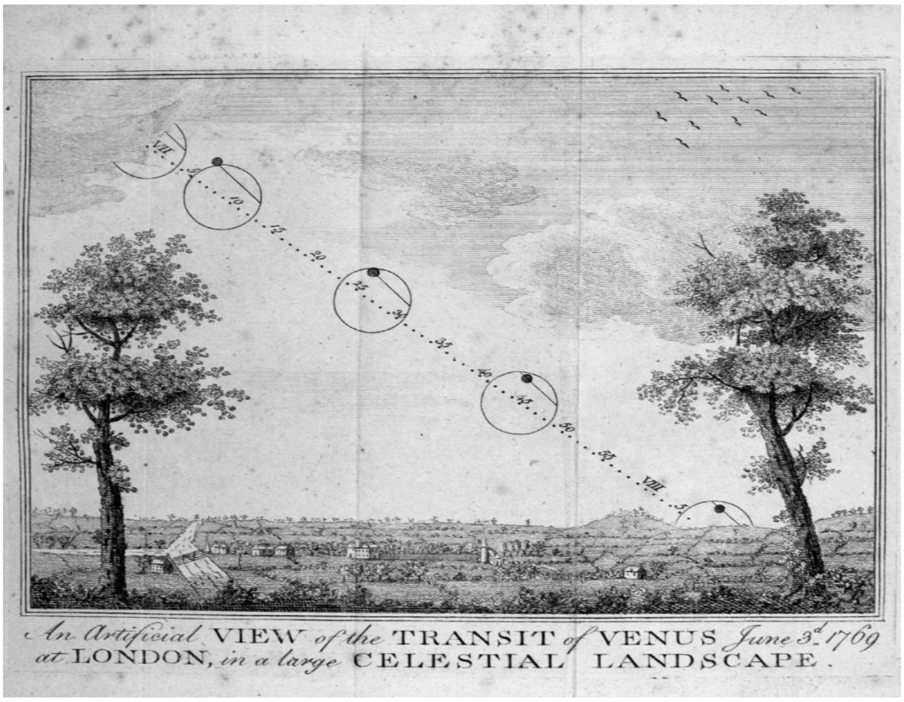
Ces trouvailles font pousser des ailes à notre chercheur ambitieux qui répond, en 1759, à un appel lancé par **Mikhaïl Lomonosov, qui souhaite concrétiser les projets de feu Edmond Halley visant à mesurer la distance entre la Terre et le soleil.** Pour cela, Halley avait prévu de se servir du **transit de Vénus**, un phénomène rare - qui survient seulement à **deux reprises par siècle** - au cours duquel la planète Vénus vient se positionner entre la Terre et le Soleil. Le défunt astronome avait donc mis au point un plan conséquent dans le cadre duquel il comptait mobiliser des chercheurs aux quatre coins du monde afin de recueillir des mesures grâce au dit phénomène. Celles-ci devaient permettre à terme, en utilisant la trigonométrie, de calculer de façon précise la distance entre notre planète et l'astre solaire. Décédant bien avant que le transit de Vénus ait lieu, Halley laisse derrière lui un projet que le russe Mikhaïl Lomonosov décide de mettre en oeuvre.

C'est ainsi que Guillaume le Gentil se trouve embarqué dans un périple pour lequel il s'est porté volontaire. Envoyé dans les Indes, l'astronome français prévoit une certaine marge de manœuvre. L'homme largue les amarres quinze mois avant l'apparition du transit de Vénus, le voyage le forçant à contourner toute l'Afrique en passant par l'Ile de France (l'Ile Maurice) avant d'atteindre sa destination. Malheureusement, après avoir parcouru les milliers de kilomètres qui séparent Paris de Pondichéry en Inde, Guillaume le Gentil voit ses ardeurs largement calmées par la guerre qui a éclaté entre la France et l'Angleterre. Pondichéry, qui était autrefois un comptoir français, se retrouve désormais occupé par les Anglais, poussant l'astronome à faire demi-tour.

Mais il ne perd pas espoir pour autant et refuse de renoncer à ses recherches. Il retourne donc vers l'Ile de France, d'où il souhaite observer le passage de Vénus devant le Soleil. Mais, à nouveau, cela ne se déroule pas comme prévu pour Guillaume le Gentil. L'astronome se trouve encore en mer en juin 1761, moment où survient le phénomène tant attendu. Le Français tente toutefois de prendre les mesures depuis le navire. Mais les mouvements du bateau rendent impossible toute appréciation précise, bien que les conditions climatiques soient quant à elles iéales.

Dépité, Guillaume le Gentil se rend compte qu'il a parcouru des milliers de kilomètres, allant jusqu'au bout du monde, pour rien. Mais sa détermination l'emporte et l'astronome décide de ne pas rentrer bredouille en France. Il attend donc non loin des Indes le prochain transit de Vénus, censé survenir une deuxième et dernière fois au cours de ce siècle, en **1769**. Mais hors de question de rester si loin de son épouse et de son pays pendant huit ans sans rien faire. Il se met donc à cartographier Madagascar. Une fois cette tâche achevée, il navigue jusqu'à Manille (capitale des Philippines) d'où il compte bien cette fois observer le phénomène astronomique. Mais, à nouveau, le scientifique est victime du mauvais sort. Les Espagnols aux mains desquels se trouve la ville à l'époque ne voient pas d'un bon œil l'arrivée de Guillaume le Gentil. Soupçonné d'être un espion, il se retrouve emprisonné et torturé. Relâché quelques mois plus tard, l'astronome, revenu sur l'Ile de France, se dépêche de prendre le chemin de Pondichéry, où la France règne à nouveau en maître.

Atteignant sa destination en mars 1768, Guillaume le Gentil attend patiemment, **sept ans** après sa première tentative, que Vénus passe devant l'astre solaire, le **3 juin 1769**, pour effectuer ses mesures. Cette fois, le scientifique malchanceux ne veut rien laisser au hasard. Il construit un observatoire et réfléchit jour après jour au meilleur moyen de capter le moment tant attendu afin d'en tirer les détails les plus précis possibles. Le jour venu, Guillaume le Gentil est plus que prêt. Mais c'est sans compter sur des conditions météorologiques défavorables. Et contre ça, le Français ne peut rien faire. La brume épaisse qui envahit Pondichéry ne la quitte pas de la journée, laissant notre scientifique dépourvu de toute solution face à ce nouveau coup du sort. La mine déconfite, Guillaume le Gentil voit l'objet de la mission à laquelle il a voué dix ans de sa vie partir en fumée. Un constat d'échec qui plonge l'astronome dans une profonde dépression



Observation du transit de Vénus en 1639

Le temps est toutefois venu pour le chercheur malchanceux de retourner en France. Victime de **dysenterie,** Guillaume le gentil voit son départ quelque peu retardé. Les soucis ne prennent toutefois pas fin pour lui au moment de lever l'ancre. Le bateau sur lequel il se trouve est pris dans une **violente tempête**. Le navire fait alors escale à l'île de Bourbon. Le scientifique y attend patiemment qu'on le ramène dans son pays. Ce que finira par faire un bateau espagnol duquel débarque Guillaume le Gentil, **en octobre 1771**. L'homme remet, pour la première fois, les pieds sur le sol français, **onze ans et demi après l'avoir quitté**.

Le scientifique n'est pas pour autant au bout de ses surprises. De retour sur sa terre natale, il s'empresse de rejoindre sa femme, qu'il imagine plus qu'impatiente de retrouver son époux. Le malheureux ne s'est jamais autant trompé. Il découvre en effet que sa bien-aimée s'est remariée. Restant sans nouvelles de sa part, les autorités françaises ont **déclaré "mort" Guillaume le Gentil**, laissant l'opportunité à sa "veuve" de prononcer à nouveau ses voeux.

Son mariage n'est pas la seule chose que son prétendu décès au cours de son expédition lui aura coûté. De fait, l'homme voit **sa chaire au sein de l'Académie royale des Sciences occupée par un autre**. Pour couronner le tout, **l'ensemble de ses biens est distribué à ses héritiers**.

Quoi qu'il en soit, l'homme a déjà démontré qu'il ne se laisse pas facilement abattre. Il décide donc d'entreprendre une procédure judiciaire pour récupérer ce qu'on lui a "volé". La justice ne donne toutefois **pas raison** à Guillaume le Gentil **qui perd tous ses procès**. Survient alors ce qu'on peut considérer comme une première éclaircie dans la vie de l'astronome. Le roi Louis XV intervient en personne pour que soit restitué au Français son siège à l'Académie. Le souverain demande même à ce que le scientifique soit logé à l'Observatoire Royal.

De quoi redonner du baume au coeur à celui à qui la vie a si peu souri. La roue aurait-elle enfin tourné en faveur de l'homme malchanceux ? Il semblerait. Il se remarie ainsi, quelques mois plus tard, avec une femme issue d'une famille que Guillaume le Gentil connait bien. Père d'une petite Marie Adélaïde, l'astronome doit toutefois tirer un trait sur sa fortune qu'il ne reverra jamais. Il continue donc sa vie, certes dans la pauvreté, mais avec une famille, un travail et un toit. Il **décède le 22 octobre 1792** à Paris, au terme d'une vie, que l'on peut dire, mouvementée, mais non moins heureuse.

Ce n'est qu'en **1976, presque 200 ans après la mort de Guillaume le Gentil**, que l'Union astronomique internationale établit la distance entre la Terre et le soleil grâce aux différentes mesures radar et à l'envoi de sondes. Le dernier transit de Vénus observé a lieu en 2012.

La Chronologie

XVIe siècle

1. Copernic (Nicolas Copernic, 1473–1543)

- Dans *De revolutionibus orbium coelestium* (1543), il introduit le **modèle héliocentrique**.
- Copernic **ne mesure pas** l'unité astronomique, mais il **fixe les rapports des distances planétaires** (par rapport à celle de la Terre).
- Cela permet pour la première fois de définir la **géométrie relative** du système solaire, même si les **distances absolues** restaient inconnues.

2. Tycho Brahe (1546–1601). C'est le patron de Kepler

- Tycho réalise les **mesures angulaires les plus précises de son temps** (sans télescope).
- Il cherche notamment à **mesurer la distance de Mars** à la Terre pour trancher entre le modèle géocentrique et héliocentrique.
- Il conclut que les distances au Soleil doivent être **beaucoup plus grandes qu'on ne le pensait**, ce qui donne une **première idée de l'échelle réelle du système solaire**, bien qu'il n'ait pas établi la valeur de l'UA.

🌞 **XVIIe siècle**

3. Johannes Kepler (1571–1630)

- Dans ses *Lois du mouvement planétaire* (1609–1619), il établit les **rapports exacts entre les distances moyennes au Soleil et les périodes orbitales** (loi des périodes).
- Il fixe ainsi la **structure proportionnelle** du système solaire.
- Il estime la distance Terre–Soleil à environ **3 400 fois le rayon de la Terre** (≈ 22 millions de km) — une **valeur sous-estimée**, mais obtenue avec une méthode cohérente.

4. Giovanni Battista Riccioli (1598–1671)

- Dans son *Almagestum Novum* (1651), il compile les estimations disponibles.
- Il propose une valeur d'environ **13 000 rayons terrestres** (≈ 83 millions de km).
- Bien que toujours trop faible, il affine les bornes plausibles de la distance.

5. Jeremiah Horrocks (1618–1641)

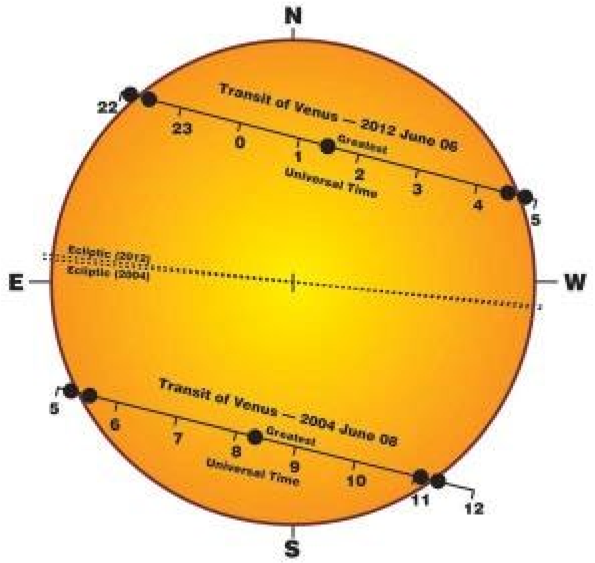
- Premier à **observer un transit de Vénus** en 1639.
- Utilise cet événement pour **estimer la distance Terre–Soleil** à environ **95 millions de km**, soit **la meilleure estimation du XVII^e siècle**, étonnamment proche de la vraie valeur (≈ 149,6 millions de km).

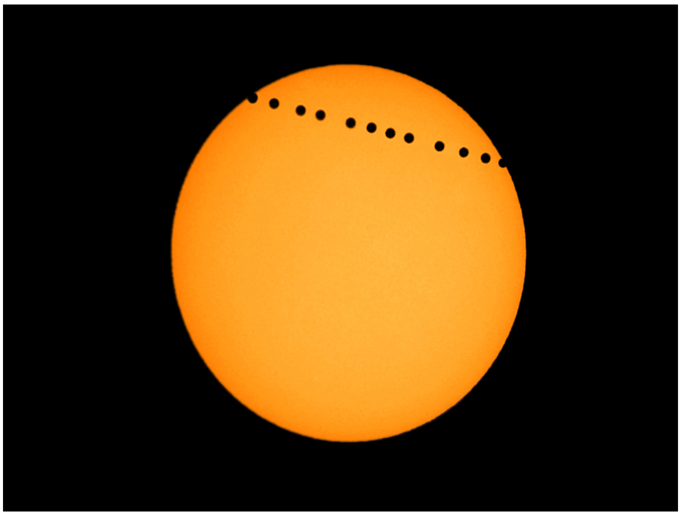
6. Christiaan Huygens (1629–1695)

- En observant **le diamètre apparent de Vénus et de Saturne**, il déduit la distance relative du Soleil.
- Il estime l'unité astronomique à environ **24 000 rayons terrestres** (≈ 150 millions de km) — une **valeur remarquablement juste**.
- Son estimation repose sur une approche trigonométrique et comparative avec la **taille apparente des planètes**.
- **Jean-Dominique Cassini** et **Jean Richer**, puis **Guillaume Le Gentil**, ont justement repris au **XVIII^e siècle** les travaux de leurs prédécesseurs pour **mesurer l'unité astronomique avec précision**.
- **Guillaume Le Gentil (1725–1792)** : il s'inscrit directement dans la **continuité des tentatives commencées au XVII^e siècle**, et il a joué un rôle crucial dans l'histoire de la **mesure moderne de l'unité astronomique**.
- **Le Gentil** est envoyé par l'Académie des sciences pour observer le **transit de Vénus de 1761** depuis les Indes orientales (actuel Sri Lanka / Inde).
- Malheureusement, à cause de la guerre de Sept Ans, il **n'arrive pas à temps** : il observe… la mer depuis son navire au moment du transit.
- Il décide alors de **rester sur place** pour attendre le **prochain transit en 1769** (!), soit **8 ans plus tard**.
- Mais le destin s'acharne : en 1769, **le ciel est couvert** au moment de l'observation à Pondichéry — il **rate encore** le phénomène. 😔
- Son histoire est devenue célèbre comme **l'une des plus tragiques et héroïques** de l'histoire des sciences.
- Les **autres équipes**, notamment celles de **Chappe d'Auteroche**, **Cook**, **Green**, et **Pingré**, ont réussi à observer le transit.

Grâce à la **compilation mondiale des mesures** (dont celles de Le Gentil ont servi à la calibration géographique), on a obtenu la **première mesure précise de l'unité astronomique**

- **Delambre et Méchain :1799 :** définition du **mètre** comme étant la 10 millionième partie du ¼ du méridien terrestre et à peu près à la même époque, adoption du **système décimal** vite adopté par tout le monde sauf l'Angleterre bien sur.





Le calcul de l'UA par le transit de Vénus

L'unité astronomique (UA) unité de mesure de distance utilisée en astronomie, notamment à l'intérieur du système solaire a longtemps été une unité sans correspondance avec les autres unités de mesures de distances utilisées sur l'ensemble de la Terre par tous ses occupants. La raison en est très simple, nous ignorions ce qu'elle représentait en km, toises, arpents.... ou tous autres unités de mesures de longueur. L'UA est égal à la distance moyenne séparant la Terre du Soleil, et tant que cette distance n'a pas pu être connue dans une autre unité de mesure, l'UA par elle-même n'était qu'une mesure relative. Sur le plan pratique elle avait tout de même une grande utilité car elle permettait de savoir les distances relatives des planètes au Soleil. Par exemple, grâce à la troisième loi de Kepler les astronomes savaient que Mars était 50% plus loin du Soleil que ne l'est la Terre, que Jupiter en était 5 fois plus éloignée,... mais sans savoir ce que cela représentait en km ou en mètres. Donner une valeur de type kilométrique à l'UA c'était comprendre notre place dans le système solaire et estimer la distance qui nous sépare des autres étoiles avec une précision raisonnable à partir de calculs trigonométriques très simple. En effet, maintenant que nous savons que l'UA égal 150 millions de km, nous savons qu'à 6 mois d'intervalle la Terre occupe des positions espacées de 300 millions de km, de quoi donner une base de référence à un triangle céleste vers les étoiles et connaître les distances qui nous en séparent. Aujourd'hui la distance Terre-Soleil est connue avec une grande précision et n'est plus « mesurée » occasionnellement lors d'un transit, mais continument avec les satellites en orbite autour des différentes planètes et du Soleil lui-même, et par des moyens indépendants des transits, grâce à des appareils perfectionnés comme les radars par exemple. Mais les transits ne sont pas négligés pour autant bien que leur intérêt ne soit plus d'affiner la mesure de l'UA. C'est grâce au transit de planètes comme Vénus, mais aussi la Terre dont on connait maintenant parfaitement la composition des atmosphères à toutes les altitudes, que les spectromètres et d'autres instruments peuvent être parfaitement étalonnés. Et cet intérêt est grandissant depuis que la découverte de planètes extrasolaires laisse supposer que certaines pourraient disposer d'atmosphères que les transits devant leur étoile pourraient permettre d'analyser, notamment dans le but d'y détecter des molécules signatures de la présence d'êtres vivants, au sens où on l'entend.... sur Terre. Si depuis le sol nous sommes tributaire de la rareté des transit des planètes intérieures, notamment ceux de Vénus, en vérité nous pouvons observer des transits de cette planète de façon quasiment continue depuis des satellites à l'orbite fortement inclinées sur l'écliptique tant que Vénus reste au voisinage de la Terre. Mais si le besoin de la permanence tout au long de l'année de l'observation des transits de Vénus devait se faire sentir, ce ne serait pas un problème d'envoyer un satellite en orbite autour de cette planète à l'altitude souhaitée et sur une orbite inclinée, ces deux paramètres étant optimisés pour ce que l'on cherche à observer. Il reste que pour des raisons historiques c'est pour expliquer comment les anciens ont tiré profit des transits planétaires que je vous ai préparé ce document. Il existe deux planètes qui peuvent s'aligner sur la ligne de visée depuis la Terre vers le Soleil, Mercure et Vénus, donc toutes deux sont susceptibles d'être utilisées avec les méthodes d'estimation de distances à l'aide des transits (on dit aussi passages). Mercure présente plus de transits que Vénus mais sa proximité du Soleil, à 61 % de la distance qui nous sépare du Soleil, nous fournit des résultats moins précis avec des mesures pourtant aussi minutieuses. C'est pour cette raison qu'il lui est préféré Vénus qui n'est qu'à 28% de cette distance. Des méthodes permettant de tirer parti du passage d'une planète intérieure il en existe plusieurs, qui sont plus ou moins compliquées à mettre en œuvre et nous retiendrons la méthode dite de Haley du nom de son inventeur, lequel avait aussi inventé une comète, bien que l'on dise plutôt découvreur dans ce cas. Cette méthode repose surtout sur des mesures de temps qui sont ensuite traduites en mesures angulaires, puisque la cheville ouvrière de la méthode est la trigonométrie. Le résultat ne s'obtient pas directement à partir des mesures de temps observées mais à la suite d'un long raisonnement qui consiste à résoudre consécutivement une suite de problèmes indépendants. Le résultat obtenu reste malgré tout approximatif, quel que soit le soin apporté aux mesures de temps, puisqu'il sera entaché de causes que la méthode ne prend pas en compte. En effet, les mesures dont il s'agit sont des mesures de temps séparés par des durées de plusieurs heures, et durant ce temps, la Terre a tourné sur elle-même, impliquant un changement de position pour les observateurs, et comme Vénus, changé de position sur leurs orbites avec une vitesse orbitale pour Vénus supérieure de 18% à celle de la Terre. Autant de phénomènes introduisant des biais qui sont ignorées par la méthode. Au niveau du principe il s'agit d'une solution très simple qui consiste à trouver le coté d'un triangle (La distance Terre-Soleil) dont on connaît un autre côté qui lui est perpendiculaire (La distance entre deux points sur le Soleil) et l'angle sous lequel ces deux points sont observés (donc depuis la Terre). Il ne s'agit que d'un triangle-rectangle et l'affaire se présente de la façon suivante : Démonstration 1 La trigonométrie donne la solution simplement : La distance entre les deux points divisée par la tangente de l'angle d'observation donne la distance entre l'observateur et le Soleil. On peut même ajouter que l'angle étant très petit, on peut remplacer la tangente par l'angle lui-même s'il est exprimé en radians. Réciproquement, en multipliant la distance qui sépare l'observateur du Soleil par l'angle d'observation donne la distance séparant les deux points. Il demeure cependant un problème de taille à résoudre avant de répondre à cette question : Nous ne connaissons pas la distance entre ces deux points, et d'ailleurs, d'où sortent-ils ? Nous allons donc avancer pas à pas en résolvant consécutivement tous les problèmes qui vont se poser au fur et à mesure de notre avancée dans cette recherche. Mais au paravent nous allons faire une petite exploration dans la géométrie pour démontrer certaines identités auxquelles nous devront faire appel, et il vaut mieux les connaître et mieux encore, les comprendre, avant de les appliquer. Démonstration 2 : On constate que les 4 angles formés par deux lignes qui se croisent sont égaux deux à deux et que cette égalité s'applique sur les paires d'angles opposés. Sur les deux figures, on « voit » que les angles a et c sont égaux entre eux comme le sont b et d. Pour rendre cette démonstration plus imagée on peut imaginer l'intersection des deux droites comme un axe et manœuvrer ces deux droites en faisant varier leurs angles pour constater que les angles opposés sont toujours égaux. Maintenant regardons la figure suivante qui ressemble à un joli demi papillon boiteux aux ailes bicolores traversées par une médiane (L et L') : Démonstration 3 Si vous avez retenu la deuxième démonstration vous savez que a = a', et

Démonstration 3 Si vous avez retenu la deuxième démonstration vous savez que a = a', et si vous avez retenu la première démonstration vous savez qu'en multipliant l'angle a par la longueur L vous obtenez la hauteur h, et ce qui est vrai pour a, L, et h l'est aussi pour a', L', et h'. Donc h = a x L et h' = a x L' En toute rigueur il faudrait dire h = tg a x L et h' = tg a x L' mais puisque nous avons que dans le problème que nous avons à traiter « la distance de la Terre au Soleil », cette distance est très grande et la distance entre les deux points que nous aurons à observer sur le Soleil comparativement très petite, alors l'angle d'observation étant lui aussi très petit, on confondra l'angle lui-même, exprimé en radian, avec sa tangente. A partir de h = a x L et h' = a' x L' nous pouvons écrire h/L = h'/L' et si nous multiplions par 2 les numérateurs de ces deux fractions égales entre elles, nous ne changeons pas cette égalité. Avec H = 2h et H' = 2h' nous avons H/L = H'/L' ce qui représente un papillon complet bien que toujours boiteux : Supposons que nous connaissions H' mais pas H (ou réciproquement H mais pas H') et que nous connaissions L et L' (ou simplement leur rapports réciproques L/L' ou L'/L). Nous pouvons alors connaître le H ou H' qui nous manque par une simple multiplication à partir de H/L = H'/L' nous obtenons H = H'L / L' Mais nous savons aussi grâce à une vieille litanie à laquelle je ne comprenais rien autrefois à l'école, me demandant qui étaient ces extrêmes et ces moyens qui devaient quelquefois se produire « Le produit des extrêmes est égal au produit des moyens » que si H/L = H'/L' alors HL' = H'L Retenez bien ceci car c'est une des clefs du calcul de l'UA. Voilà, nous avons fait à peu près le tour des prérequis et nous pouvons nous attaquer au plat de résistance. Revenons à ces deux points sur le Soleil représentés sur l'illustration de la démonstration 1, d'où sortent-ils ? En fait, ils sont fictifs et représente symboliquement deux lignes dont l'écartement nous importe. Ainsi, si nous savions le nombre de km qui les sépare avec une simple mesure de l'angle (démonstration 1) le problème serait réglé. On voit donc que la clef du problème se trouve dans la connaissance de la distance qui sépare ces deux points, et nous allons nous attacher à la déterminer. Reprenons la procédure de la méthode de Haley. Elle consiste depuis deux lieux de la Terre les plus éloignés possible en latitude à mesurer le temps que la projection du disque de Vénus va mettre pour effectuer la traversée du disque solaire. Chaque observateur devra noter scrupuleusement deux temps. Il s'agit du moment où l'ombre de Vénus se détache du limbe pour commencer sa traversée du disque solaire et du moment où il la termine en affleurant le limbe opposé. On appelle ces bornes contacts 2 et 3 et ils sont choisis parce qu'ils sont les moins difficile à observer. Chaque observateur déclenche le départ de son chronomètre au contact 2 tel qu'il l'observe depuis son lieu d'observation et l'arrête au contact 3. La différence entre les deux représente le temps de traversée. Sur l'image ci-dessus représentant le transit de 2004 on voit que la corde tracée par le passage de Vénus est assez loin du diamètre dont des passages antérieurs ont tout de même permis de montrer que des trajectoires au voisinage du diamètre de 32' angulaires se parcouraient en 8 heures (28800 secondes), ce qui est une indication intéressante pour la suite de l'exposé. En effet, le diamètre solaire est connu en valeur angulaire, laquelle varie en fonction de la date dans l'année puisque la trajectoire de la terre n'est pas un cercle mais une ellipse (mais en vérité il varie également en fonction de la longueur d'onde à laquelle on effectue la mesure). Cette traversé de Vénus en 8 heures au niveau du diamètre solaire va nous permettre de convertir les mesures de temps que nous allons faire en mesures angulaires, ce qui est un premier pas avant de les convertir en km. Les deux observateurs étant situés sur Terre sur des latitudes différentes vont voir la projection de Vénus sur des cordes différentes : Bien sûr, les échelles tant de la taille des objets en présence que des distances qui les séparent ne sont pas respectées mais permettent de faire tenir le principe schématisé dans la largeur de la page. A ce stade le problème consiste à estimer en la distance séparant les deux points noirs (ombres de vénus. On voit qu'ils suivent des trajectoires parallèles qui sont symétriques par rapport au diamètre du Soleil qui leur est perpendiculaire. C'est lorsque ces deux points sont positionner sur ce diamètre qu'il est le plus facile de mesurer cette distance. Le but est de connaître la distance de ces deux points par rapport au centre du disque (ou du limbe) et de faire ensuite la différence entre ces deux résultats puisqu'elle est égale à ce que l'on cherche, la distance angulaire entre ces deux points.

Plusieurs méthodes permettent cette mesure mais contentons-nous de la plus simple qui fait appel au théorème de Pythagore. Ne considérons qu'une seule de ces deux trajectoires pour déterminer la distance de « son point » au centre du disque solaire (il suffira de faire la même chose pour ce qui concerne l'autre trajectoire). Nous avons la figure suivante : Nous cherchons à déterminer B en connaissant R (le rayon solaire = 16'). Il nous faut donc déterminer A à partir des mesures de chronométrage qui a donné le temps de passage entre les contacts 2 et 3 de l'observateur de ce transit et nous pourrons alors référer au théorème de Pythagore pour déterminer la distance à laquelle se situe vénus par rapport au centre du Soleil. Il est maintenant temps d'introduire des mesures ayant réellement été chronométrées lors du passage de Vénus dans le passé. Les plus anciens furent des échecs pour diverses raisons, mais le premier passage ayant vraiment porté ses fruits, c’est-à-dire ayant contribué à une amélioration décisive de la connaissance de l’UA fut réalisé le 3 juin 1769 avec un observateur A, à Varda (Suède) et l’autre, B, à Tahiti. La différence de latitude entre ces deux lieux d’observation est de 6500 km. Depuis Varda, l’observateur A a mesuré un temps de transit de 5h56mn1s soit un temps en secondes de (5x3600 + 56x60 + 1) = 21 361 secondes. L’ombre de Vénus a donc mis la moitié de ce temps pour se retrouver à mi-parcours au point où elle est représentée sur le schéma ci-dessus soit 10 680,5 secondes que nous devons convertir en grandeur angulaire. Sur le schéma ci-dessus, le segment «A» mesure donc 32’ / 28800 x 10680,5 = 11,867’ Le rayon R mesurant 16’ il ne reste plus qu’à appliquer le fameux théorème de Pythagore pour en conclure la longueur du segment «B» du schéma : 10,732’ = √ qui représente la distance angulaire entre le centre du Soleil et l’ombre de Vénus vue depuis Varda Depuis Tahiti l’observateur B a chronométré un temps plus court, puisque la distance parcourue par l’ombre de Vénus su le Soleil se situe sur une corde plus petite. Il a noté 5h44mn1s soit un temps en secondes de (5x3600 + 44x60 + 1) = 20 641 secondes. Par les mêmes opérations que celles faites à l’aide des mesures de l’observateur A de Varda, nous obtenons pour «A’» (le même segment que A mais non représenté pour ne pas alourdir la figure) : 32’ / 28800 x 10320,5 = 11,467’ et en poursuivant pour obtenir B’ similaire à B de la corde la plus longue : 11,158’ = √ qui représente la distance angulaire entre le centre du Soleil et l’ombre de Vénus vue depuis la plage de Pointe Vénus sur la commune de Mahina à Tahiti. La différence entre ces deux résultats donne l’écart angulaire entre ces deux points vu depuis la Terre, soit 11,158 – 10,732 = 0,426’ c'est-à-dire l’angle β sur le schéma ci-dessous. Comme convenu plus haut, compte tenu de la petitesse de cet angle, nous pouvons le convertir en radians afin de l’utiliser lui-même dans les calculs sans devoir passer par les fonctions trigonométriques. Un demi-cercle correspondant à 180° soit (180 x 60’ = 10800’) est égal à π, 0,426’ = π /10800 x 0,426 = 0,000123918 rad Considérons maintenant le schéma suivant qui récapitule l’ensemble du problème : Nous savons deux choses : β = 0,000123918 rad et aussi K = 6500 km. D’après la démonstration 1 (au début) nous avons aussi que s/ β = U Et si vous avez bien retenu ce que je disais être une des clefs du calcul de l’UA à la fin de la démonstration 3 démontrant (HL’ = H’L) transposez le sur le schéma ci-dessus et vous avez : V x K = T x S et en divisant les deux membres de cette équation pas T nous avons : C’est cette équation qui va nous permettre de transformer la grandeur angulaire séparant les deux ombres de Vénus en grandeur kilométrique. V et T qui sont respectivement les distances séparant Vénus du Soleil et de la Terre nous sont inconnues (sinon il suffirait de les cumuler pour obtenir l’UA) mais ce qui importe ici est le rapport entre les deux, et cela nous le connaissons depuis Kepler à partir de la période orbital observée, et donc connue, pour les deux planètes : V √ = 0,72333325 Alors T = 1 - 0,72333325 = 0,27666675 Le rapport = = 2,614456743 s’écrit alors 2,614456743 x 6500 km = 16993,96883 km Il ne reste plus alors qu’à appliquer « l’évidence trigonométrique de la démonstration numéro 1s’écrit alors 2,614456743 x 6500 km = 16993,96883 km Il ne reste plus alors qu’à appliquer « l’évidence trigonométrique de la démonstration numéro 1 : La distance entre les deux points divisée par la tangente de l’angle d’observation donne la distance entre l’observateur et le Soleil. U (UA) = 16993,96883 / 0,000123918 = **137 138 824 km** A noter tout de même, l’UA n’est pas comme souvent dit et écrit la distance moyenne de la Terre au Soleil dont les fluctuations de l’orbite ne sont pas parfaitement connues et changeantes dans le temps, mais **le demi grand axe de l’orbite d’une planète fictive,(mais autrefois la Terre)** de masse nulle dont le mouvement moyen est égal à K(*) radians par jour (CF : L’Astronomie N° 51, JeanEude Arlot, IMCCE-CNRS). (*) K est la constante de Gauss (0,985 607 668 601 425 degrés/jour). Les unités de temps, de masse, et la constante de gravitation G réfèrent aux unités du système International.

Chapitre 4 Distances dans le système solaire

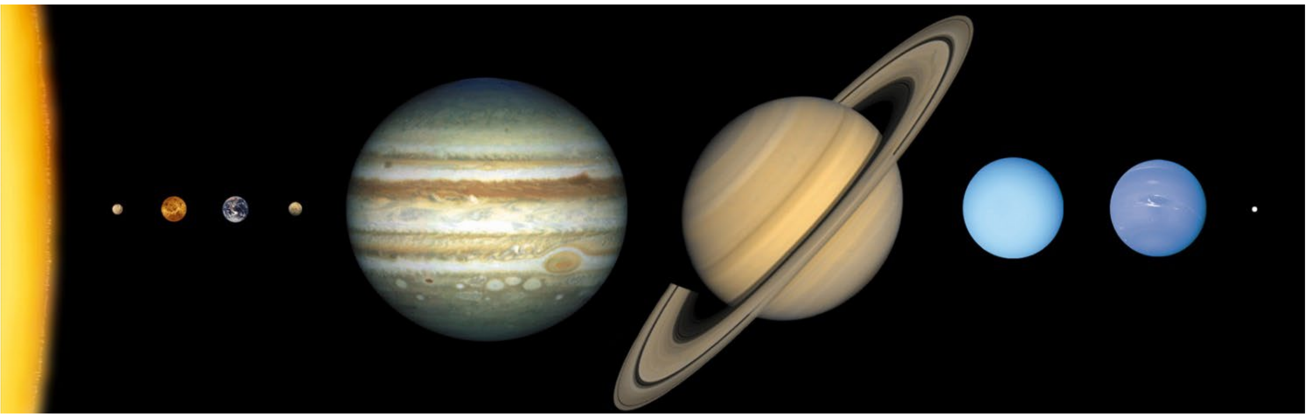
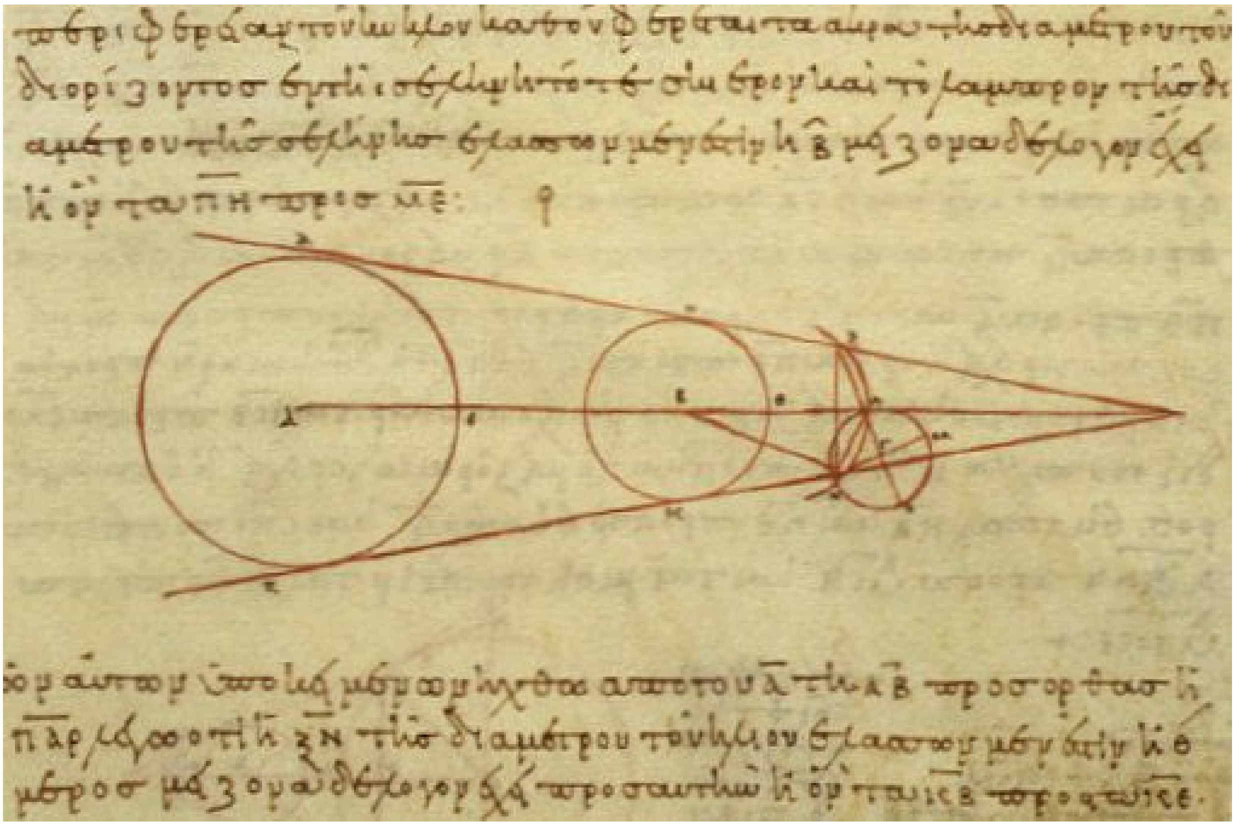


Image des planètes du système solaire. Les tailles des planètes sont à l'échelle, mais les distances entre les planètes ne le sont pas. (NASA)

Plusieurs éléments du dernier chapitre devraient vous avoir laissé un peu perplexe. Dans le modèle de Copernic, le Soleil est beaucoup plus loin de la Terre que ne l'est la Lune. Mais alors, pourquoi la Lune apparaît-elle aussi grosse que le Soleil dans le ciel? Kepler, pour énoncer sa troisième loi, devait connaître la grandeur de l'axe majeur des différentes planètes, mais comment pouvait-il déterminer ces grandeurs? Il s'avère que déterminer les grandeurs des objets et les distances entre ces objets est un des problèmes fondamentaux de l'astronomie. C'était vrai à la renaissance et c'est encore vrai aujourd'hui. Dans ce chapitre nous verrons quelques techniques qui permettent de déterminer la grandeur des objets dans le système solaire de même que la distance entre ces objets. Nous discuterons de techniques anciennes, mais aussi de certaines méthodes modernes.

Aristarque, le Soleil et la Lune

Le Soleil et la Lune ont la même taille apparente dans le ciel terrestre soit une taille angulaire d'environ 0,5°. Cette observation ne permet cependant pas de savoir si le Soleil et la Lune ont la même taille et sont à la même distance de la Terre, ou si un des deux est plus grand, mais se trouve plus loin de la Terre. Au III^{e} siècle avant J.-C. L'astronome grec Aristarque de Samos a conçu une technique pour déterminer la distance relative de ces deux astres. L'idée repose sur la **trigonométrie**, branche des mathématiques qui étudie les liens entre les grandeurs des côtés des triangles et les angles intérieurs de ces triangles.



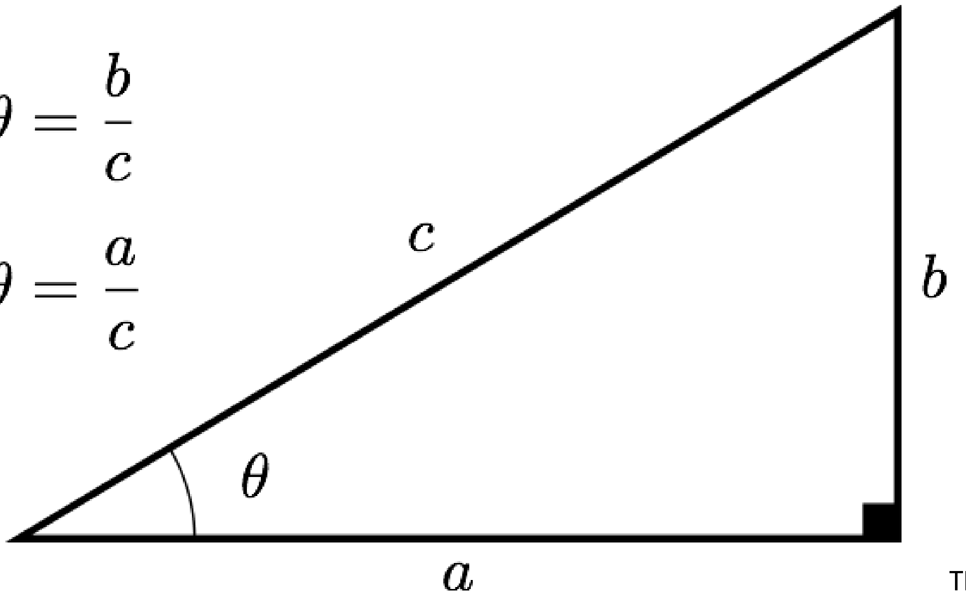
Dessin d'Aristarque de Samos qui lui permit de calculer les distances du Soleil et de la Lune.

Les rapports des côtés d'un **triangle rectangle**, c'est-à-dire un triangle ayant un angle de 90°, définissent les rapports trigonométriques sinus, cosinus et tangente. L'image ci-dessous montre un triangle rectangle de côtés , et , un des angles de ce triangle et les définitions du cosinus et du sinus de cet angle. Le lien qui relie les carrés des grandeurs de côtés est connu sous le nom du **théorème de Pythagore**.

$$a^2 + b^2 = c^2$$

$$\sin\theta = \frac{b}{c}$$

$$\cos\theta = \frac{a}{c}$$



Théorème de Pythagore et définition du cosinus et du sinus d'un angle.

Lorsque la Lune est en premier quartier ou en dernier quartier, le segment de droite qui relie la Lune à la Terre arrive directement sur la frontière entre la partie éclairée et la partie sombre de la Lune. Cela signifie que ce segment de droite fait un angle de 90° avec le segment de droite qui relie la Lune au Soleil. En ajoutant le segment de droite qui relie la Terre au Soleil, on obtient donc un triangle rectangle. Ainsi, en mesurant l’angle entre la Lune et le Soleil lorsque la Lune est en premier ou en dernier quartier, on peut obtenir le rapport de la distance Terre-Lune (dans le schéma ci-dessous) sur la distance Terre-Soleil (dans le schéma ci-dessous). Aristarque de Samos mesura un angle de 87°, ce qui lui permettait de conclure que le Soleil était environ 19 fois plus loin de la Terre que ne l’était la Lune. L’angle obtenu par Aristarque n’était pas tout à fait correct et on sait aujourd’hui que cet angle est en réalité de 89,85° ce qui signifie que le Soleil est environ 382 fois plus loin de la Terre que ne l’est la Lune.

$$\cos\theta = \frac{a}{c}$$

$$c = \frac{a}{\cos\theta}$$

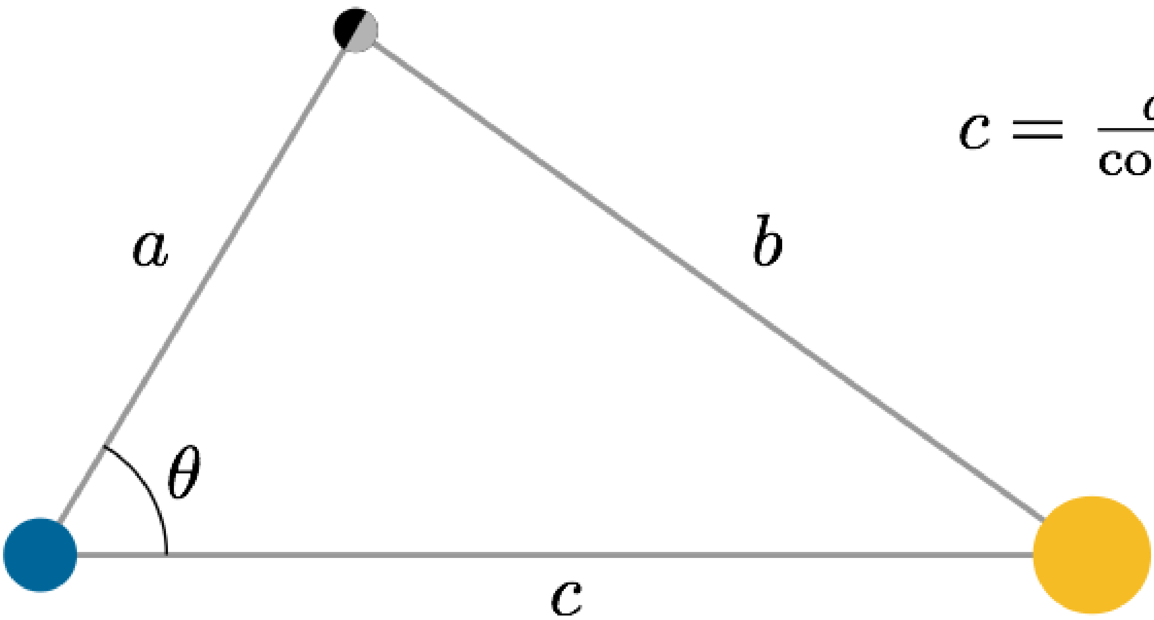


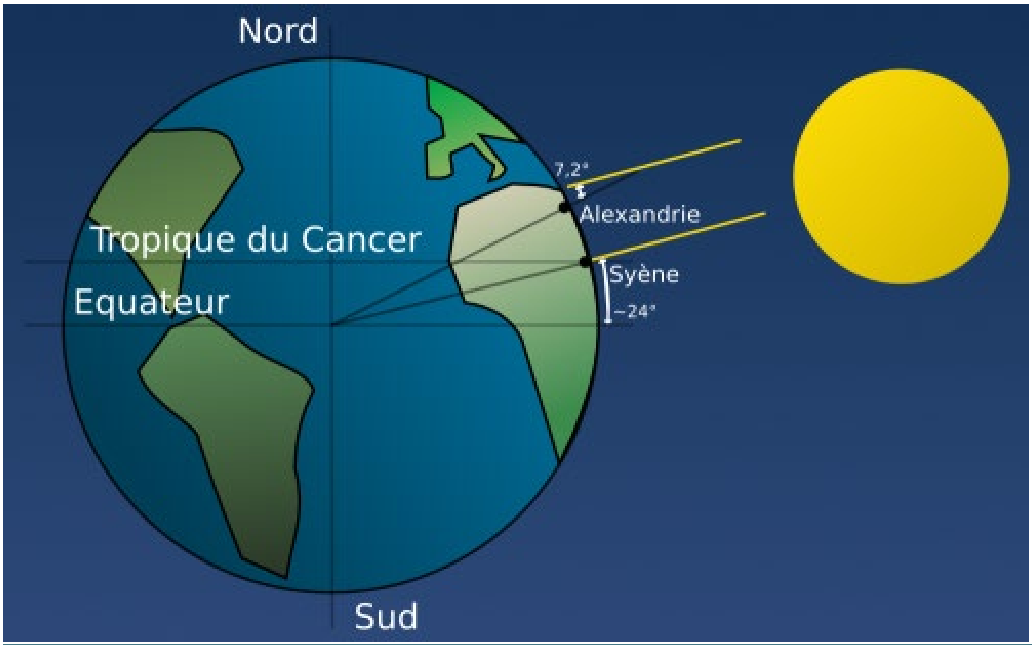
Illustration de la méthode d’Aristarque comparer la distance Terre-Lune à la distance Terre-Soleil.

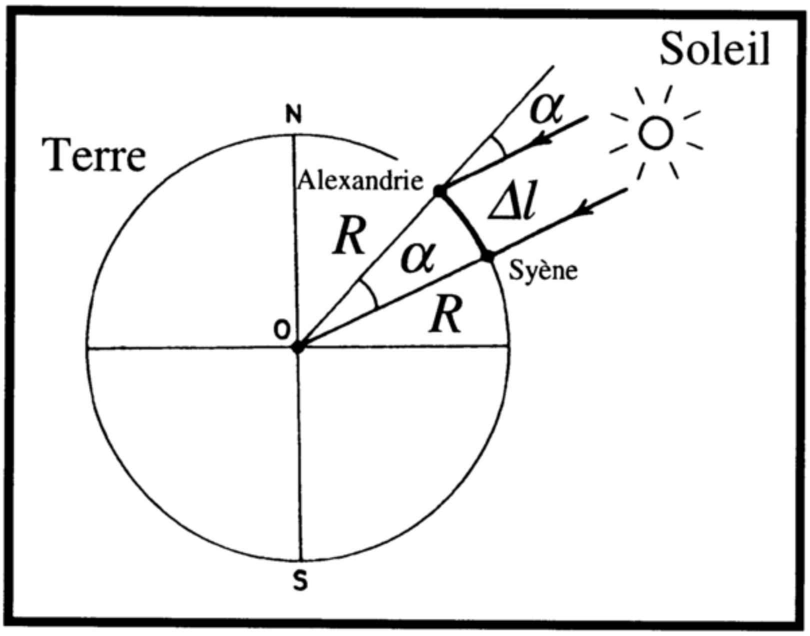
Il est important de comprendre que cette méthode ne permet pas de déterminer la distance Terre-Lune, ni la distance Terre-Soleil, mais seulement de déterminer le rapport entre ces deux quantités.

Aristarque, sachant que le Soleil était environ 19 fois plus loin que le Lune et que les deux astres avaient environ la même taille apparente, il put conclure que le Soleil devait être environ 19 fois plus grand que la Lune. Ceci est une conséquence du fait que les rapports des côtés de triangles semblables sont égaux. Avec les valeurs modernes, on sait plutôt que le Soleil est environ 382 fois plus grand que la Lune. Cette découverte d’Aristarque était importante parce qu’elle permettait d’avoir une idée de la grandeur du système solaire.

Ératosthène et la taille de la Terre

Un peu après Aristarque, Ératosthène, un autre philosophe grec, avait trouvé une méthode pour estimer la taille de la Terre. Rappelez-vous que les grecs savaient que la Terre était sphérique. Ératosthène voulait estimer la circonférence de la Terre. Pour y arriver, il mesura l’angle des rayons du Soleil par rapport à la verticale à Alexandrie au même moment où les rayons du Soleil arrivaient perpendiculairement au sol dans la ville de Syène, une ville 820 km plus au sud (voir figure ci-dessous).





Méthode d'Ératosthène pour mesurer la circonférence de la Terre (Gauche : Raphael Javaux; droite : Carlo Denis; CC BY-SA 3.0)

Il mesura un angle d'environ 7° grâce, encore une fois, à un peu de trigonométrie. Un peu de géométrie lui permit de conclure que l'angle de 7° était donc l'angle formé par les segments de droite reliant le centre de la Terre à Alexandrie et Syène. Sachant qu'un tour complet de la sphère terrestre équivalait à 360° et connaissant la distance entre Alexandrie et Syène, une règle de trois lui permit de déduire que la Terre avait une circonférence d'environ 42 000 km (la valeur moderne de la circonférence terrestre est de 40 000 km). Ératosthène venait d'établir la grandeur de la Terre.

Hipparque et la distance Terre-Lune

Hipparque réussit à estimer la distance entre la Terre et la Lune. Son approche reposait sur l'étude des éclipses de Lune. En supposant que le Soleil est beaucoup plus loin que la Lune, ce qui était connu depuis Aristarque, il savait que la forme de l'ombre projetée par la Terre était conique. Plus la Lune était proche de la Terre, plus elle aurait à traverser une ombre importante lors d'une éclipse de Lune. Par conséquent, l'éclipse durerait plus longtemps. Au contraire, si la Lune était loin de la Terre, l'ombre à traverser serait plus petite et alors l'éclipse durerait moins longtemps. Un peu de géométrie permit à Hipparque de calculer que la distance entre la Terre et la Lune devait être d'environ 32 diamètres terrestres. Or, le diamètre de la Terre était connu depuis Ératosthène et donc la distance Terre-Lune pouvait être estimée. On savait donc que la Lune était à environ 32 × (42 000 km / π) = 427 800 km de la Terre (la valeur moderne est 384 400 km).

En combinant ce résultat avec celui d'Aristarque, on pouvait estimer la distance Terre-Soleil à environ 19 × 1 344 000 km = 8 128 200 km de la Terre. Avec la valeur moderne du rapport distance Terre-Soleil à distance Terre-Lune, on obtient plutôt 163 419 600 km ce qui est très proche de la distance Terre-Soleil telle que mesurée aujourd'hui de 150 000 000 km.

Remarquez qu'il aurait été impossible pour Hipparque de déterminer la distance Terre-Lune sans connaître préalablement le diamètre de la Terre. Il n'aurait pu obtenir que des rapports de grandeurs, comme Aristarque. La mesure de la taille de la Terre était donc le premier pas dans la détermination de distances beaucoup plus grandes dans le système solaire. Ce mécanisme, où on se base sur une distance plus petite pour déterminer une légèrement plus grande est la base de toutes les déterminations de distances en astronomie. On y réfère souvent sous le nom de l'**échelle des distances cosmique** : on ne peut atteindre une distance plus grande qu'en grimpant d'abord sur le barreau correspondant à une distance plus petite.

Distance des planètes

Pour déterminer les distances des autres planètes du système solaire, il fallut attendre le modèle de Copernic. En effet, ce n'est qu'avec ce modèle correct d'un point de vue géométrique qu'il était possible de concevoir des méthodes pour mesurer les distances des planètes. L'approche pour les planètes inférieures est très similaire à celle utilisée pour déterminer la distance Terre-Lune. On considère le triangle formé par la Terre, le Soleil et la planète inférieure d'intérêt lorsque celle-ci se trouve en élongation maximale. À ce moment, l'angle à la position de la planète inférieure est un angle droit. Avec un peu de trigonométrie, on peut obtenir la distance entre la planète inférieure et le Soleil en multiple de la distance Terre-Soleil. Puisque la distance Terre-Soleil est utilisée comme valeur de référence, on la nomme une **unité astronomique**.

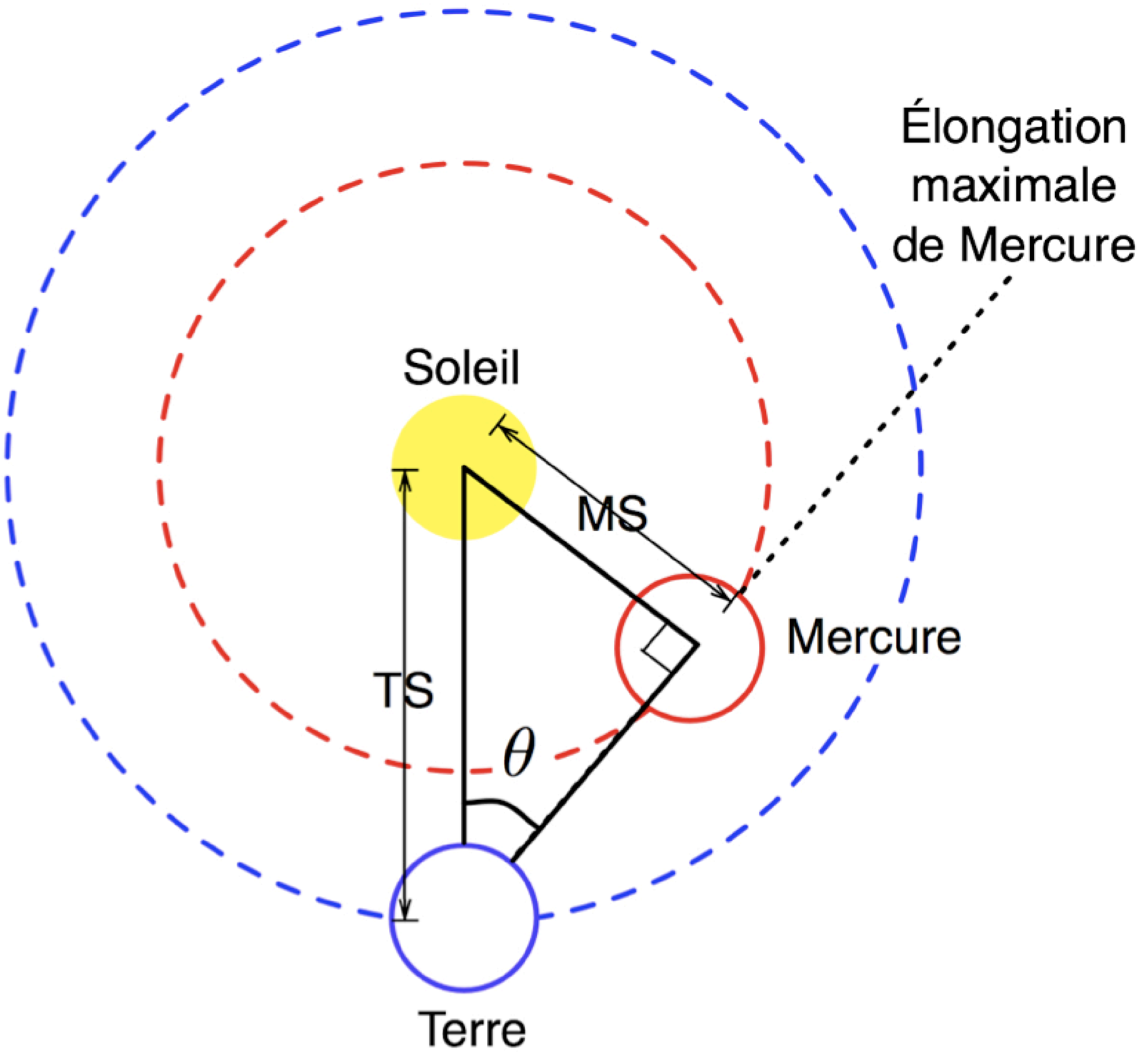


Illustration de la méthode pour déterminer la distance des planètes inférieures

Pour mesurer les distances des planètes supérieures, Kepler proposa une technique ingénieuse basée sur l'**effet parallaxe**. Si on tient une pomme à quelques centimètres de son visage, la pomme n'apparait pas au même endroit par rapport aux objets lointains si on la regarde avec l'œil droit ou avec l'œil gauche. Cette disparité est utilisée par le cerveau pour déterminer la distance à laquelle la pomme se trouve. Évidemment, vous n'avez pas à faire de calculs trigonométriques complexes pour prendre une pomme, votre cerveau s'en charge. Le problème c'est que l'effet s'estompe pour les objets plus lointains. Il faudrait que nos yeux soient plus éloignés l'un de l'autre pour que l'effet parallaxe nous permette de déterminer des distances au-delà d'environ deux mètres. Les planètes supérieures sont beaucoup plus loin que deux mètres. Pour utiliser l'effet parallaxe il faut observer un objet de deux points de vue différents entre lesquels on connait la distance et il faut que cette distance soit d'une taille comparable à la distance de l'objet qu'on veut mesurer.

Kepler proposa de mesurer la parallaxe d'une planète supérieure entre deux moments où elle se trouve au même point de son orbite. À ces deux moments, la Terre est à deux endroits différents de son orbite entre lesquels on connait la distance (en unités astronomiques) puisqu'on sait combien de temps s'est écoulé entre les deux instants.

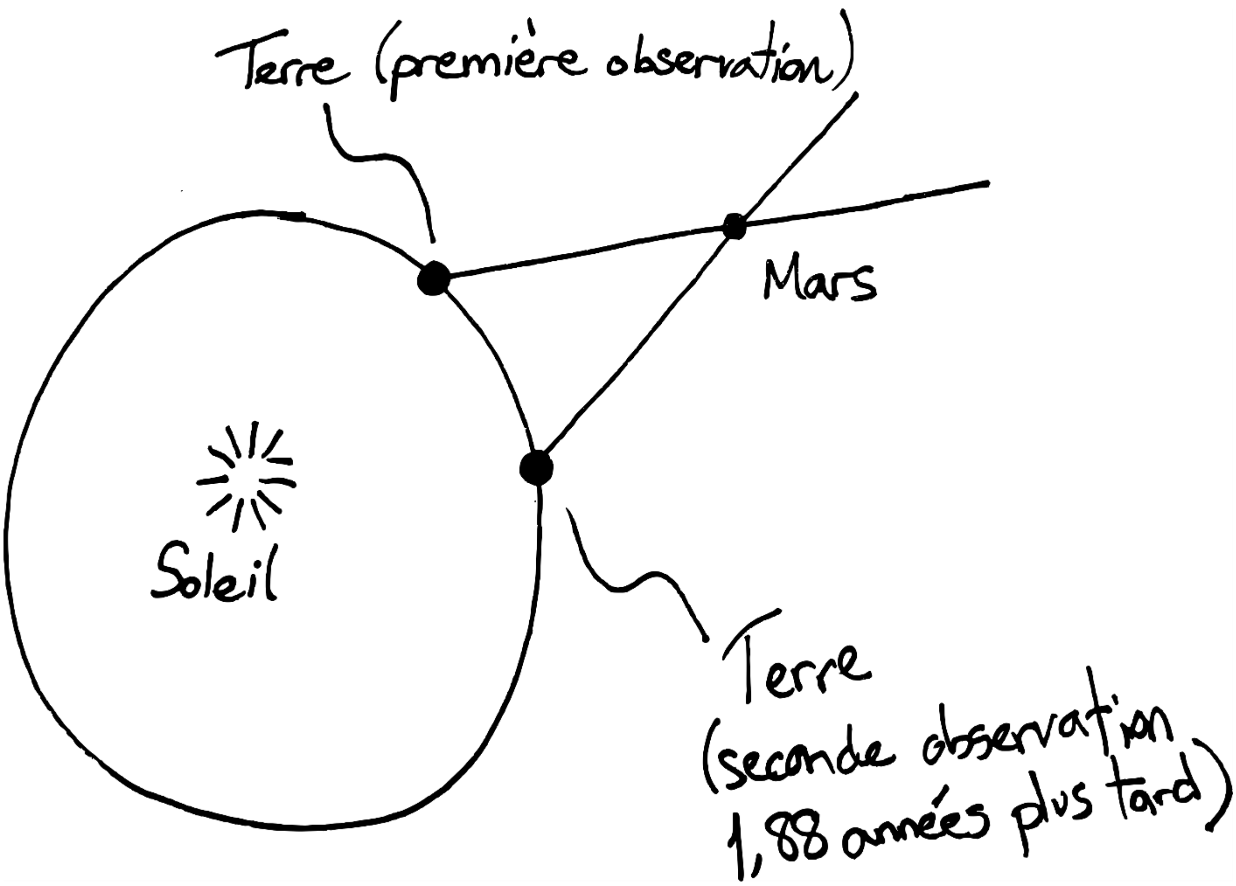


Illustration de la méthode de Kepler pour déterminer la distance des planètes supérieures

Une modification de l'idée de la parallaxe a permis de déterminer une valeur de l'unité astronomique beaucoup plus proche de la réalité que celle obtenue en Grèce antique. Entre 1671 et 1673, un scientifique italien, Giovanni Domenico Cassini, et son étudiant français, Jean Richer, ont appliqué l'idée de la parallaxe pour déterminer la valeur de l'unité astronomique. Ils ont mesuré la parallaxe de Mars depuis Paris et Cayenne, en Guyane française. Puisqu'ils connaissaient la distance entre ces deux endroits sur Terre, ils ont pu obtenir une valeur de distance de Mars. En combinant ce résultat avec la mesure de la distance Terre-Mars obtenue par Kepler en unités astronomiques, ils ont été en mesure de déduire la valeur de l'unité astronomique. À partir de ce moment, il était possible de connaître les distances de tous les astres errants dans le système solaire.

Méthode du radar

Il existe aujourd'hui une méthode beaucoup plus efficace et beaucoup plus précise pour déterminer la distance des objets du système solaire. On utilise la technique du **radar**. Le principe est d'envoyer une onde radio vers l'objet dont on veut savoir la distance et de mesurer le temps que prend cette onde pour atteindre l'objet et être réfléchie vers la Terre. Puisqu'on connait la vitesse de propagation des ondes radios, on peut en déduire la distance à laquelle l'objet se trouve.

Exercices

1. Associez chacune des personnes suivantes à une mesure de distance. Personnes : Hipparque, Kepler, Jean Richer, Aristarque, Eratosthène. Distances : détermination de l'unité astronomique,

circonférence de la Terre, rapport des distances Terre-Lune et Terre-Soleil, distance Terre-Mars en unités astronomiques, distance Terre-Lune.

2. Qu’est-ce qu’un triangle rectangle?

3. Expliquez pourquoi Hipparque n’aurait pas été capable de déterminer la distance Terre-Lune sans les travaux d’Ératosthène.

4. Que signifie l’expression *échelle des distances cosmique*?

5. Expliquez la méthode d’Aristarque pour déterminer la distance Terre-Lune. Appuyez votre explication d’un schéma.

6. Énoncez la deuxième loi de Kepler et expliquez ce qu’elle signifie en termes des vitesses des planètes.

7. Expliquez la méthode utilisée pour déterminer la distance des planètes inférieures en vous appuyant d’un schéma.

8. Est-ce que la méthode que vous avez décrit à la question précédente aurait pu être utilisée avec le modèle de Ptolémée?

9. Définissez l’effet parallaxe.

10. Vrai ou faux? Une orbite avec une excentricité de 0,8 ressemble davantage à un cercle qu’une orbite avec une excentricité de 0,3.