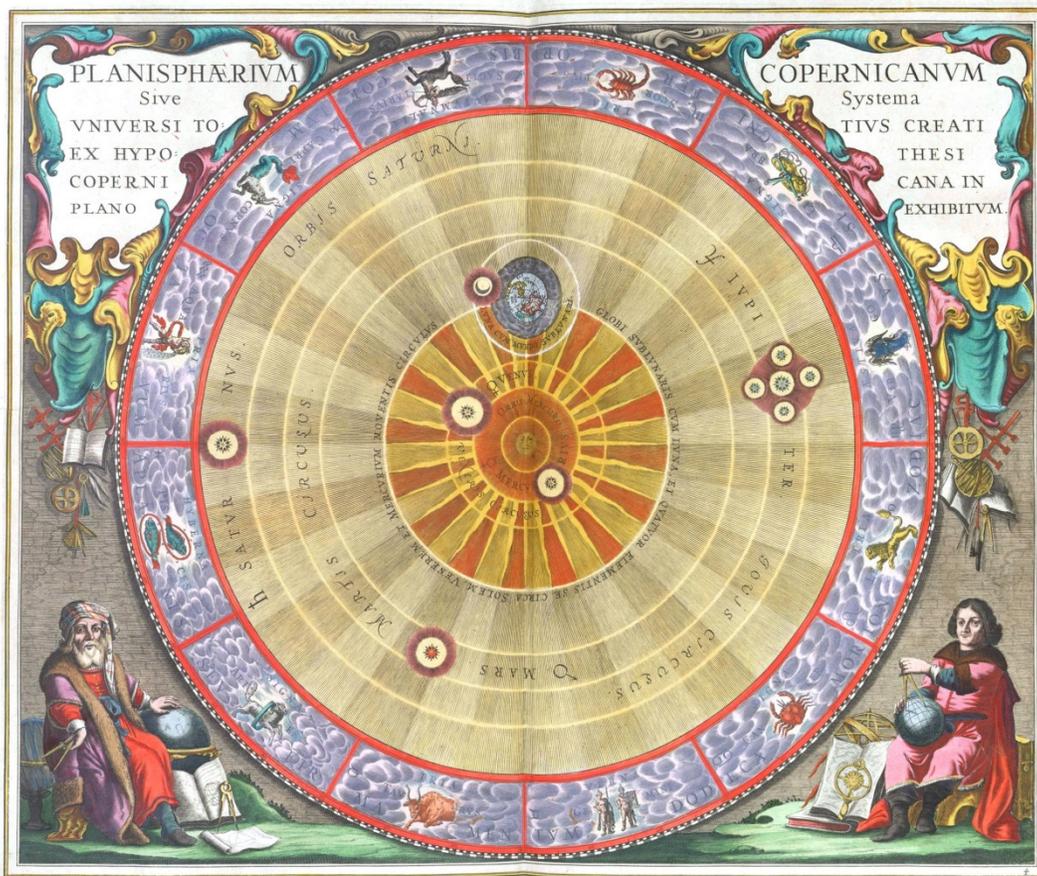


# ET LES MODÈLES DU SYSTÈME SOLAIRE

*Comment a-t-on pu savoir que c'est la Terre qui tourne autour du Soleil et non l'inverse ?*



[vintageprintable.com/wordpress/vintage-printable-science-2/various-astronomy-astrology-and-celestial/astronomy-rare-book-1/celestial-harmonia-macrocosmica-of-andreas-cellarius-plate-\\_04/](http://vintageprintable.com/wordpress/vintage-printable-science-2/various-astronomy-astrology-and-celestial/astronomy-rare-book-1/celestial-harmonia-macrocosmica-of-andreas-cellarius-plate-_04/)

Découvrez la réponse à cette question dans ce chapitre.

## E1.1 LE MOUVEMENT DES PLANÈTES PAR RAPPORT AUX ÉTOILES DANS LE CIEL

En observant le ciel, on note assez rapidement que 7 objets se déplacent par rapport aux étoiles dans le ciel. On a donné le nom de *planètes* à ces objets, ce qui signifie *astres errants* en grec. Il y a évidemment le Soleil et la Lune, dont nous avons déjà décrit les mouvements par rapport aux étoiles dans les chapitres précédents, mais il y a cinq autres objets, beaucoup moins brillants que le Soleil et la Lune, qui se déplacent aussi par rapport aux étoiles. Les voici en ordre de brillance maximale.

- Vénus (♀), magnitude variant de -4,9 et -3,8.
- Mars (♂), magnitude variant entre -3,0 et 1,6.
- Jupiter (♃), magnitude variant entre -2,9 et -1,6.
- Mercure (☿), magnitude variant entre -2,6 et 5,7.
- Saturne (♄), magnitude variant entre -0,2 et 1,5.

Il ne faut pas penser que ces objets sont difficiles à voir. Rappelez-vous que l'étoile la plus brillante, Sirius, a une magnitude de -1,5, ce qui signifie que toutes ces planètes, à l'exception de Saturne, sont plus brillantes que Sirius à un moment donné ou à un autre.

Voici, par exemple le mouvement de Jupiter par rapport aux étoiles, la constellation du Taureau dans ce cas, durant le moins de mars 2013.



Fait avec le programme *Cartes du ciel*

La ligne jaune est l'écliptique. Les planètes suivent toutes des trajectoires dans le ciel qui sont assez près de l'écliptique. La moitié de la trajectoire est au-dessus de l'écliptique et l'autre moitié est au-dessous de l'écliptique et la trajectoire croise l'écliptique aux nœuds.

L'écart angulaire maximal entre la trajectoire et l'écliptique se produit entre les nœuds et le tableau suivant vous donne la valeur de cet écart maximal pour chaque planète.

Planète	Écart maximal	Planète	Écart maximal
Lune	5,145°	Jupiter	1,305°
Vénus	3,395°	Saturne	2,485°
Mars	1,850°	Mercure	7,005°

Le mouvement des planètes n'est cependant pas aussi prévisible que celui du Soleil et de la Lune. Le Soleil et la Lune se déplacent avec un rythme presque constant le long de l'écliptique. Les planètes ont des mouvements beaucoup moins réguliers.

### L'élongation maximale (Vénus et Mercure)

Vénus et Mercure se déplacent le long de l'écliptique en suivant le Soleil tout en oscillant d'un côté à l'autre du Soleil. L'amplitude de cette oscillation est différente pour chacune de ces planètes. Mercure oscille avec une amplitude de 22,8° et Vénus oscille avec une amplitude de 46,3°. Cela signifie que Vénus s'éloignera jusqu'à 46° d'un côté du Soleil sur l'écliptique pour ensuite revenir vers le Soleil, le croiser et ensuite s'éloigner jusqu'à 46° de l'autre côté du Soleil sur l'écliptique. Vénus retourne ensuite vers le Soleil, le croise et s'éloigne jusqu'à 46° du Soleil. Ce cycle recommence sans cesse.

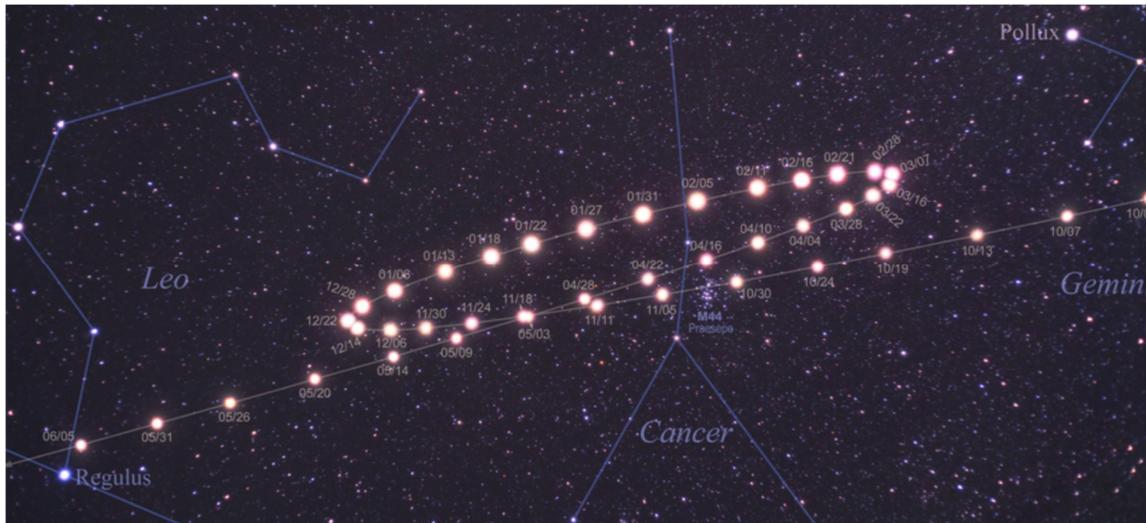
L'angle maximal entre le Soleil et ces planètes pour le nom d'*élongation maximale*. En fait, elle varie un peu. Pour Mercure, l'élongation maximale pour varier entre 17,9° et 27,8° alors que pour Vénus, elle peut varier entre 45,9° et 46,7°.

### Le mouvement rétrograde (Mars, Jupiter et Saturne)

Ces trois planètes n'oscillent pas d'un côté à l'autre du Soleil. Le Soleil et ces planètes se déplacent indépendamment sur l'écliptique.

Cependant, le mouvement de ces planètes n'est pas régulier sur l'écliptique. Elles semblent se déplacer régulièrement pendant un certain sur l'écliptique, mais, à un moment donné, la planète ralentit son mouvement, s'arrête, et commence à se déplacer dans l'autre sens le long de l'écliptique. Elle se déplace ainsi dans le sens inverse pendant un certain temps pour ensuite ralentir, s'arrêter et recommencer son mouvement dans le sens normal du déplacement le long de l'écliptique.

On appelle ce mouvement dans le sens inverse *le mouvement rétrograde*. L'image suivante vous montre la position de Mars en 2010.



regulus-starnotes.blogspot.ca/2010/06/thursday-night-blog-dump.html

On remarque bien que le mouvement de Mars, généralement vers la gauche par rapport aux étoiles, s'est inversé pendant près de deux mois alors que Mars était devant la constellation du Cancer.

L'animation suivante montre le mouvement rétrograde de Mars en 1994-1995.

<http://www.youtube.com/watch?v=cSU5VwIQTNI>

(Le point blanc passant parfois à toute vitesse est la Lune, qui se déplace très rapidement sur l'écliptique.)

## La préférence zodiacale

Si on fait une moyenne pendant une longue période du mouvement d'une planète, on remarque qu'elle se déplace parfois moins vite qu'en moyenne sur une certaine région de l'écliptique et plus vite qu'en moyenne sur une autre région de l'écliptique. Ces deux régions sont à  $180^\circ$  l'une de l'autre dans le ciel.

La planète passe donc, en moyenne, plus de temps d'un côté du ciel que de l'autre, un phénomène qu'on appelle *la préférence zodiacale*. (C'est comme si la planète préférait être dans certaines constellations et y passait plus de temps.)

Chaque planète a sa zone de préférence zodiacale. Les mouvements rétrogrades de Mars, Jupiter et Saturne ne se font pas nécessairement dans la zone préférée.

## Des mouvements difficiles à prévoir

Les mouvements des planètes étant un peu compliqués, certaines civilisations pensèrent que les mouvements des planètes étaient contrôlés par les Dieux et que ceux-ci tentaient de communiquer avec nous par ces mouvements. Les habitants de la civilisation

mésopotamienne (aujourd'hui l'Irak) attachaient une grande importance aux présages, ce qui amena le développement de l'astrologie, quoiqu'assez tardivement (7<sup>e</sup>-6<sup>e</sup> siècle av. J.-C.). Les plus vieux horoscopes connus datent de 410 av. J.-C., alors que le pays est sous domination perse. L'astrologie mésopotamienne ne s'intéresse qu'aux grands événements et ne prétend pas prévoir l'avenir de chaque personne individuellement. Aussi, l'astrologie mésopotamienne interprète tous les signes du ciel, incluant même la météo qui a une importance tout aussi grande que la position des planètes.

Ce ne sont pas toutes les civilisations qui développèrent une astrologie. Ainsi, il n'y avait pas d'astrologie en Égypte ancienne.

## Les périodes du mouvement des planètes

Pendant plusieurs siècles av. J.-C., les Égyptiens, les Mésopotamiens et les Chinois notent certaines configurations particulières de planètes dans le ciel. On notait principalement les configurations suivantes.

- 1) **La conjonction** : les deux astres sont dans la même direction vus de la Terre, cela signifie qu'ils sont au même endroit sur l'écliptique (quoiqu'ils puissent être un peu au-dessus ou un peu au-dessous de l'écliptique). L'image de droite nous montre une conjonction entre le Soleil et une planète.



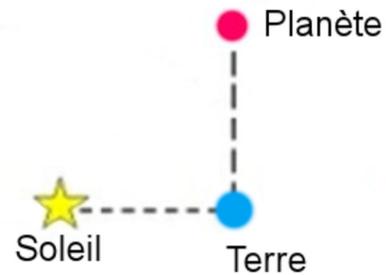
[astronomy.swin.edu.au/cms/astro/cosmos/e/Elongation](http://astronomy.swin.edu.au/cms/astro/cosmos/e/Elongation)

L'image suivante nous montre une conjonction de Vénus et de Jupiter.



[jotrilide.free.fr/blog/?p=97](http://jotrilide.free.fr/blog/?p=97)

- 2) **La quadrature** : les deux astres sont à  $90^\circ$  l'un de l'autre vus de la Terre. On pourrait, par exemple, avoir une quadrature entre le Soleil et une planète.



[astronomy.swin.edu.au/cms/astro/cosmos/e/Elongation](http://astronomy.swin.edu.au/cms/astro/cosmos/e/Elongation)

Vénus et Mercure ne peuvent jamais être en quadrature avec le Soleil, car ces planètes sont toujours près du Soleil ( $46^\circ$  au maximum pour Vénus, qui est celle qui s'éloigne le plus du Soleil).

- 3) **L'opposition** : les deux astres sont à  $180^\circ$  l'un de l'autre vus de la Terre. L'image de droite vous montre la configuration lors d'une opposition entre le Soleil et une planète.



[astronomy.swin.edu.au/cms/astro/cosmos/e/Elongation](http://astronomy.swin.edu.au/cms/astro/cosmos/e/Elongation)

Mercure et Vénus ne peuvent jamais être en opposition avec le Soleil, car elles sont toujours près du Soleil.

Notez que les mouvements rétrogrades de Mars, Jupiter et Saturne se produisent toujours lors de l'opposition de la planète avec le Soleil.

- 4) Les moments où on atteint **l'élongation maximale** (pour Mercure et Vénus).

En notant ces positions, on note certaines régularités.

On remarque premièrement que les configurations entre une planète et le Soleil se répètent à intervalle régulier. Par exemple, les oppositions de Mars reviennent tous les 780 jours. Si on a une conjonction entre le Soleil et Mars, il y en aura une autre 780 jours plus tard. Cette période de répétition des configurations s'appelle la *période synodique* ( $S$ ) de la planète. Voici la valeur de la période synodique des planètes, en ordre croissant.

Planète	Période synodique	Planète	Période synodique
Lune	29,5 j	Jupiter	398,9 j
Mercure	115,9 j	Vénus	583,9 j
Saturne	378,1 j	Mars	780,0 j

Les observateurs de l'Antiquité ont aussi mesuré la période sidérale de chaque planète. On a vu que les planètes se déplacent par rapport aux étoiles le long de l'écliptique. La période sidérale est le temps moyen qu'il faut pour que la planète revienne à la même place sur l'écliptique. Voici la période sidérale de chaque planète, en allant de la plus petite à la plus grande.

Planète	Période sidérale	Planète	Période sidérale
Lune	27,3 j	Mars	687,0 j
Vénus	365,26 j	Jupiter	4 333 j (11,87 a)
Mercure	365,26 j	Saturne	10 759 j (29,4 a)

Il s'agit d'une valeur moyenne. La période peut varier passablement à cause de la préférence zodiacale, du mouvement rétrograde (Mars, Jupiter et Saturne) et des oscillations de chaque côté du Soleil (Vénus et Mercure).

Comme Mercure et Vénus restent toujours près du Soleil, leur période sidérale moyenne est la même que celle du Soleil, qui est de 365,2565654 jours.

## Prévoir les positions des planètes

Les Mésopotamiens, les Égyptiens et les Chinois observent le mouvement des planètes, mais jamais ils ne sentent le besoin d'élaborer un modèle d'univers incluant les planètes dans le but d'expliquer leurs mouvements. Les Mésopotamiens et les Chinois tentaient de découvrir des formules qui donneraient les bonnes positions des planètes, sans qu'il y ait de modèle théorique qui explique la formule. Ce sont des méthodes purement arithmétiques.

Par exemple, les Mésopotamiens observent que le Soleil ne se déplace pas à un rythme constant sur l'écliptique. Ils séparent donc l'écliptique en régions et donnent au Soleil une vitesse constante différente pour chaque région. On ne cherche pas à expliquer pourquoi. C'est comme ça, c'est tout. On le fait juste parce que ça donne la bonne position du Soleil.

Au fil du temps, les prévisions deviennent de plus en plus précises. Il faut attendre le 16<sup>e</sup> siècle avec que la théorie européenne deviennent aussi précise que la théorie chinoise du 11<sup>e</sup> siècle.

## E1.2 LES MODÈLES GÉOCENTRIQUES

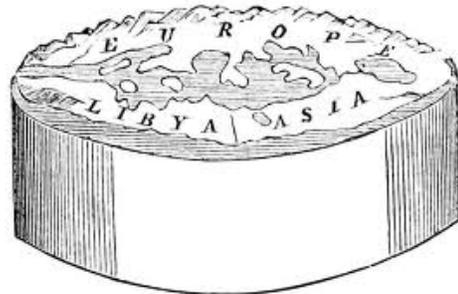
Dans les modèles du monde très anciens de toutes les civilisations du monde, la Terre est plate. Généralement, ça ressemble à ce qui est montré sur l'image de droite. Dans ces modèles, la Terre est supportée par des objets très variables selon les civilisations.



[numiano.free.fr/Fcosmo/cg\\_histoire.html](http://numiano.free.fr/Fcosmo/cg_histoire.html)

### Le modèle d'Anaximandre

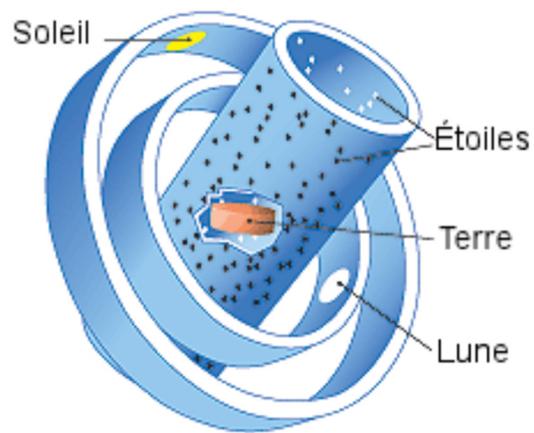
Anaximandre propose, au 6<sup>e</sup> siècle av. J.-C., un modèle ressemblant au modèle de la Terre plate, mais avec des modifications que certains qualifient de révolutionnaires. Il propose premièrement que la Terre est de forme cylindrique dont la hauteur est égale au tiers du diamètre. Le dessus du cylindre est la partie habitable de la Terre. Ce bout n'est pas plat, mais légèrement courbé pour tenir compte des observations qui montrent que la surface de la Terre est courbée.



[en.wikisource.org/wiki/Popular\\_Science\\_Monthly/Vol\\_ume\\_10/March\\_1877/How\\_the\\_Earth\\_was\\_Regarded\\_in\\_Old\\_Times](http://en.wikisource.org/wiki/Popular_Science_Monthly/Vol_ume_10/March_1877/How_the_Earth_was_Regarded_in_Old_Times)

Dans ce modèle, la Terre n'est pas supportée par quoi que ce soit. C'est la véritable idée révolutionnaire de ce modèle. Selon Anaximandre, elle demeure au même endroit à cause de son indifférence... Pas très convaincant.

Dans ce modèle, il y a des anneaux ou des genres de tuyaux tournant autour de la Terre. Les parois de ces anneaux et tuyaux sont vides et on retrouve du feu à l'intérieur de ceux-ci. On peut voir le feu brillant à l'intérieur par des trous sur la surface du cylindre. Il y a plusieurs trous dans le long cylindre près de la Terre, ce qui nous donne les étoiles. Un seul trou plus gros dans le deuxième cylindre nous donne la Lune, dont les phases sont expliquées par un changement de la forme du trou. Finalement, le Soleil est un trou dans le dernier cylindre.



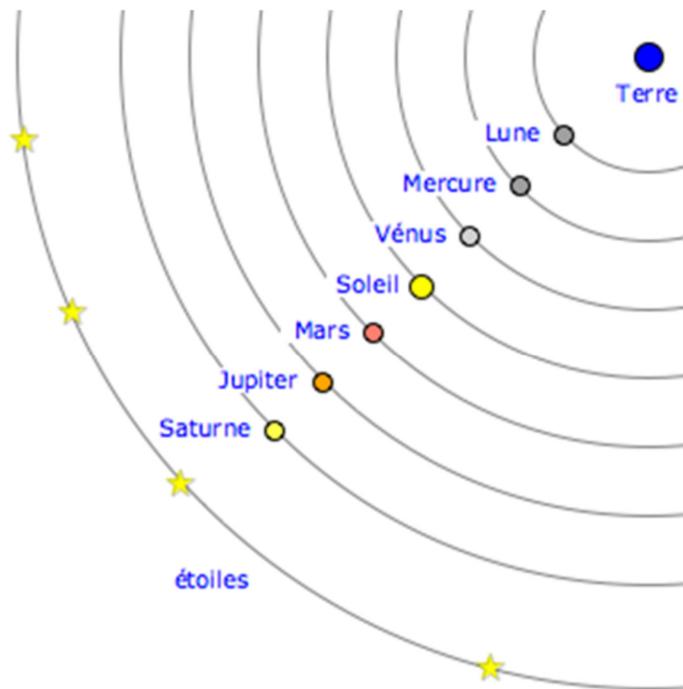
[www.aft.org/newspubs/periodicals/ae/fall2004/hakim.cfm](http://www.aft.org/newspubs/periodicals/ae/fall2004/hakim.cfm)

## Une Terre ronde

Quelques décennies plus tard, les pythagoriciens transforment la Terre d'Anaximandre en une sphère. Bien sûr, une forme sphérique permet d'expliquer les observations des étoiles, mais la surface courbe du cylindre d'Anaximandre le permettait aussi. Ce changement n'est pas dû à de nouvelles observations qui permettaient de conclure que la Terre était ronde, mais plutôt à des considérations philosophiques. Les pythagoriciens choisissent la sphère parce que c'est, selon eux, une forme parfaite.

## Un modèle géocentrique simple

Pour les pythagoriciens, les étoiles se retrouvent aussi sur une sphère entourant la Terre. C'est la sphère céleste. Cette sphère tourne autour de la Terre en 24 heures. Entre la Terre et les étoiles, on retrouve les planètes qui tournent sur des trajectoires parfaitement circulaires autour de la Terre. Pour la première fois dans un modèle de l'univers, les planètes ne sont pas toutes à la même distance. On les classe en ordre de période sidérale, ce qui donne l'ordre suivant : Lune, Mercure, Vénus, Soleil, Mars, Jupiter, Saturne. (L'ordre de Mercure, Vénus et du Soleil pouvant être changé, car ils ont tous la même période sidérale.) Ils adoptent cet ordre parce qu'ils pensent que les planètes qui prennent le plus de temps à faire un tour complet du ciel devaient avoir des trajectoires plus longues à parcourir.



jeremy-vaulon.pagesperso-orange.fr

Les pythagoriciens ne connaissent pas les distances exactes des planètes, mais elles furent fixées en fonction de certains nombres que l'on considérait comme harmonieux selon les idées pythagoriciennes. Ils croient que les planètes, en se déplaçant dans l'air (car on

supposait que l'air emplissait tout l'univers), produisent une note de musique, exactement comme une corde d'un instrument de musique quand on la frotte. C'est un peu comme si l'univers était un vaste instrument de musique dont les cordes (les orbites) étaient circulaires. Les distances des planètes sont supposées telles que les longueurs des orbites soient en rapports entiers simples entre elles, ce qui devait produire, selon la théorie des harmonies des pythagoriciens, des sons harmonieux. C'est l'harmonie des sphères. On peut lire dans *l'histoire naturelle* de Pline que, selon les pythagoriciens, l'intervalle musical est d'un ton entre la Terre et la Lune, d'un demi-ton entre Mercure et Vénus, d'une tierce mineure entre Vénus et le Soleil, d'un ton du Soleil à Mars, d'un demi-ton de Mars à Jupiter, d'un demi-ton de Jupiter à Saturne et d'une tierce mineure de Saturne à la sphère des étoiles. Bien sûr, personne n'entend cette musique céleste. On prétendait que seul le maître Pythagore parvenait à l'entendre.

Ce modèle, élaboré au 6<sup>e</sup> siècle av. J.-C., fut repris par de nombreux philosophes jusqu'à Aristote (384 -322 av. J.-C.), parfois avec quelques variantes.

## Un modèle qui prône la perfection

Les pythagoriciens ont une fixation sur la perfection et cela transparait dans le modèle. Pour eux, les orbites doivent être des cercles parfaits et les astres doivent se déplacer à vitesse constante sur l'orbite. De plus, l'univers doit être immuable, ce qui signifie qu'on ne devrait pas observer de changements.

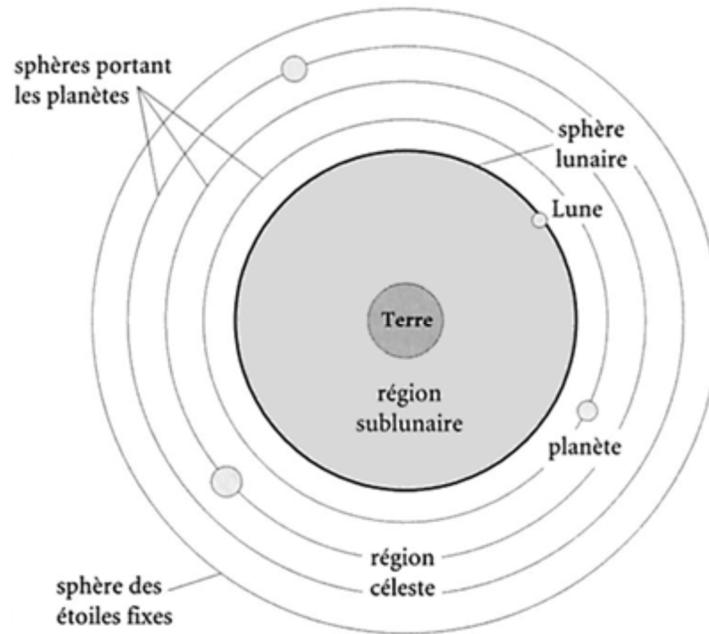
Ces idées fausses vont toutefois s'incruster dans tous les modèles développés en Occident et il faudra 2000 ans pour s'en débarrasser !

## Pourquoi la Terre doit-elle être immobile au centre ?

On a vu qu'avec une physique qui associe la force à la vitesse, on arrive à la conclusion que les objets ne tomberaient pas directement au sol et qu'il y aurait un vent continu si la Terre se déplaçait. Comme on ne voit pas de tels effets, la Terre devait sûrement être immobile.

## Les cieux et la région sublunaire

Dans l'univers d'Aristote, le monde est séparé en deux régions bien distinctes : la région sublunaire et la région céleste (aussi appelé *les cieux*). La frontière entre ces régions est l'orbite de la Lune.



Y. Gingras, P Keating, C. Limoges, Du scribe au savant, Éditions du boréal, 1998

Dans ce modèle, les planètes sont fixées à des sphères de cristal emboîtées les unes dans les autres. C'est donc la sphère lunaire, sur laquelle était fixée la Lune, qui séparait les cieux du monde sublunaire.

### Les cieux

Les cieux sont la région où tout devait être parfait et immuable. Les sphères sur lesquelles sont fixées les planètes sont des sphères parfaites se déplaçant à vitesse constante. Les planètes doivent aussi être des sphères parfaites.

Notez que les sphères sur lesquelles sont fixées la Lune, Mercure, Vénus, le Soleil, Mars, Jupiter, Saturne et les étoiles séparent cette région en 7 sous-régions appelées les 7 cieux (d'où l'expression 7<sup>e</sup> ciel).

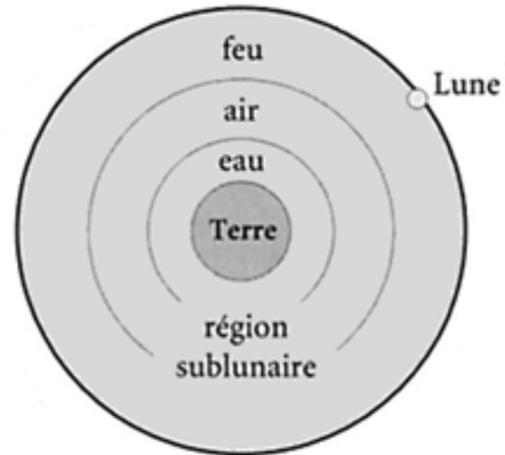
Pour les Grecs, il doit y avoir une force qui fait tourner les sphères sur lesquelles sont fixées les planètes et les étoiles. Généralement, on fait appel aux dieux pour appliquer ces forces. Plus tard, lors que le christianisme devint dominant, on attribue cette force à Dieu ou aux anges.

### Le monde sublunaire

Nous habitons la surface de la Terre, qui se retrouve dans la région sublunaire. Puisque nous nous y trouvons, cette région n'est pas parfaite. De plus, il peut y avoir des changements dans cette région.

C'est dans cette région que nous retrouvons les quatre éléments de la Grèce antique : la terre, l'eau, l'air et le feu. Chacun de ces éléments a sa place naturelle dans le monde sublunaire. L'élément terre est l'élément dont la place naturelle est au centre de l'univers. Viennent ensuite l'eau, l'air et le feu.

Si on déplace un élément, il veut retourner à sa place naturelle. Si on place un caillou, essentiellement composé de terre pour les Grecs, dans l'air ou dans l'eau, il va vers le centre de l'univers, qui est sa place naturelle. Une bulle d'air dans l'eau monte, parce que la place naturelle de l'air est au-dessus de l'eau. Le feu dans l'air monte, parce que la place naturelle du feu est au-dessus de l'air.



Les cieux sont composés d'un cinquième élément, appelé *éther*.

#### Deux visions du monde, deux façons d'observer

Ce modèle, avec les perfectionnements qui suivront, domine le monde occidental pendant près de 2000 ans. Le dogme de la perfection et de l'immutabilité des cieux a cependant eu des conséquences sur la façon d'observer le ciel. En effet, dès qu'on observe un changement dans le ciel, on considère qu'il devait s'agir de quelque chose qui se produit dans la région sublunaire. Une nouvelle comète ne peut pas être dans la région céleste, car il ne peut pas y avoir de changement dans cette région de l'univers selon eux. Les comètes, les novae et les supernovae doivent donc être nécessairement de phénomènes se produisant dans la région sublunaire, donc tout près de la Terre. Quand on a cette façon de voir les choses, ces événements ont pratiquement la même importance qu'un nuage, ce qui fait qu'on ne les note pas toujours. Plusieurs supernovae et comètes visibles avant 1500, pourtant spectaculaires, ne sont pas mentionnées dans les textes européens.

À la même époque, la situation est diamétralement opposée en Chine. Les Chinois considèrent alors que l'univers tout entier était un peu comme un vaste organisme et que tout événement sortant de l'ordinaire peut être un symptôme d'un dérèglement de cet organisme. Pour eux, il était possible qu'un tremblement de terre soit causé par de mauvaises décisions de l'empereur qui ont entraîné un dérèglement de l'univers. Les Chinois notent donc tout événement pouvant indiquer un tel dérèglement. Plus l'empereur est détesté, plus on note avec minutie les dérèglements que ses décisions amènent. Une quantité phénoménale de comètes et de phénomènes astronomiques se retrouvent donc dans les annales chinoises. En fait, ils ne notent pas que les phénomènes astronomiques. Ils notent absolument tout ce qui sort de l'ordinaire, comme des phénomènes météorologiques inhabituels.

## La nature des planètes

La plupart des premiers philosophes pensent que les objets célestes sont constitués de feu et sont de nature divine. C'est Anaxagore (510-428 av. J.-C.) qui arrive le premier à une solution différente. Selon lui, les planètes et le Soleil sont formés simplement de terre. Dans sa théorie, l'univers est au départ immobile et uniforme. Soudainement, un ou plusieurs tourbillons forment un ou plusieurs mondes. Au centre de chaque tourbillon, il s'accumule les éléments denses et froids, c'est-à-dire la terre, en forme de disque plat. (Il n'accepte donc pas l'idée pythagoricienne d'une Terre sphérique.) Mais le tourbillon arrache des parcelles de terre au disque plat qui forment alors les planètes. Le Soleil est également formé de terre, mais brille parce qu'il est chauffé par la friction, dont l'origine n'est pas claire. Cette idée permet alors d'expliquer correctement certains phénomènes. La Lune n'étant qu'un morceau de terre, elle n'est pas brillante par elle-même et elle ne fait que refléter la lumière du Soleil. Seul le côté de la Lune tourné vers le Soleil peut être éclairé, ce qui fait qu'il y a alors un côté de la Lune brillant et un côté sombre. Ceci explique correctement les phases de la Lune, qui changent selon l'orientation de la partie éclairée par rapport à la Terre. Cette idée d'astres composés de roches permet aussi de comprendre correctement les éclipses. La Lune étant composée de roche, elle peut cacher le Soleil en passant devant ce dernier.

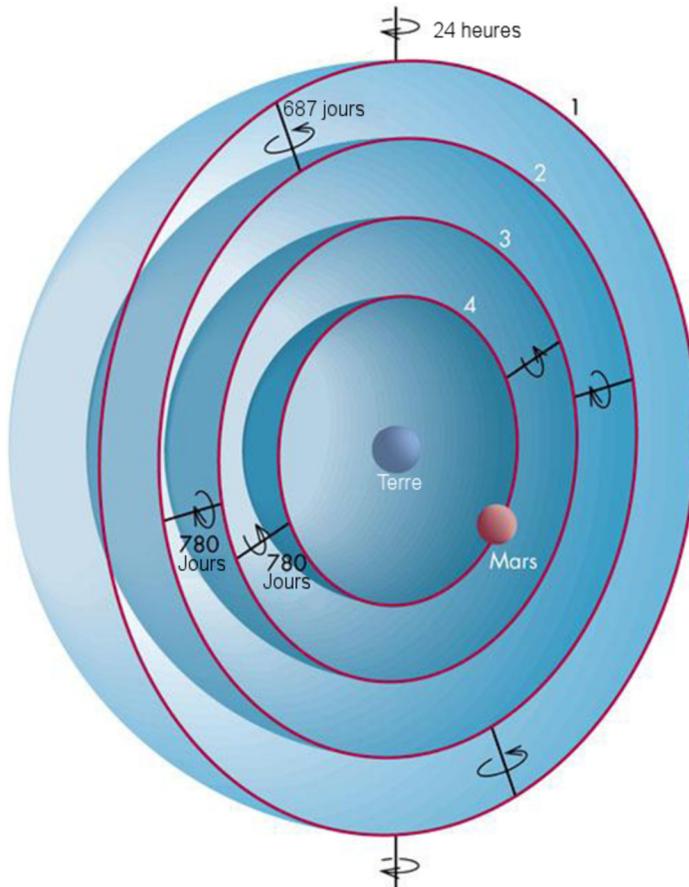
C'est ce rejet de la nature divine des objets célestes qui vaut à Anaxagore d'être accusé d'impiété à Athènes. Même si Périclès, son ancien élève, témoigne en sa faveur à son procès, il est expulsé d'Athènes. L'idée de planètes rocheuse fait cependant son chemin lentement.

## Un modèle qui n'est pas en accord avec les observations

Le modèle d'Aristote est bien élégant, mais il n'est pas en accord avec les observations. Si les planètes tournaient autour de la Terre à vitesse constante sur des orbites parfaitement circulaires, alors les planètes devraient se déplacer de façon régulière par rapport aux étoiles. Chaque jour, une planète se déplacerait toujours du même angle dans le ciel. Or, ce n'est pas ce qui se passe en réalité. On a vu que Mercure et Vénus oscillent de chaque côté du Soleil, que Mars, Jupiter et Saturne font parfois des mouvements en sens inverse sur l'écliptique (le mouvement rétrograde) et que toutes les planètes, ce qui inclut la Lune et le Soleil pour les Grecs, vont moins vite dans certaines régions de l'écliptique que d'autres (la préférence zodiacale). Tout cela ne devrait pas se produire selon le modèle géocentrique simple. Ce désaccord entre le modèle et les observations rend certains philosophes inconfortables. Comment peut-on modifier le modèle pour qu'il soit en accord avec les observations, tout en gardant le dogme de la perfection et de l'immutabilité des cieux ? Selon Platon, il fallait sauver les apparences.

## Les sphères homocentriques

Eudoxe (406 – 355 av. J.-C.), un des élèves de Platon, propose une solution qui pourrait expliquer le mouvement des planètes tout en préservant les sphères parfaites et les vitesses constantes. Ce sont les sphères homocentriques.



[www.ezizka.net/astronomy/lessons/topicslesson03/topic01esson03.htm](http://www.ezizka.net/astronomy/lessons/topicslesson03/topic01esson03.htm)

Prenons l'exemple de Mars, pour expliquer le principe. Mars serait fixée sur une sphère de cristal (sphère 4 sur la figure) qui est à son tour emboîtée à l'intérieur de 3 autres sphères. En faisant tourner chacune de ces sphères parfaites à vitesse constante avec des axes et des périodes différentes, on obtiendrait un mouvement de Mars assez complexe, tout en respectant le dogme de la perfection des cieux.

Dans le modèle d'Eudoxe, il y a 27 sphères de cristal en tout (3 pour le Soleil, 3 pour la Lune et 4 pour chacune des autres planètes et 1 pour la sphère des étoiles). Aristote augmente encore plus le nombre de sphères en faisant remarquer qu'on devait éliminer le mouvement complexe de la planète plus lointaine avant de mettre les sphères de la planète plus près. Par exemple, il faut

4 sphères de cristal pour donner à Saturne un mouvement assez complexe. Mais avant d'emboîter à l'intérieur de la sphère de Saturne les 4 sphères de Jupiter, il faut 4 autres sphères pour éliminer le mouvement complexe de la sphère de Saturne. On appelle ces sphères des *sphères compensatrices*. On a donc 4 sphères pour donner un mouvement complexe à la sphère de Saturne, 4 sphères compensatrices pour éliminer ce mouvement complexe, 4 sphères pour donner un mouvement complexe à la sphère de Jupiter, 4 sphères compensatrices pour éliminer ce mouvement complexe, 4 sphères pour donner un mouvement complexe à Mars, 4 sphères compensatrices pour éliminer ce mouvement complexe et ainsi de suite jusqu'à ce qu'on arrive à la sphère de la Lune. Ainsi, dans le modèle d'Aristote, il y a 56 sphères de cristal emboîtées les unes dans les autres et ayant toutes des axes de rotation et des périodes de rotation différentes.

Ce système est loin d'être satisfaisant. En fait, ils ne parviennent jamais à faire véritablement fonctionner ce modèle. Les sphères homocentriques font faire un

mouvement rétrograde très approximatif aux planètes et l'accord entre les positions des planètes obtenues avec ce modèle et les observations n'est pas très bon, spécialement dans les cas de Mars et de Vénus. De plus, le modèle explique mal les variations de luminosité des planètes puisqu'elles devraient toujours être exactement à la même distance de la Terre dans ce modèle.

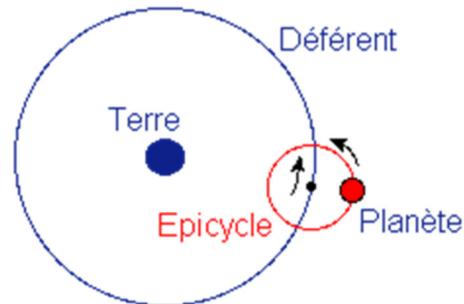
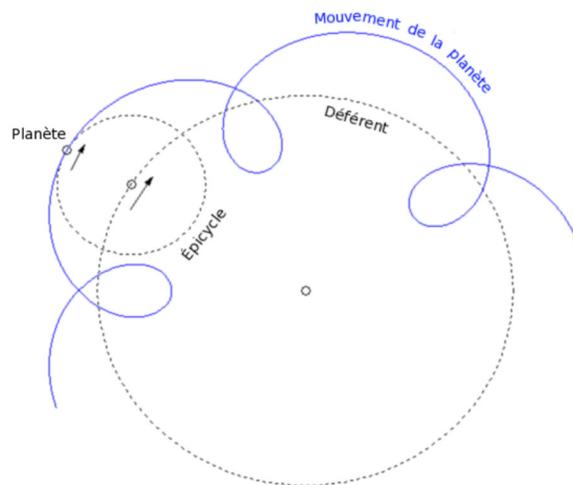
## E1.3 LE MODÈLE DE PTOLÉMÉE

Un peu plus tard, une autre solution est proposée pour expliquer le mouvement des planètes autour de la Terre tout en gardant la Terre immobile au centre de l'univers et en respectant le dogme de la perfection des cieux. Dans ce modèle, il n'y a plus de sphères de cristal. On utilise maintenant les épicycles pour expliquer le mouvement rétrograde et l'excentrique et l'équant pour expliquer la préférence zodiacale. Ces idées sont proposées pour la première fois par Apollonios de Perga (262-190 av. J.-C.) et Hipparque utilise ce modèle pour prévoir assez précisément les mouvements du Soleil et de la Lune. On connaît surtout ce modèle par l'intermédiaire du livre de Ptolémée écrit au 2<sup>e</sup> siècle apr. J.-C. (aux environs de l'an 150).

### Les épicycles

Au lieu de simplement faire tourner la planète autour de la Terre, la planète se déplace maintenant à vitesse constante le long d'un cercle (appelé *épicycle*) dont le centre tourne autour de la Terre en suivant une orbite circulaire (appelé *déférent*).

En combinant les deux mouvements circulaires, on obtient la trajectoire suivante pour la planète autour de la Terre.



[csep10.phys.utk.edu/astr161/lect/retrograde/aristotle.html](http://csep10.phys.utk.edu/astr161/lect/retrograde/aristotle.html)

On constate que la combinaison de ces deux mouvements donne l'impression, vu de la Terre (au centre), que la planète se déplace dans le sens rétrograde quand la planète fait les petites boucles.

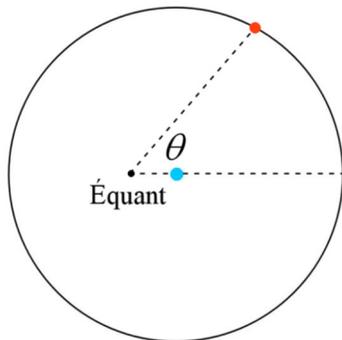
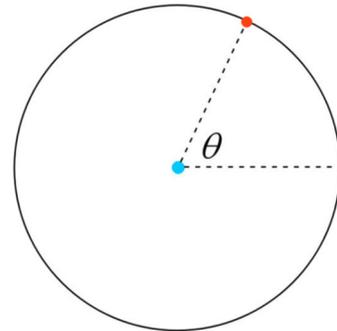
On pouvait donc expliquer le mouvement rétrograde en combinant des cercles parfaits.

[commons.wikimedia.org/wiki/File:Epicycle\\_et\\_deferent.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Epicycle_et_deferent.png)

## Les équants et les excentriques

Même avec les épicycles, il y a toujours un désaccord entre les prévisions du modèle et les observations. Pour arriver à une précision raisonnable, il faut que la vitesse de déplacement de l'épicycle sur le déférent ne soit pas constante. C'est un peu embêtant quand on croit fermement qu'elle doit être constante pour des raisons philosophiques.

On commence par transformer le principe de vitesse constante en principe d'augmentation de l'angle à un rythme constant. L'angle  $\theta$  qui donne la position de la planète (figure de droite) doit donc augmenter à un rythme constant. Autrement dit, on travaille maintenant avec la vitesse angulaire. (Sur la figure, le point rouge n'est pas la planète, mais plutôt le centre de l'épicycle de la planète.)

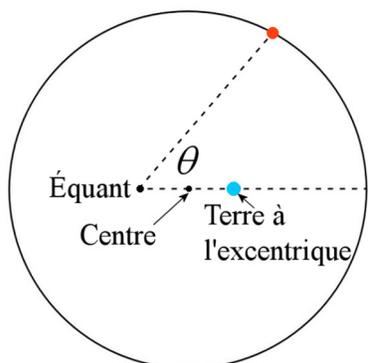
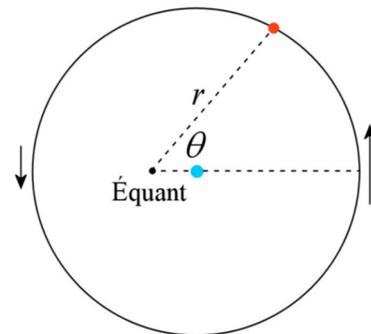


On sauve maintenant le principe en déplaçant le point à partir duquel on mesure l'angle. L'angle augmente toujours à rythme constant, mais il n'est plus mesuré à partir du centre du cercle. Le point à partir duquel on mesure l'angle s'appelle l'équant.

Avec ce subterfuge, le centre de l'épicycle va plus vite à certains endroits que d'autres. Sur la figure, le centre de l'épicycle va plus vite à droite de l'orbite qu'à gauche, parce qu'elle est plus loin de l'équant quand elle est en bas. On se rappelle que selon cette équation du mouvement circulaire,

$$v = \omega r$$

on va plus vite quand on est plus loin de l'axe de rotation si la vitesse angulaire est toujours la même (figure de droite).



Même en déplaçant ainsi le point à partir duquel on mesure l'angle, il y a toujours un désaccord avec les observations. Pour obtenir un accord, il faut déplacer la Terre pour qu'elle ne soit pas au centre de l'orbite circulaire. En fait, on doit la déplacer du côté opposé à l'équant de la même distance que celle qu'il y a entre le centre du cercle et l'équant. Cette position de la Terre s'appelle l'excentrique.

Comme la Terre n'est pas au centre du déférent, la variation de vitesse sera encore plus amplifiée par la

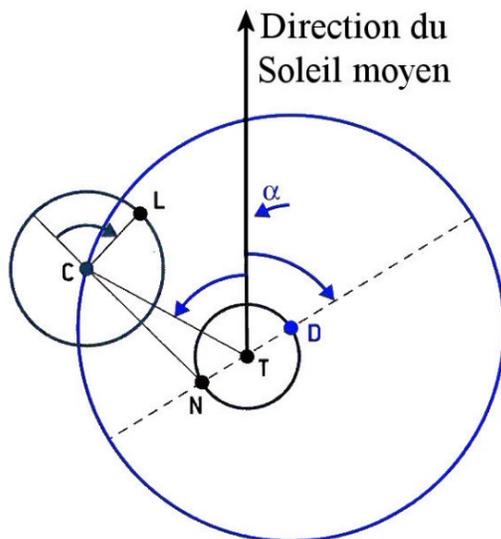
position de l'observateur. Plus on regarde un objet qui est loin, plus sa position angulaire change lentement si l'objet se déplace. Ainsi, quand la planète est dans la partie de droite du déférent, elle changera rapidement de direction parce qu'on l'observe à partir d'une position plus près que le centre du déférent (et aussi parce qu'elle va plus vite dans cette partie de l'orbite). Quand la planète est dans la partie de gauche du déférent, elle changera lentement de direction parce qu'on l'observe à partir d'une position plus éloignée que le centre du déférent (et aussi parce qu'elle va moins vite dans cette partie de l'orbite).

L'équant et l'excentrique permettent ainsi d'expliquer la préférence zodiacale. La planète change moins rapidement de direction par rapport aux étoiles sur une moitié de son orbite que dans l'autre. On préserve toutefois le dogme de perfection des cieux, car on a toujours des cercles parfaits et des vitesses constantes, bien que ce soit maintenant des vitesses angulaires.

## La Lune

L'orbite de la Lune est fortement perturbée par le Soleil et le mouvement de la Lune autour de la Terre n'est pas facile à décrire (l'orbite de la Lune donna sûrement des maux de tête à Newton qui y travailla, sans véritable succès, pendant des années).

Dans le cas de la Lune, on obtient de meilleures prévisions si le centre du déférent de la Lune (point D) tourne autour de la Terre et la vitesse angulaire de déplacement de l'épicycle est constante à partir du point N qui tourne lui aussi autour de la Terre (en restant toujours opposé au point D).

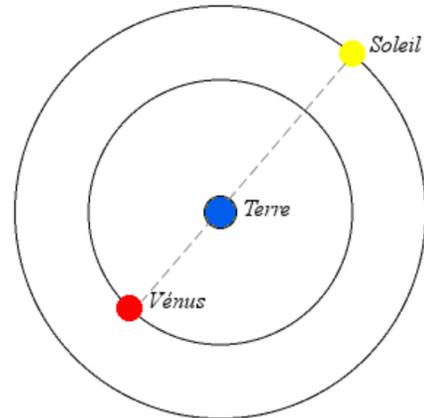


Le rayon du cercle sur lequel se déplacent les points D et N avait un rayon de 10,32 rayons terrestres. Le déférent avait un rayon de 49,68 rayons terrestres et l'épicycle avait un rayon de 5,25 rayons terrestres. Ainsi, la distance de la Lune pouvait varier entre 34,11 rayons terrestres et 65,25 rayons terrestres. De tels changements de distance ne pourraient passer inaperçus puisqu'au plus près, la Lune semblerait pratiquement 2 fois plus grosse que quand elle est à sa position la plus loin.

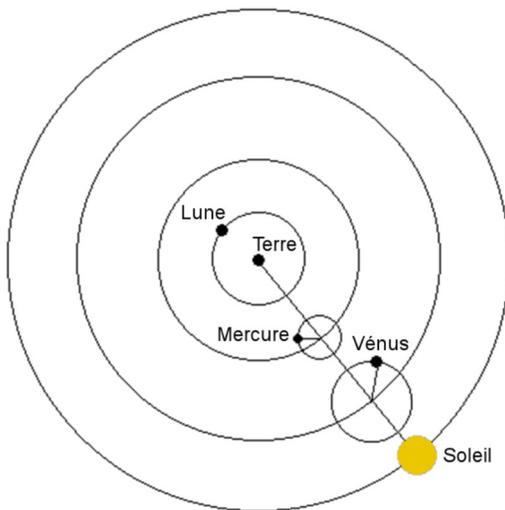
Yaël Nazé, *Astronomie du passé*, Éditions Belin, 2018

## Mercure et Vénus

Dans un système géocentrique, rien n'empêche Vénus et Mercure de faire n'importe quelle configuration avec le Soleil. L'angle entre ces planètes et le Soleil pourrait prendre n'importe quelle valeur. Vénus pourrait bien être d'un côté de la Terre alors que le Soleil pourrait être de l'autre côté et on aurait alors une opposition entre Vénus et le Soleil, telle qu'illustrée sur la figure. Or, Vénus reste toujours à moins de  $46^\circ$  du Soleil.



[numiano.free.fr/Fcosmo/cg\\_histoire.html](http://numiano.free.fr/Fcosmo/cg_histoire.html)



Pour expliquer pourquoi Vénus et Mercure ne s'éloignent jamais du Soleil, Ptolémée ajoute la règle suivante : Le Soleil et le centre des épicycles de Vénus et de Mercure sont toujours alignés vu de la Terre.

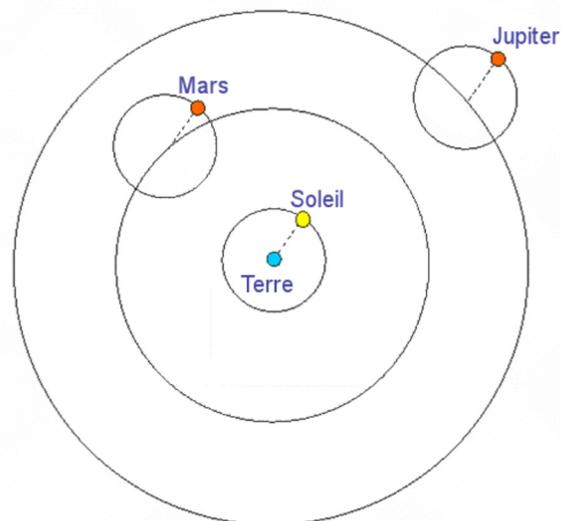
Ainsi, l'angle entre Vénus (ou Mercure) et le Soleil ne peut jamais être bien grand. Il n'y a pas de justification théorique à cela. On fait cela uniquement parce que c'est ce qu'il faut faire pour être en accord avec les observations.

Notez que l'ordre de Mercure, de Vénus et du Soleil n'est toujours pas déterminé dans ce système. Vénus et Mercure pourraient tout aussi bien être plus loin de la Terre que le Soleil. On pourrait aussi avoir une des planètes plus près de la Terre que le Soleil et l'autre planète plus loin que le Soleil.

## Mars, Jupiter et Saturne

Ces trois planètes font des mouvements rétrogrades se produisant uniquement quand la planète est en opposition. Pour que cela arrive, le mouvement de la planète sur l'épicycle doit être synchronisé avec le mouvement du Soleil autour de la Terre. La figure de droite montre ce que cela veut dire.

On remarque que les lignes allant du centre de l'épicycle à la planète sont parallèles à la ligne allant de la Terre au



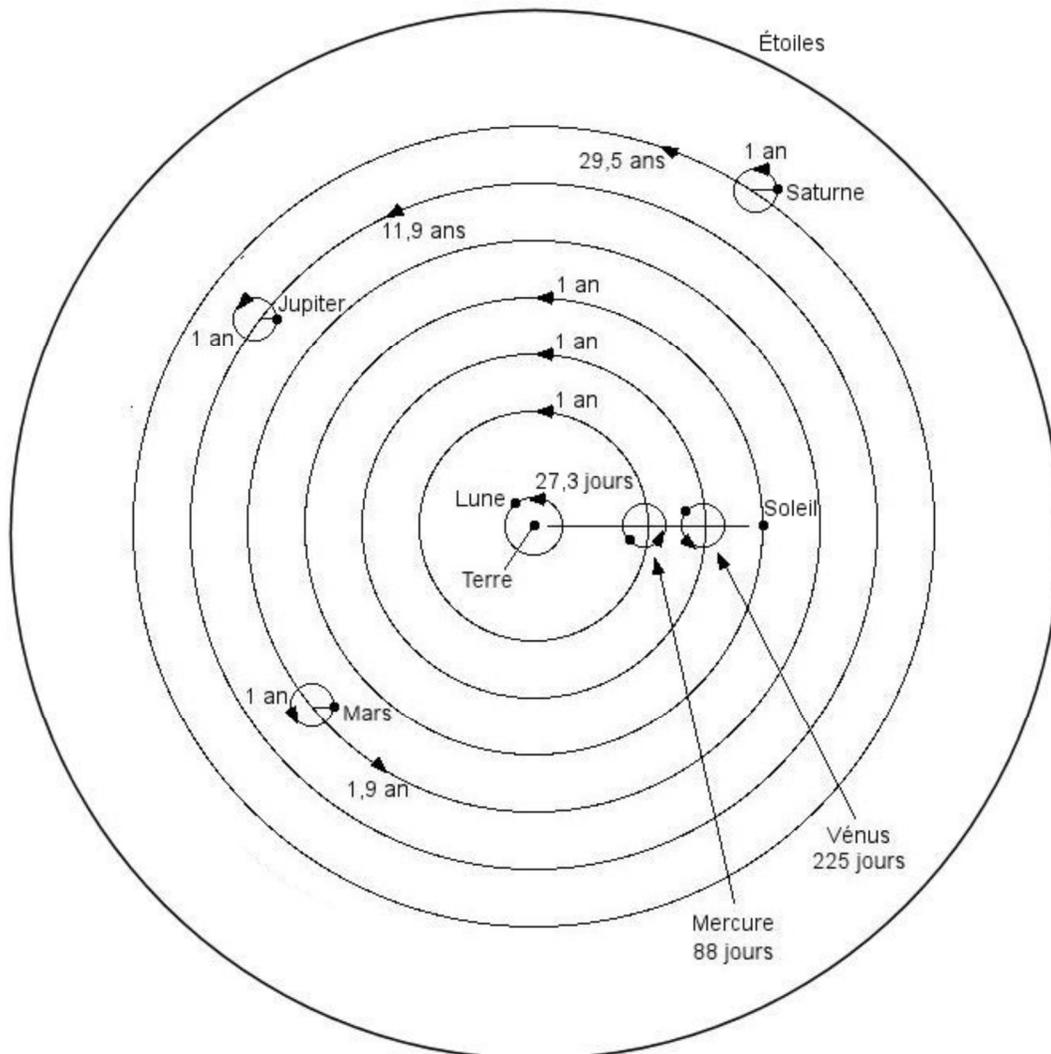
[galileoandeinstein.physics.virginia.edu/lectures/greek\\_astro.htm](http://galileoandeinstein.physics.virginia.edu/lectures/greek_astro.htm)

Soleil. (Autrement dit, les trois lignes en pointillés sur la figure devaient toujours être parallèles.) Cela signifie que ces 3 planètes faisaient toutes le tour de leur épicycle en exactement 1 an.

Encore une fois, il n'y a pas de justification théorique à cela. Les lignes sont parallèles uniquement parce que c'est ce qu'on doit avoir pour que les mouvements rétrogrades se produisent au bon moment.

## Le modèle dans son ensemble

L'image suivante, résume assez bien le modèle de Ptolémée, sauf en ce qui concerne les excentriques et les équants. Sur la figure, on donne aussi la période de révolution des planètes sur l'épicycle et des épicycles sur le déférent.

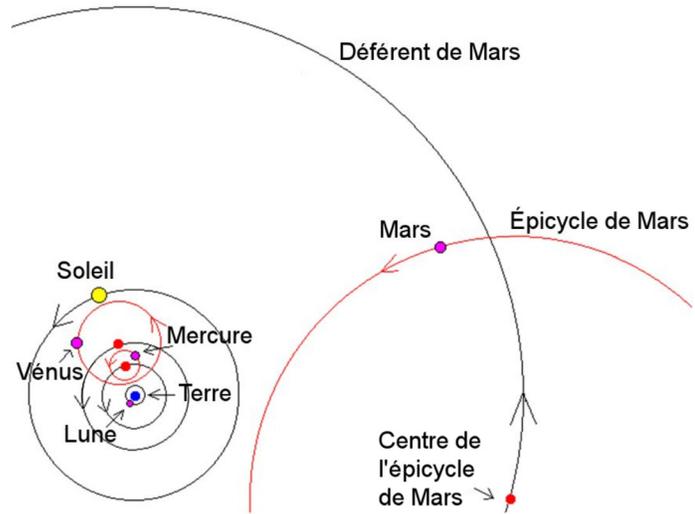


[home.nordnet.fr/~ajuhel/Obs\\_Samarkand/monum.html](http://home.nordnet.fr/~ajuhel/Obs_Samarkand/monum.html)

Les périodes données sont celles par rapport aux étoiles. Il faut ajouter à ce mouvement une rotation de tout l'univers en 24 heures autour de la Terre dans le sens des aiguilles d'une montre.

Sur cette version, les épicycles et les déférents ne sont pas à l'échelle. L'image de droite montre une partie du système de Ptolémée si on trace les épicycles et les déférents avec les bonnes proportions.

Ceci n'est qu'une des solutions possibles. Par exemple, on pourrait éloigner Mars de la Terre en grandissant son épicycle, et ce serait tout aussi bien.

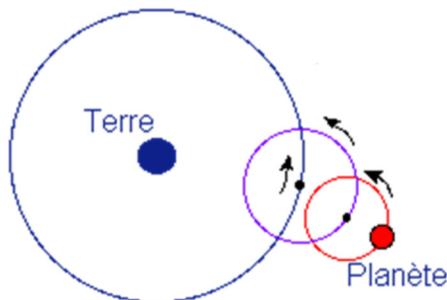


[zebu.uoregon.edu/~soper/Orbits/ptolemy.html](http://zebu.uoregon.edu/~soper/Orbits/ptolemy.html)

Notez qu'on n'a aucune idée des distances réelles des planètes dans ce système, sauf pour la distance de la Lune et du Soleil (quoique cette dernière était bien loin de la véritable distance). Il n'y a d'ailleurs aucune façon de déterminer les distances dans ce système. Certains ont estimé que la sphère des étoiles devait se situer approximativement à 10 000 fois le diamètre de la Terre, ce qui donne une distance inférieure à une unité astronomique.

## Un léger manque de précision

Même avec tous ces ajouts, le modèle de Ptolémée n'arrive pas à reproduire le mouvement exact des planètes dans le ciel. On peut arriver à davantage de précision en ajoutant des épicycles. On emboîte les épicycles tels qu'illustrés sur la figure.



[csep10.phys.utk.edu/astr161/lect/retrograde/aristotle.html](http://csep10.phys.utk.edu/astr161/lect/retrograde/aristotle.html)

La planète tourne sur l'épicycle, dont le centre tourne sur un autre épicycle, dont le centre tourne autour de la Terre sur un déférent. Ici, on n'a emboîté que deux épicycles, mais on pourrait en emboîter beaucoup plus.

En emboîtant ainsi les épicycles, on arrive à des positions des planètes relativement précises. L'écart maximal entre le calcul de la position par ce modèle et la prévision théorique est d'environ  $2/3^\circ$ , ce qui représente quand même presque la largeur de la Lune vue de la Terre. C'était toutefois très satisfaisant à l'époque.

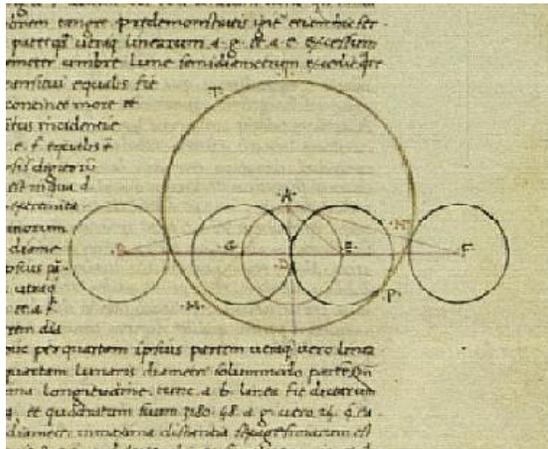
## Un modèle dominant pendant 15 siècles

Le modèle de Ptolémée domine pendant près de 15 siècles. Plusieurs considèrent même que le texte de Ptolémée est un des textes les plus influents de l'Histoire. Voyons comment il a survécu pendant toutes ces années.

Le modèle est conçu à Alexandrie, alors située dans l'Empire romain. Les beaux jours de la science grecque arrivent cependant à leur fin à cette époque. Une montée du mysticisme détourne l'attention des gens de la science et les érudits commencent à s'intéresser davantage à la théologie qu'à la science. Toutefois, les textes de la science grecque survivent dans les bibliothèques.

La chute de l'Empire romain d'occident en 476 ne mène pas vraiment à la destruction de textes scientifiques. La grande majorité des textes se trouvent dans la partie orientale de l'empire, qui va survivre encore bien longtemps sous le nom d'*Empire byzantin*.

La conquête arabe, qui commence au 7<sup>e</sup> siècle, touche davantage la partie orientale de l'empire. Épuisés par une série de guerres qu'ils se livrent mutuellement, l'Empire byzantin et l'Empire perse ne peuvent résister aux attaques des musulmans. L'Empire perse s'écroule complètement alors que l'Empire byzantin perd une bonne partie de son territoire (il ne restait, en gros, que la Turquie et la Grèce actuelles). Or, plusieurs bibliothèques,



[fr.wikipedia.org/wiki/Almagest](http://fr.wikipedia.org/wiki/Almagest)

dont celle d'Alexandrie, sont situées dans les territoires perdus. Les Arabes découvrent alors les textes grecs, ce qui mène au déclenchement d'une période très fertile pour la science arabe. En fait, la science arabe est bien en avance sur la science de l'Europe médiévale pendant quelques siècles à partir du 8<sup>e</sup> siècle. Parmi les textes traduits en arabe, on retrouve l'œuvre de Ptolémée, qui est traduite en 827. Le livre traduit prend alors le nom d'*Almagest* en arabe, ce qui signifie *la plus grande*. L'*Almagest* est diffusé partout dans l'empire musulman, qui couvre alors, en gros, tout le Moyen-Orient, l'Iran, l'Afrique du Nord et l'Espagne.

Pendant ce temps, on ne peut pas dire que la science connaît des heures de gloire en Europe. En fait, elle ne fut jamais très importante dans la partie occidentale de l'Empire romain et la situation ne s'améliore pas avec la chute de l'empire. Seulement quelques textes grecs sont préservés en occident, en bonne partie dans des monastères irlandais. La situation commence à changer vers 1100. La reconquête de l'Espagne par les chrétiens les met en contact avec les textes grecs, traduits en arabe, qui se trouvent dans les bibliothèques espagnoles, notamment à Tolède. Ce n'est pas encore un courant très fort, mais les textes découverts stimulent l'intérêt scientifique des Européens. Assez rapidement, on tombe sur l'*Almagest*, qui sera traduit de l'arabe en 1175. Dès lors, le modèle de Ptolémée devient

le modèle de l'univers privilégié en Europe (du moins, pour les quelques érudits européens). Les théologiens vont même jusqu'à l'intégrer dans les dogmes de l'Église catholique. On améliore la traduction au 15<sup>e</sup> siècle quand on utilise la version originale en grecque du texte. (En fait, la version originale grecque avait déjà été traduite pour la première fois en 1160, donc avant la version arabe, mais elle resta longtemps moins populaire que la version traduite de l'arabe.)

Notons que les observations de cette fin du Moyen-Âge sont loin d'être précises par rapport à celles des époques précédentes. Seuls les musulmans de Samarkand (dans l'actuel Ouzbékistan) parviennent à faire mieux que les Grecs, mais leurs résultats demeurèrent inconnus en Europe. Il faut attendre les observations de Tycho Brahe (1546-1601) pour que les mesures européennes deviennent plus précises que celles faites par les Grecs et les Musulmans.

Tous acceptent le modèle de Ptolémée, jusqu'à ce qu'un chanoine polonais propose une autre solution en 1543.

## E1.4 LE MODÈLE DE COPERNIC

### Les premières critiques du modèle de Ptolémée

Nikolaus Krebs (Nicolaus Cusanus en latin, Nicolas de Cues en français, 1401-1464) s'attaque au modèle de Ptolémée en argumentant que l'univers ne peut être limité par une sphère des étoiles. Comme il est toujours possible d'imaginer quelque chose à l'extérieur de cette sphère, ce qui est à l'intérieur de la sphère des étoiles ne représente pas l'ensemble de l'univers. L'univers ne pouvant être limité, il est donc un espace infini dans lequel il pourrait y avoir d'autres planètes habitées. Puisqu'il n'y a pas de centre dans un univers infini, le modèle de Ptolémée ne peut être totalement vrai, spécialement en ce qui concerne les lieux privilégiés des 4 éléments qui forment des couches à partir du centre de l'univers. L'Homme s' imagine au centre de l'univers comme il le ferait si la Terre était n'importe où dans le cosmos. De plus, la Terre peut être en mouvement dans cet univers puisque dans un univers infini, il n'y a aucune différence entre l'état de repos et le mouvement. Normalement, le mouvement d'une planète se définit par son mouvement relatif par rapport au bord de l'univers. Mais si l'univers est infini, il n'y a pas de bord, donc pas de référence pour déterminer la vitesse. Ainsi, on ne peut savoir si on est en mouvement ou au repos. De Cues n'exclut donc pas l'idée que la Terre puisse se déplacer sans que cela paraisse, ce que ne permet pas la physique d'Aristote. Sa philosophie est très influente à son époque. Notons que l'idée qu'il puisse exister plusieurs autres mondes habités n'était pas nouvelle. Aristote affirme qu'il peut exister d'autres mondes et cette thèse est ensuite défendue, entre autres, par Michel Scot (1230), Guillaume d'Ockham (14<sup>e</sup> siècle) et Johannes Majoris (fin du 15<sup>e</sup> siècle). Ce dernier va même jusqu'à affirmer qu'il y a une infinité de mondes habités.

D'autres critiques s'en prennent également à Ptolémée et proposent de revenir au modèle des sphères homocentriques qui venait d'être ramené à l'avant-scène par l'intérêt des

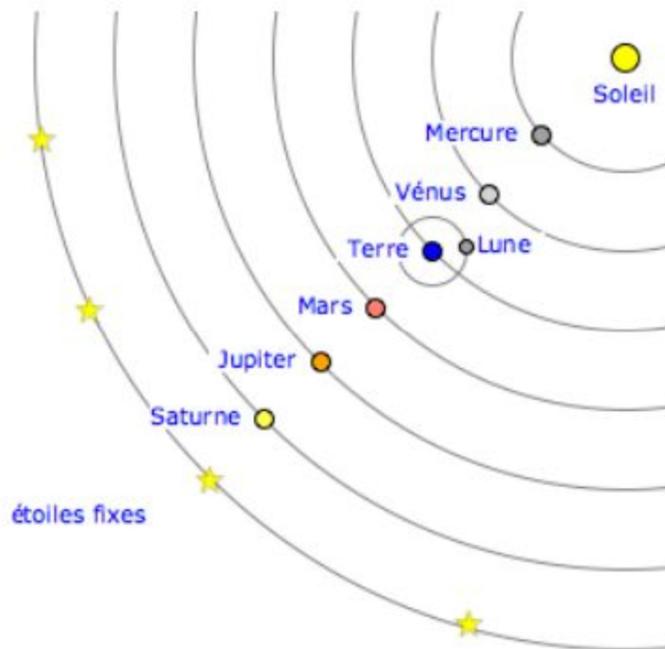
humanistes pour Platon. Frascatoro Aminci propose un modèle avec 77 sphères de cristal dont une est inégalement transparente pour expliquer les variations d'éclat des planètes, ce qui corrigeait le principal défaut du modèle des sphères homocentriques.

## Le modèle héliocentrique de Copernic

Une alternative au système de Ptolémée est faite par Nicolaj Kopernik (Nicolas Copernic en français, 1473-1543). Copernic étudie à la très réputée université de Cracovie, pour ensuite aller étudier la médecine à Padoue et le droit à Bologne (1495-1505). À cette époque, on ne peut pas obtenir de diplôme en astronomie ou en mathématiques. Ces matières sont enseignées à l'université, mais pour les étudiants désirant obtenir un diplôme dans d'autres domaines. Ainsi, l'astronomie est enseignée par la faculté de médecine puisque l'astrologie joue un rôle important dans la pratique médicale à cette époque. Si on veut se perfectionner en astronomie, on doit suivre des cours particuliers ou encore s'instruire soi-même en se procurant des livres sur le sujet, ce qui est plus facile depuis l'invention de l'imprimerie (1454). Il ne faut donc pas s'étonner que ceux qui s'intéressent à l'astronomie à l'époque aient une formation universitaire dans un autre domaine. Après ses études en Italie, Copernic devient chanoine de Frauenbourg (aujourd'hui Frombork en Pologne) jusqu'à sa mort, poste qui consiste à assister l'évêque dans ses fonctions. Cette tâche ne l'empêche pas de se livrer à sa passion, l'astronomie, et de lire tout ce qu'il peut trouver sur ce sujet.

Il mentionne son nouveau modèle pour la première fois en 1515, et le traité complet présentant la théorie sera publié en 1543, l'année de sa mort.

Copernic n'aime pas la complexité du système de Ptolémée. Après des années de réflexion, Copernic en vient à proposer un modèle héliocentrique, c'est-à-dire qu'il place le Soleil au centre de l'univers et la Terre qui tourne autour de celui-ci.



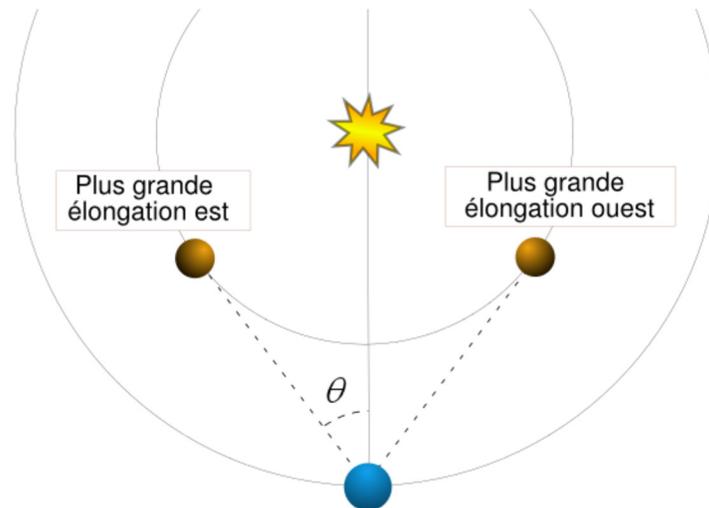
[media4.obspm.fr/public/AMC/pages\\_kepler/mctc-copernic.html](http://media4.obspm.fr/public/AMC/pages_kepler/mctc-copernic.html)

## Des arguments d'esthétisme et de simplicité

Il faut dire premièrement que le système de Copernic n'est pas plus précis que le système de Ptolémée pour prévoir la position des planètes. En fait, il donne exactement les mêmes prévisions que le système de Ptolémée. Copernic ne peut donc prétendre améliorer les prévisions pour justifier son modèle. Il le justifie plutôt en montrant l'esthétisme et la simplicité de son modèle.

### Premier argument : l'explication des élongations maximales de Mercure et Vénus

Le modèle explique assez naturellement pourquoi Mercure et Vénus ne sont jamais loin du Soleil. Comme elles tournent autour du Soleil sur des orbites plus petites que celles de la Terre, on ne peut jamais les voir bien loin du Soleil. La figure suivante montre le plus grand angle qu'il peut y avoir entre le Soleil et la planète vu de la Terre.



[fr.wikipedia.org/wiki/Élongation\\_\(astronomie\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Élongation_(astronomie))

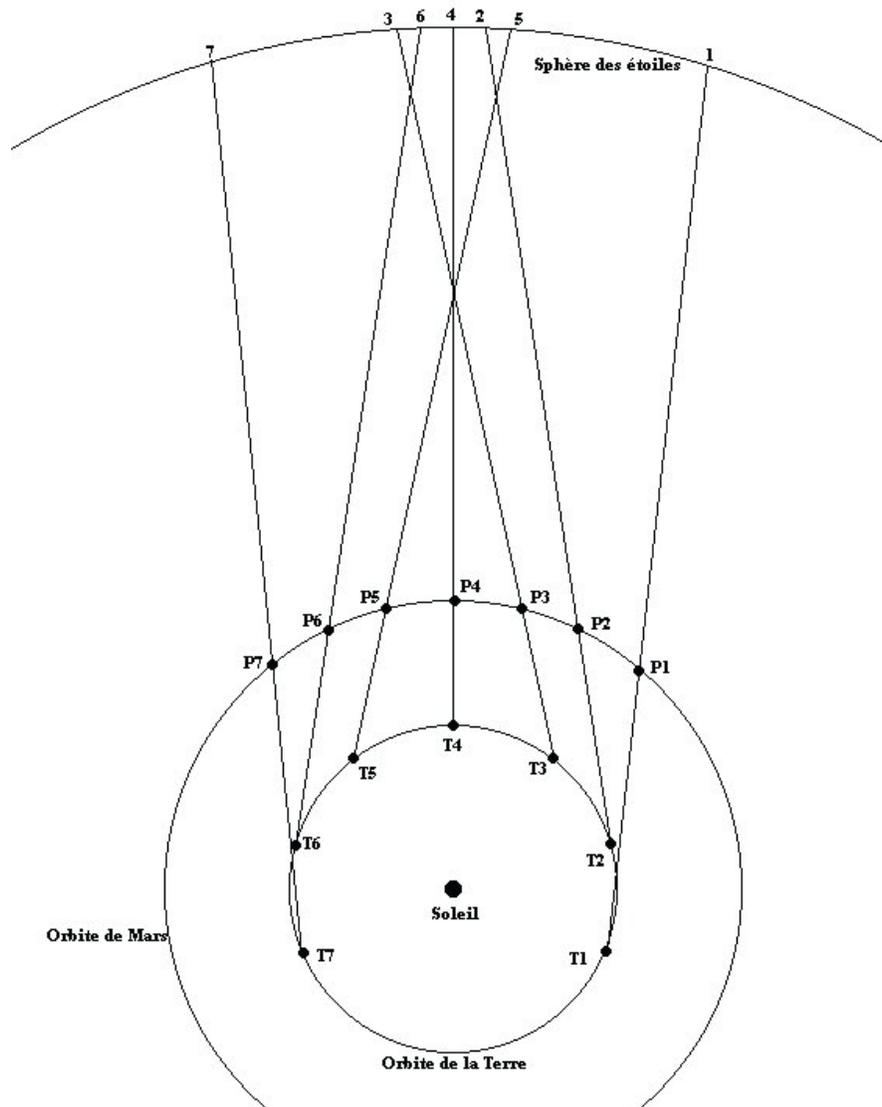
Par contre, les autres planètes étant sur des orbites plus grandes que celle de la Terre, elles peuvent aller passer derrière nous et se retrouver en opposition avec le Soleil.

Il n'est donc plus nécessaire de forcer les centres des épicycles à rester en ligne avec le Soleil sans aucune autre explication que de dire que c'est ça qu'il faut faire pour que ça marche. Mercure et Vénus restent près du Soleil dans le système de Copernic simplement parce que leurs orbites sont plus petites que celle de la Terre.

Cette idée est tellement simple que certains avaient déjà proposé, avant Copernic, cette modification au système de Ptolémée. Cette idée ne fut pas très populaire cependant pour des raisons philosophiques. Dans le système de Ptolémée, la Terre a une place spéciale dans l'univers, ce qui impliquait que tout devrait tourner autour de la Terre.

## Deuxième argument : l'explication des mouvements rétrogrades de Mars, Jupiter et Saturne

Le modèle héliocentrique explique d'une façon plus simple le mouvement rétrograde. On dirait même que la solution du problème est élégante. On se souvient que le mouvement rétrograde est un changement de direction qui se produit dans le mouvement des planètes par rapport au ciel étoilé. Dans le modèle de Ptolémée, on avait expliqué ce changement de direction en ajoutant des épicycles. Avec le modèle héliocentrique, il devient tout à fait inutile d'avoir recours aux épicycles puisque le mouvement rétrograde n'est dû qu'au mouvement de la Terre. Comme on peut le voir en suivant les points 1 à 7 sur la sphère des étoiles sur la figure, le changement apparent de direction se produit lorsque la Terre dépasse une autre planète. On a alors l'impression que cette planète change la direction de son mouvement alors qu'en réalité, elle a poursuivi sa route de façon régulière sur l'orbite. Le mouvement rétrograde ne serait donc que le résultat du fait que l'on observe les planètes à partir d'une Terre en mouvement autour de Soleil.



Cette explication prévoit que l'amplitude du mouvement rétrograde diminue si la planète est plus éloignée de la Terre. C'est effectivement ce qui se passe puisque c'est Mars qui fait le mouvement rétrograde le plus important alors que Saturne fait le mouvement rétrograde le plus petit. De plus, cette explication permet de comprendre pourquoi le mouvement rétrograde se produit toujours quand la planète est en opposition avec le Soleil. Le mouvement rétrograde se fait quand la Terre dépasse la planète, ce qui se produit nécessairement quand il y a opposition entre la planète et le Soleil.

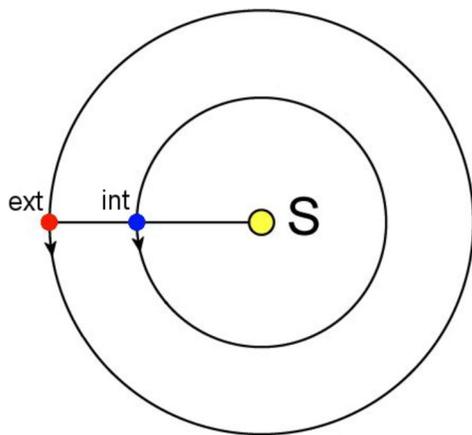
### Troisième argument : un ordre des planètes sans ambiguïté

En plaçant le Soleil au centre, l'ordre des planètes n'est plus ambigu comme c'était le cas dans le modèle de Ptolémée. En effet, dans le modèle de Ptolémée, on avait placé les planètes selon le temps qu'il leur fallait pour parcourir leur orbite en supposant que les planètes éloignées avaient à parcourir une plus grande orbite et devaient donc prendre un temps plus grand pour effectuer un tour complet autour de la Terre. Une confusion se produisait avec le Soleil, Mercure et Vénus qui prennent toutes 1 an pour parcourir une orbite complète. Avec Copernic, cette ambiguïté disparaissait.

#### Les temps de révolution autour du Soleil

Un premier indice du bon ordre des planètes est le temps de révolution autour du Soleil. Nous allons le trouver à partir de la période synodique de la planète. On se rappelle que la période synodique est le temps que prend la planète pour revenir à la même configuration avec le Soleil. Ainsi, si la planète est en opposition avec le Soleil et que sa période synodique est de 100 jours, alors elle reviendra en opposition avec le Soleil au bout de 100 jours.

Commençons donc avec deux planètes alignées avec le Soleil. La planète qui est le plus près du Soleil est la planète interne et celle qui est la plus éloignée est la planète externe. Ce pourrait être, par exemple la Terre (interne) et Mars (externe).



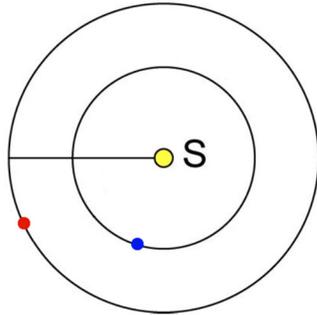
La planète interne tourne avec une vitesse angulaire constante  $\omega_{int}$ . Sa position angulaire sur l'orbite est donc

$$\theta_{int} = \omega_{int} t + \theta_0$$

La planète externe tourne avec une vitesse angulaire constante  $\omega_{ext}$ . Sa position angulaire sur l'orbite est donc

$$\theta_{ext} = \omega_{ext} t + \theta_0$$

L'angle initial est le même puisque les deux planètes sont initialement dans la même direction.



Puisque la planète interne a une vitesse angulaire plus grande, on aura, au bout d'un certain temps, la situation illustrée sur la figure. À ce moment, les deux planètes ne sont plus à la même position angulaire sur l'orbite puisque la planète interne a fait un plus grand angle. Si on veut que les deux planètes reviennent à la même position angulaire, il faudra que la planète interne rattrape la planète externe. On arrivera alors à la situation montrée sur la figure de gauche.

La planète interne a dû faire un tour de plus pour rattraper la planète externe, exactement comme un coureur automobile qui rattrape un retardataire sur la piste a fait un tour de plus que le retardataire. Si la planète interne a fait un tour de plus, le lien entre les angles est

$$\theta_{int} = \theta_{ext} + 360^\circ$$

Le temps total qui s'est écoulé depuis la position de départ est la période synodique ( $S$ ) puisque les deux planètes sont revenues alignées avec le Soleil. Les positions angulaires sont donc

$$\theta_{int} = \omega_{int} S + \theta_0$$

$$\theta_{ext} = \omega_{ext} S + \theta_0$$

En combinant les équations obtenues, on a

$$\theta_{int} = \theta_{ext} + 360^\circ$$

$$\omega_{int} S + \theta_0 = \omega_{ext} S + \theta_0 + 360^\circ$$

$$\omega_{int} S = \omega_{ext} S + 360^\circ$$

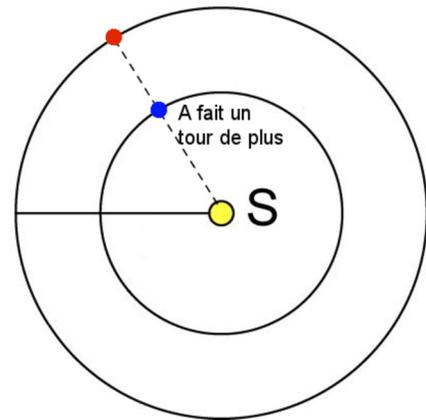
Puisque la vitesse angulaire est

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{360^\circ}{T}$$

où  $T$  est le temps nécessaire pour faire un tour, on arrive à

$$\frac{360^\circ}{T_{int}} S = \frac{360^\circ}{T_{ext}} S + 360^\circ$$

$$\frac{1}{T_{int}} S = \frac{1}{T_{ext}} S + 1$$



On arrive alors à la formule suivante.

**Formule pour calculer le temps de révolution des planètes autour du Soleil à partir de la période synodique**

$$\frac{1}{T_{int}} = \frac{1}{T_{ext}} + \frac{1}{S}$$

On trouve la période de révolution de la planète autour du Soleil en prenant la Terre comme 2<sup>e</sup> planète. Comme on sait la période de révolution de la Terre autour du Soleil (365,26 jours), on pourra trouver la période de révolution de l'autre planète.

**Exemple E1.4.1**

Quelle est la période de rotation de Mars autour du Soleil si la période synodique est de 780,0 jours ?

En prenant Mars et la Terre, la Terre est la planète interne et Mars est la planète externe. On a donc

$$\begin{aligned} \frac{1}{T_{int}} &= \frac{1}{T_{ext}} + \frac{1}{S} \\ \frac{1}{T_{\oplus}} &= \frac{1}{T_{\mars}} + \frac{1}{S} \\ \frac{1}{365,26j} &= \frac{1}{T_{\mars}} + \frac{1}{780,0J} \\ T_{\mars} &= 686,3j \end{aligned}$$

**Exemple E1.4.2**

Quelle est la période de rotation de Vénus autour du Soleil si la période synodique est de 583,9 jours ?

En prenant Vénus et la Terre, Vénus est la planète interne et la Terre est la planète externe. On a donc

$$\begin{aligned} \frac{1}{T_{int}} &= \frac{1}{T_{ext}} + \frac{1}{S} \\ \frac{1}{T_{\venus}} &= \frac{1}{T_{\oplus}} + \frac{1}{S} \end{aligned}$$

$$\frac{1}{T_{\phi}} = \frac{1}{365,26 j} + \frac{1}{583,9 j}$$

$$T_{\phi} = 224,7 j$$

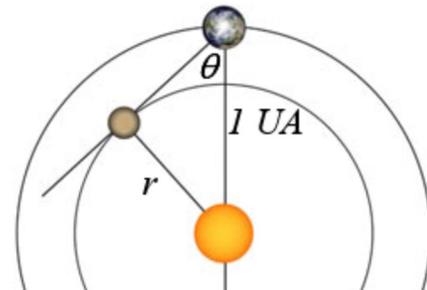
En procédant ainsi pour toutes les planètes, on arrive aux périodes suivantes, en ordre croissant.

Planète	Période	Planète	Période
Mercuré	88,0 j	Mars	687,0 j
Vénus	224,7 j	Jupiter	4 333 j (11,87 a)
Terre	365,3 j	Saturne	10 759 j (29,4 a)

### Le rayon des orbites de Mercure et Vénus

On peut même faire encore mieux puisque le modèle de Copernic permet de déterminer la grandeur relative des orbites de chaque planète par rapport à celle de la Terre. Cela veut dire qu'on pourra savoir que le rayon de l'orbite de Vénus est de 69 % du rayon de l'orbite de la Terre. En fait, on trouve la distance de la planète en unité astronomique par cette méthode. Pour connaître le rayon de l'orbite en kilomètres, il faut connaître la valeur de l'unité astronomique, c'est-à-dire la distance entre la Terre et le Soleil (distance qu'on ne connaissait pas bien à l'époque).

Le calcul est relativement facile dans le cas de l'orbite de Mercure et de Vénus. Il se fait à partir de l'élongation maximale de la planète, qui est l'angle le plus grand qu'il peut y avoir entre le Soleil et la planète. Cela se produit avec la configuration montrée à droite.



[www.polaris.iastate.edu/EveningStar/Unit3/unit3\\_sub2.htm](http://www.polaris.iastate.edu/EveningStar/Unit3/unit3_sub2.htm)

Il est clair que l'angle ne peut être plus grand, car si on augmente l'angle, la ligne allant de la Terre à la planète ne touchera plus à l'orbite de la planète, ce qui signifie que la planète ne peut pas être dans cette direction.

On a alors un triangle rectangle, et on peut écrire

$$\sin \theta = \frac{r}{1UA}$$

Ce qui nous amène

### **Rayon de l'orbite de Mercure et Vénus**

$$r = 1UA \cdot \sin \theta$$

où  $\theta$  est l'élongation maximale de la planète.

### Exemple E1.4.3

Quel est le rayon de l'orbite de Vénus si l'élongation maximale est de  $46,3^\circ$  ?

Le rayon de l'orbite est de

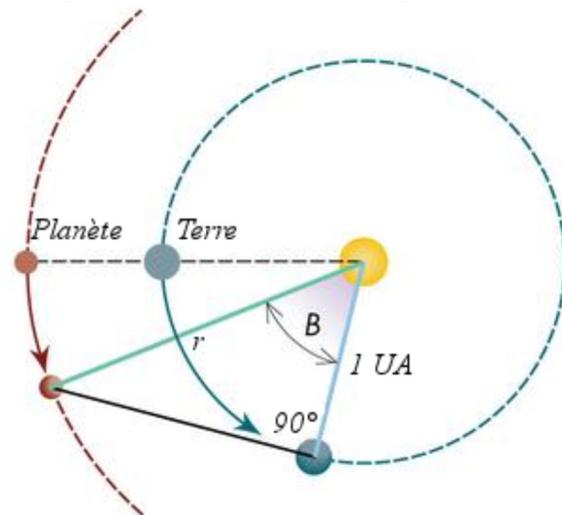
$$\begin{aligned} r &= 1UA \cdot \sin \theta \\ &= 1UA \cdot \sin 46,3^\circ \\ &= 0,723UA \end{aligned}$$

#### Le rayon des orbites de Mars, Jupiter et Saturne

On peut aussi calculer le rayon des orbites de Mars, Jupiter et Saturne, mais c'est un peu plus compliqué. Pour y arriver, on utilise le temps entre le moment où la planète est en opposition avec le Soleil (configuration où le Soleil, la Terre et la planète sont alignés) et le moment où la planète est en quadrature avec le Soleil (la ligne allant du Soleil à la Terre est perpendiculaire à la ligne allant de la Terre à la planète). On notera le temps entre l'opposition et la quadrature  $t_{oq}$ .

On a alors un triangle rectangle. Avec ce triangle, on obtient

$$\cos B = \frac{1UA}{r}$$



[cse.ssl.berkeley.edu/bmendez/ay10/2002/notes/lec6.html](http://cse.ssl.berkeley.edu/bmendez/ay10/2002/notes/lec6.html)

On obtiendra le rayon de l'orbite, si on arrive à trouver l'angle  $B$ , qui n'est pas un angle qu'on peut directement mesurer. Voici comment on peut trouver cet angle.

La Terre tourne avec une vitesse angulaire constante  $\omega_{\oplus}$ . L'angle fait par la Terre entre l'opposition et la quadrature est donc

$$\theta_{\oplus} = \omega_{\oplus} t_{oq}$$

La planète tourne avec une vitesse angulaire constante  $\omega_p$ . L'angle fait par la planète entre l'opposition et la quadrature est donc

$$\theta_p = \omega_p t_{oq}$$

L'angle  $B$  sur la figure est la différence entre ces deux angles

$$B = \theta_{\oplus} - \theta_p$$

$$B = \omega_{\oplus} t_{oq} - \omega_p t_{oq}$$

Puisque la vitesse angulaire est

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{360^\circ}{T}$$

On arrive à

$$B = \frac{360^\circ}{T_{\oplus}} t_{oq} - \frac{360^\circ}{T_p} t_{oq}$$

$$B = 360^\circ \cdot \left( \frac{1}{T_{\oplus}} - \frac{1}{T_p} \right) t_{oq}$$

Or, nos calculs de la période de révolution des planètes autour du Soleil nous avaient donné

$$\frac{1}{T_{int}} = \frac{1}{T_{ext}} + \frac{1}{S}$$

Comme on calcule le rayon des orbites plus grandes que celle de la Terre, la Terre est toujours la planète interne et l'autre planète est toujours la planète externe. On arrive donc à

$$\frac{1}{T_{\oplus}} = \frac{1}{T_p} + \frac{1}{S}$$

$$\frac{1}{T_{\oplus}} - \frac{1}{T_p} = \frac{1}{S}$$

Le côté gauche de cette équation est exactement ce qu'on trouve entre parenthèses dans notre formule de l'angle. On a donc

$$B = 360^\circ \cdot \left( \frac{1}{T_{\oplus}} - \frac{1}{T_p} \right) t_{oq}$$

$$B = 360^\circ \cdot \frac{1}{S} t_{oq}$$

Si on met cet angle dans notre formule du cosinus du triangle rectangle, on arrive à

### Rayon des orbites de Mars, Jupiter et Saturne

$$\cos\left(\frac{t_{oq}}{S} \cdot 360^\circ\right) = \frac{1UA}{r}$$

où  $t_{oq}$  est le temps entre l'opposition et la quadrature et  $S$  est la période synodique.

### Exemple E1.4.4

Quel est le rayon de l'orbite de Mars si la période synodique de Mars est de 780,0 jours et que le temps entre l'opposition et la quadrature de Mars est de 106,1 jours ?

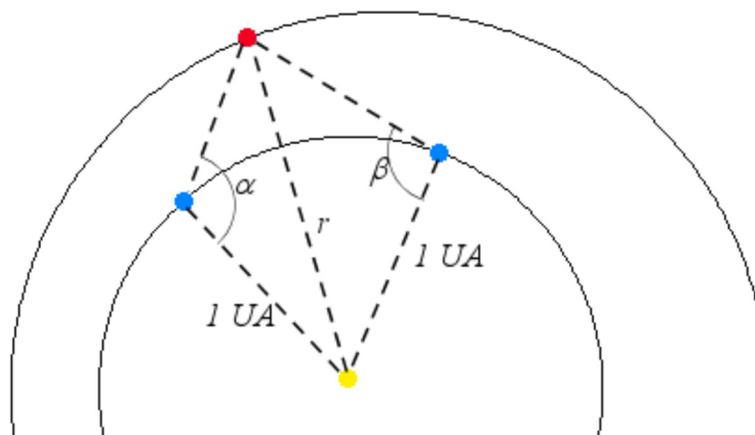
Le rayon de l'orbite est de

$$\cos\left(\frac{t_{oq}}{S} \cdot 360^\circ\right) = \frac{1UA}{r}$$

$$\cos\left(\frac{106,1j}{780,0j} \cdot 360^\circ\right) = \frac{1UA}{r}$$

$$r = 1,523UA$$

Notez que ce n'est pas la seule façon de trouver le rayon des orbites de ces planètes. Par exemple, Kepler utilisa, quelques décennies plus tard, l'angle entre la planète et le Soleil mesuré à des moments différents. Le temps entre les mesures utilisées est la période de révolution de la planète autour du Soleil, ce qui fait que la planète est revenue au même endroit sur son orbite quand les mesures ont été prises. On a donc la situation suivante.



Nous ne le ferons pas ici, mais on peut trouver  $r$  à partir de ces angles avec un peu de trigonométrie.

L'ordre des planètes

En procédant de la sorte pour toutes les planètes, on obtient les rayons suivants pour les orbites.

Planète	Rayon de l'orbite	Planète	Rayon de l'orbite
Mercure	0,387 UA	Mars	1,52 UA
Vénus	0,723 UA	Jupiter	5,20 UA
Terre	1 UA	Saturne	9,58 UA

C'est l'ordre des planètes tournant autour du Soleil dans le système de Copernic. Cet ordre est très clair et il n'y a pas d'ambiguïté.

Notez qu'on a uniquement trouvé les distances en unités astronomiques, c'est-à-dire les distances relatives par rapport au rayon de l'orbite terrestre. On sait donc que Jupiter est 5,2 fois plus du Soleil que la Terre, mais on connaît la valeur de cette distance. Pour obtenir la véritable distance, il faut connaître la longueur de l'unité astronomique, c'est-à-dire la distance entre le Soleil et la Terre. Il faut attendre 1672 pour que cette distance soit connue avec une précision raisonnable.

## Des complications

Mais, tel quel, le système est peu précis. Il est même moins précis que le système géocentrique de Ptolémée. Copernic doit donc compliquer son système et ajouter des épicycles et des excentriques pour réussir à obtenir la même précision que Ptolémée. Il peut toutefois se passer de l'équant, ce qui plaira à plusieurs astronomes. De plus, il ne pousse pas son idée jusqu'au bout puisque la Terre garde quand même une position privilégiée dans son système. Par exemple, toutes les orbites des planètes ne sont pas centrées sur le Soleil, mais plutôt sur le centre de l'orbite terrestre, et ce centre tourne autour du Soleil sur un épicycle (d'une période de 3434 ans) et un déférent (d'une période de 53 000 ans). Finalement, le système devient pratiquement aussi compliqué que celui de Ptolémée, bien que le nombre d'épicycles soit passé de 80 à 34 et qu'on ait supprimé les équants.

## E1.5 LES DÉFAUTS DU MODÈLE DE COPERNIC

### Un désaccord avec la physique de l'époque

On sait que les modèles dans lesquels la Terre se déplace n'ont pas eu beaucoup de succès auparavant, car ils sont en désaccord flagrant avec la physique de l'époque qui associe la force à la vitesse. Où est ce vent continu qu'il devrait y avoir si la Terre se déplace ? C'est ce genre d'argument qui faisait qu'on rejetait toujours ces théories. L'idée que la Terre se déplace semblait si ridicule que pratiquement personne n'osait la proposer, à deux exceptions près.

Il y avait premièrement eu une version du pythagoricien Philolaos de Crotona, où la Terre tournait autour d'un feu central (qui n'est pas le Soleil). Dans ce modèle, la Terre a toujours la même face tournée vers le feu et, comme on habiterait sur l'autre face, nous ne pouvons jamais voir ce feu central. Par contre, on peut voir sa réflexion sur le Soleil qui tourne aussi autour du feu central. Il y a même une Antiterre qui tourne aussi autour du feu central dans ce modèle...

Puis, il y a eu une version moins fantaisiste faite par Aristarque de Samos (310-230 av. J.-C.). Quand Aristarque a déterminé la distance et la grosseur du Soleil, il est arrivé à la conclusion que le Soleil était 5 plus gros que la Terre, ce qui l'a amené à proposer que c'est le Soleil qui devait être au centre de l'univers. Il faut croire que ses arguments n'ont pas été assez forts pour que la théorie ait du succès parce qu'il n'a pas convaincu beaucoup de personnes. Même Archimède a critiqué les idées d'Aristarque. Les désaccords avec la physique acceptée à l'époque ont vite eu raison de sa théorie.

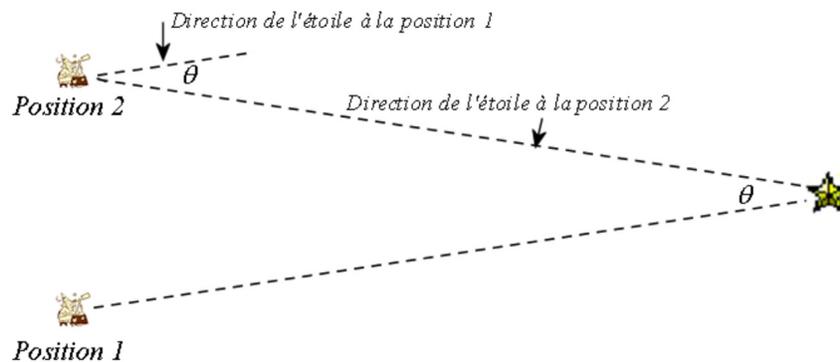
(Ne pensez pas que Copernic a copié l'œuvre d'Aristarque de Samos, même si la première traduction de l'œuvre d'Aristarque date de 1488 et que Copernic commença à développer sa théorie un peu avant 1512. Il semble que Copernic n'a jamais pu voir le texte d'Aristarque, mais il semble qu'il connaissait l'existence de l'hypothèse héliocentrique d'Aristarque puisqu'il fait référence à l'œuvre de ce dernier dans une phrase effacée dans un de ses manuscrits).

## L'absence de parallaxe

### Qu'est-ce que la parallaxe ?

Si la Terre tourne autour du Soleil, il devrait y avoir un changement de position apparente des étoiles pendant l'année. Ce changement de position apparente est la *parallaxe*.

Pour comprendre ce que cela veut dire, regardons comment change la position angulaire d'un objet, ici une étoile, quand on observe cet objet à partir de différentes positions.

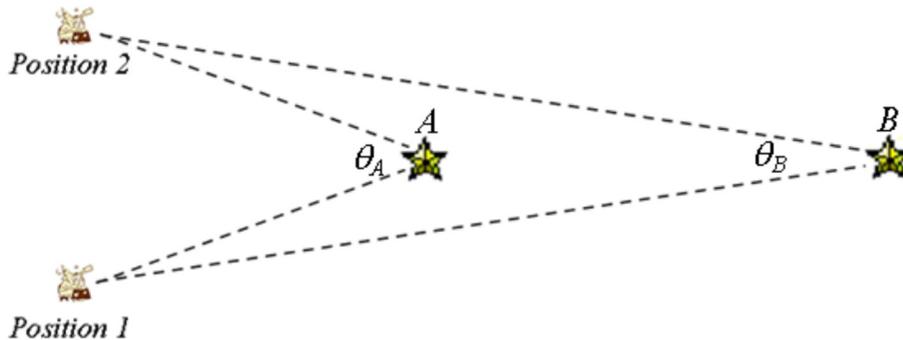


À la position 1, on observe l'objet dans une certaine direction. À la position 2, on observe l'objet dans une autre direction. La position angulaire de l'objet a donc changé. Remarquez

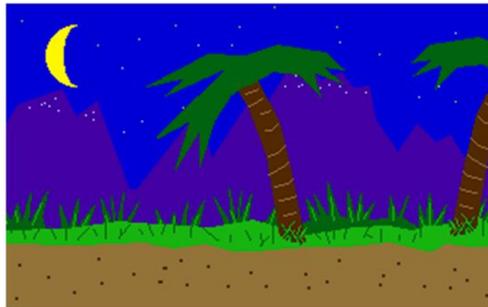
l'égalité entre les deux angles  $\theta$  indiqués sur la figure. Le changement de position angulaire est la parallaxe.

La parallaxe diminue avec la distance

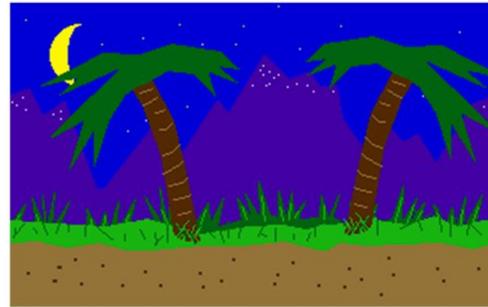
Si on observe deux objets à des distances différentes, le changement d'angle sera plus grand pour l'objet le plus proche.



Ainsi, quand on se déplace, le changement de direction est plus important si l'objet est plus près. Voici comment change ce paysage quand on se déplace un peu.



*Position 1*



*Position 2*

*un peu à droite de la position 1*

[www.youtube.com/watch?v=bDm6unk1pqI](http://www.youtube.com/watch?v=bDm6unk1pqI)

On voit que le changement de direction des palmiers, relativement près, est important, alors que le changement de direction des montagnes, plus lointaines, est plus petit. Quant à la Lune, elle est si loin qu'elle n'a pratiquement pas changé de direction.

Voici la même scène, mais animée. (L'observateur change constamment de position.) On voit le paysage le plus près défilé plus rapidement puisque sa position angulaire change rapidement, alors que les objets lointains défilent plus lentement.

<http://www.youtube.com/watch?v=bDm6unk1pqI>

La parallaxe des étoiles

Si la Terre tourne autour du Soleil, on change de position et cela devrait se traduire par un changement de direction de la position des étoiles. Plus les étoiles sont près, plus le changement de direction est important. Si la Terre se déplace continuellement autour du Soleil, alors le changement de direction devrait se faire de façon continue, ce qui fait que les étoiles devraient continuellement changer de direction vue de la Terre en faisant un mouvement d'oscillation. Voici ce qu'on devrait obtenir en observant plusieurs étoiles à différentes distances en même temps.

<http://www.youtube.com/watch?v=HjjE4nzcKdk>

Les étoiles les plus près font un mouvement d'oscillation important alors que les étoiles plus loin font un mouvement d'oscillation plus petit. Les étoiles très loin oscillent tellement peu qu'elles ne semblent pas osciller du tout. Elles restent toujours dans la même direction. Dans l'animation, l'amplitude d'oscillation est fortement exagérée et la période du mouvement est grandement diminuée puisqu'il faut un an pour que l'étoile fasse une oscillation.

Le mouvement de l'étoile peut être un mouvement d'oscillation de gauche à droite (étoiles à  $90^\circ$  de l'étoile Polaire), un ovale ou un cercle (pour les étoiles près de l'étoile Polaire par exemple). On peut voir dans l'animation précédente que les étoiles au milieu de l'image font une oscillation de gauche à droite alors qu'elles font un petit ovale dans le haut de l'image.

### La parallaxe et le modèle de Copernic

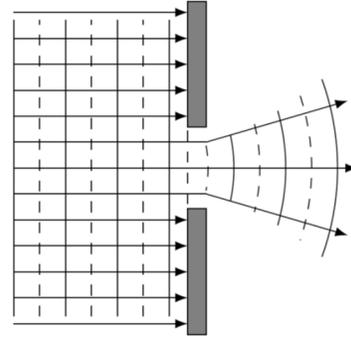
Tout comme Aristarque de Samos l'avait remarqué avant lui quand il a proposé sa théorie, Copernic sait qu'il devrait y avoir un effet de parallaxe si la Terre se déplaçait autour du Soleil. Le problème, c'est qu'on n'avait jamais observé cette modification de position apparente des étoiles. Cette absence d'oscillation semblait plutôt confirmer que la Terre était immobile. Pour contourner ce problème, Copernic affirme que les étoiles sont très loin de nous, ce qui rendrait inobservable le phénomène de parallaxe. Avec des observations précises à la minute d'arc ( $1/60^\circ$  de degré), il fallait qu'elles soient à au moins 0,1 al de nous pour qu'on ne remarque pas l'oscillation. Cela plaçait les étoiles à une distance au moins 600 fois plus grande que Saturne, la planète la plus éloignée connue à l'époque. Évidemment, cette constatation a amené plusieurs personnes à se demander pourquoi il y aurait un tel espace vide et inutile entre la dernière planète connue, Saturne, et les étoiles.

### Des étoiles gigantesques

Pratiquement toutes les étoiles n'ont pas de grosseur vue de la Terre. Elles sont tellement petites par rapport à leur distance qu'il est impossible de mesurer directement le diamètre d'une étoile même avec le meilleur des télescopes (à l'exception de 2 étoiles). Pourtant, les astronomes des 16<sup>e</sup> et 17<sup>e</sup> siècles avaient mesuré la largeur angulaire des étoiles. Ils ne le savaient pas, mais ce qu'ils mesuraient n'était pas le diamètre apparent de l'étoile, mais plutôt le résultat de la diffraction de la lumière quand cette dernière entre dans un télescope.

Quand la lumière passe dans une ouverture circulaire, la lumière est diffractée, ce qui signifie qu'elle s'étale un peu en passant par l'ouverture (figure de droite).

On remarque que le faisceau de lumière devient de plus en plus large près le passage dans l'ouverture. C'est cet élargissement du faisceau lumineux que les astronomes mesuraient. Ils pensaient qu'ils mesuraient la largeur de l'étoile alors qu'en réalité, ils mesuraient l'élargissement du faisceau par la diffraction.



Ainsi, on arrivait à un gros problème quand on combinait la largeur de l'étoile mesurée ainsi et l'absence de parallaxe, qui signifiait que les étoiles devaient être à au moins 0,1 al. La largeur angulaire mesurée impliquait que des étoiles aussi lointaines devaient être gigantesques. Elles seraient près d'une centaine de fois plus grosse que le Soleil selon les estimations. Des étoiles aussi grosses étaient difficilement acceptables pour les astronomes de cette époque. Vers le milieu des années 1600, Giovanni Battista Riccioli affirma même, dans une encyclopédie, que ce problème de la taille des étoiles est un des 2 principaux arguments contre la théorie de Copernic (l'autre étant le désaccord avec la physique de l'époque).

## La Lune est une exception

Le système de Copernic est plus simple et esthétique quand vient le temps d'expliquer les élongations maximales et les mouvements rétrogrades, mais il est moins simple quand on observe que la Lune est une exception dans le système de Copernic. Dans le système de Ptolémée, toutes les planètes tournent autour de la Terre, sans exception. Dans le système de Copernic, toutes les planètes tournent autour du Soleil, sauf la Lune qui tourne autour de la Terre. La règle semble plus élégante dans le système de Ptolémée.

Cette exception se révélera être plutôt un atout quelques années plus tard quand on a découvert qu'il y avait aussi des lunes autour des autres planètes. En effet, l'exception lunaire permettait plus facilement d'accepter qu'il pourrait y avoir d'autres lunes en orbites autour des autres planètes.

## La gravitation

Dans le modèle de Ptolémée, il y a une explication assez simple de la gravitation. Les pierres tombent vers le centre de l'univers tout simplement parce que c'était leur position naturelle. Avec une Terre en orbite autour du Soleil dans le système de Copernic, les pierres ne peuvent plus tomber vers le centre de l'univers, elles doivent tomber vers la Terre. Mais alors, pourquoi le font-elles puisque la Terre n'occupe plus une position centrale privilégiée ?

Copernic doit donc modifier l'explication de la gravitation. Il en conclut donc qu'il est probable que chaque planète ait sa propre gravité et qu'une pierre dans l'espace tombe vers la planète le plus près. Selon Copernic, cela explique probablement pourquoi la Lune tourne autour de la Terre plutôt qu'autour du Soleil. Cette modification rendra plus facile l'intégration de nouvelles lunes au système quand on découvrira de nouvelles lunes qui tournent autour de Jupiter et de Saturne. Cette intégration est plus difficile dans le système de Ptolémée puisque tout devrait tourner autour de la Terre dans ce système.

## E1.6 COMMENT LE SYSTÈME DE COPERNIC A-T-IL ÉTÉ ACCUEILLI ?

Copernic développe sa théorie pendant plusieurs décennies, mais il ne publie presque rien. Ce n'est pas parce qu'il craint l'Église puisque celle-ci ne s'était jamais attaquée à des astronomes pour de telles raisons (jusque-là...). Il ne publie pas parce qu'il craint d'être ridiculisé parce qu'il affirme que la Terre se déplace. C'est précisément ce point qui avait poussé les Grecs et les Arabes qui avaient exploré la question à rejeter très rapidement le modèle héliocentrique, car il était en désaccord avec la physique d'Aristote.

De son vivant, Copernic ne publie, vers 1512, qu'un bref résumé de ses idées pour ses amis proches. C'est ce bref exposé que Widmanstadt utilise en 1533 pour faire une conférence devant le pape Clément VII lors de laquelle il présente l'héliocentrisme de Copernic. Le pape ne soulève alors aucune critique contre cette théorie.

Mais l'intérêt des astronomes est grand et on presse Copernic de publier un ouvrage plus complet. Le cardinal Nicolas von Schönberg, dont Widmanstadt est le secrétaire, est de ceux qui font les demandes les plus pressantes. C'est alors qu'intervient, en 1539, Joachim von Lauchen, dit Rhéticus. Celui-ci entend parler des idées de Copernic et vient le visiter à Freuenbourg. Cette collaboration, d'une durée de deux ans, mène, en 1540, à la publication du *premier exposé* par Rhéticus. La réaction favorable à cet ouvrage efface les craintes de Copernic qui se lance alors dans la rédaction d'un livre plus complet. Ainsi est publié, en 1543, *De la révolution des orbés célestes* (publié tout juste après la mort de Copernic).

Le livre de Copernic s'adresse avant tout aux astronomes. Pour la plupart de ceux-ci, le modèle de Copernic ne peut pas représenter la réalité à cause des désaccords avec la physique d'Aristote. Par contre, les simplifications qu'il apporte permettent de calculer la position des planètes plus facilement. Beaucoup l'utilisent donc en considérant le modèle plutôt comme un simple truc mathématique. Dès 1551, on voit apparaître les premières tables de position de planète calculée avec le système de Copernic. Quelques astronomes, dont Kepler et Galilée, vont cependant être convaincus que le modèle de Copernic représente la réalité.

Le débat va cependant un peu plus loin qu'une différence d'opinions entre les astronomes, particulièrement parce que les chrétiens viennent de se séparer en deux clans : les

protestants et les catholiques. Avec la Réforme qui commence en 1517, les protestants prônent un rejet des autorités religieuses (et donc de l'autorité du pape) en considérant que seul le texte de la Bible fait autorité. Dans ce contexte, l'héliocentrisme est l'objet de commentaires par chacun des camps. L'impact n'est pas majeur au départ, mais il s'amplifie à mesure que les débats font apparaître les conséquences religieuses de l'héliocentrisme.

Au départ, ce sont surtout les protestants qui critiquent l'héliocentrisme puisque certains passages de la Bible semblent indiquer que la Terre ne se déplace pas. Dès 1539, Luther critique sévèrement la théorie de Copernic, car elle s'oppose à un passage de la Bible dans lequel Joshua ordonne au Soleil d'arrêter son mouvement. Comment le Soleil aurait-il pu arrêter son mouvement s'il est au repos au centre de l'univers et que c'est la Terre qui se déplace comme l'affirme Copernic ?

Les catholiques, plus souples sur l'interprétation des passages de la Bible (du moins avant la contre-réforme), n'ont rien contre la théorie au départ. Le cardinal Bellarmine, celui-là même qui condamnera Galilée plus tard, affirme :

*Il vaut mieux dire que le passage des écritures est incompris plutôt que de condamner une théorie qui peut être vraie. (Mais qui est fautive selon Bellarmine.)*

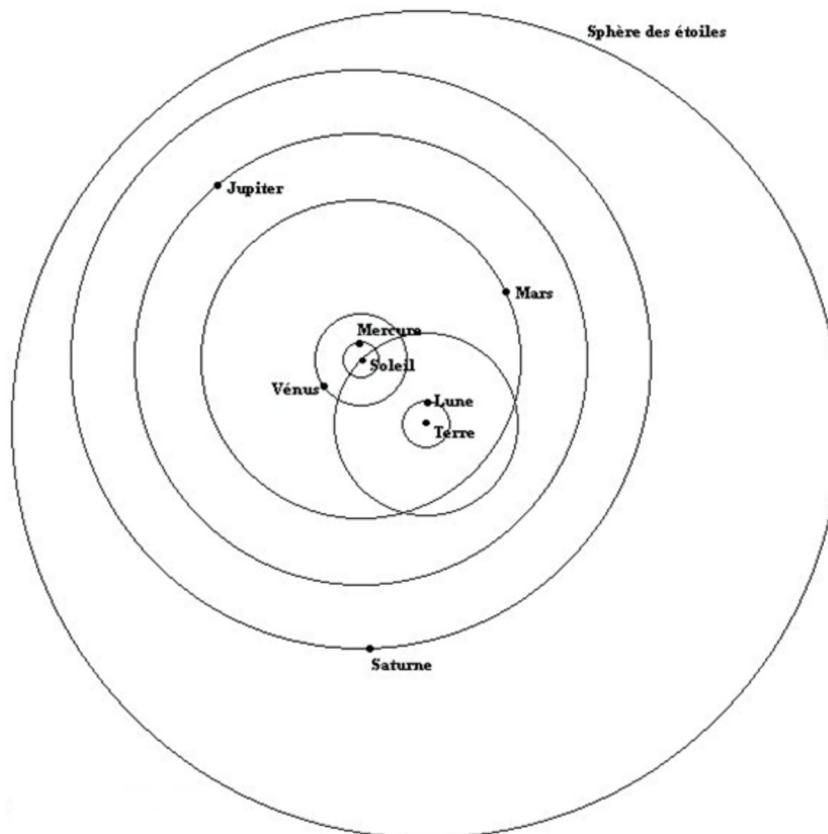
Vers la fin du 16<sup>e</sup> siècle, l'opposition de l'Église catholique s'affirme davantage suite au durcissement des positions après le concile de Trente et parce qu'on commence à comprendre les conséquences de l'héliocentrisme à partir du moment où Thomas Digges (c.1545-1595) pousse le modèle un peu plus loin. Il élimine la sphère des étoiles que Copernic avait conservée dans son modèle, pour obtenir un univers infini dans lequel flottent les étoiles, qui sont identiques au Soleil. L'italien Giordano Bruno (1548-1600) ajoute que chacune de ces étoiles pourrait être le centre d'un nouveau système de planètes, un point de vue qui sera généralement accepté à partir du 17<sup>e</sup> siècle. Cette façon de voir l'univers amène de nombreuses questions embarrassantes pour le Vatican. En effet, s'il n'y a pas de différence entre le Soleil et les étoiles, il devrait y avoir des planètes et des habitants autour de ces étoiles. Sinon, pourquoi Dieu, dans sa bonté infinie, aurait-il fait toutes ces étoiles et ces planètes sans y mettre des habitants ? Mais alors, est-ce que les habitants de ces planètes connaissent Jésus ? Sinon, pourquoi Dieu aurait-il créé ces habitants sans leur faire connaître Jésus ? Si oui, Jésus doit-il faire la tournée de toutes ces planètes pour se faire crucifier chaque fois et ressusciter chaque fois ? Est-ce que les habitants de ces mondes sont aussi les enfants d'Adam et Ève ? Si oui, comment est-ce possible ? Est-ce que Adam et Ève font aussi une tournée des planètes pour avoir des enfants sur chacune de ces planètes ? Sinon, cela veut dire que la Bible n'est pas vraie, car il est clair dans la Bible que tous descendent d'Adam et Ève.

Ces conséquences étaient bien connues parce que Giordano Bruno fut jugé par le tribunal de l'Inquisition. Ses vues sur la religion, spécialement sa négation de la divinité du Christ et de la virginité de Marie, le mènent directement devant ce tribunal, puis au bucher le 17 février 1600. Même si ce n'est pas pour son soutien à l'héliocentrisme que Bruno est

condamné (ce n'est même pas mentionné dans l'acte d'accusation), l'association entre l'héliocentrisme et Bruno rend la théorie suspecte. C'est à partir de cette date que l'Église catholique examine la question plus profondément. On verra un peu plus loin comment la situation a évolué au 17<sup>e</sup> siècle.

## E1.7 LES MODÈLES GÉOHÉLIOCENTRIQUES

Certains astronomes aiment bien les simplifications qu'apporte le système de Copernic, mais ne peuvent accepter que la Terre puisse se déplacer sans que cela paraisse. On voit donc apparaître des modèles hybrides dans lesquels la Terre est toujours immobile au centre de l'univers. Le Soleil tourne autour de la Terre, mais les planètes tournent autour du Soleil. On obtient donc un modèle ressemblant à ceci.



Ce modèle géohéliocentrique est celui du danois Tycho Brahe (Danemark 1546-1601), qui fut le plus grand astronome de cette époque. Ses observations, précise à 1 minute d'arc, sont 10 fois plus précises que ce que les Grecs avaient fait et 5 fois plus précises que ce que les musulmans avaient fait à Samarkand. En fait, il atteint pratiquement la limite de résolution qu'il est possible d'obtenir sans télescope. Comme il n'observe pas de parallaxe des étoiles, il ne peut accepter que la Terre tourne autour du Soleil. Mais en faisant tourner les planètes (sauf la Lune) autour du Soleil, Brahe conserve tous les avantages du système de Copernic. Brahe n'est pas le seul ni le premier à proposer un tel modèle. Plusieurs astronomes, comme Paul Wittich et William Gilbert, proposent des modèles semblables.

Il y a aussi une variante de ce modèle dans lequel il n'y a que Mercure et Vénus qui tournent autour du Soleil alors que les autres planètes tournent autour de la Terre. En fait, ce modèle avait déjà été proposé par Héraclite du Pont en 340 av. J.-C. La théorie d'Héraclite resta relativement connue puisque Martianus Capella la présente dans son manuel encyclopédique *Noces de Philologie et de Mercure*, rédigé vers 420, près de 7 siècles plus tard. Cet ouvrage était très connu au Moyen-Âge et Copernic le connaissait puisqu'il y fait référence dans son livre.

Les modèles géohéliocentriques furent les modèles préférés de la majorité des astronomes entre 1630 et 1690 environ.

## E1.8 DES OBSERVATIONS TROUBLANTES POUR LE SYSTÈME DE PTOLÉMÉE

À partir de 1572, il y a eu toute une série d'observations qui permettait de remettre en doute le système de Ptolémée. C'est principalement Galilée qui a mis en évidence les contradictions entre ces observations et ce système.

### La fin de la perfection des cieux

#### La supernova de 1572

Le 11 novembre 1572, on voit apparaître une supernova dans le ciel. Dans le modèle de Ptolémée, il est hors de question qu'une nouvelle étoile apparaisse dans des cieux réputés immuables et parfaits. Depuis 15 siècles, on considère que ces nouvelles étoiles ne sont pas des étoiles, mais plutôt des phénomènes se produisant près de la Terre, dans le monde sublunaire. Cette fois-ci, Brahe fait des observations minutieuses qu'il compare à celles de l'anglais Thomas Digges. Avec deux observations faites à partir d'endroits différents, il est possible de déterminer la distance du phénomène par trigonométrie. Brahe calcule alors que la nouvelle étoile est très loin, certainement en dehors du monde sublunaire et probablement au-delà de l'orbite de Saturne. Il en conclut que le phénomène se produit bel et bien dans les cieux, brisant ainsi le dogme de l'immuabilité et de la perfection de ceux-ci. Il publie ses conclusions en 1573, alors que la supernova est encore visible (elle le restera jusqu'en mars 1574), dans un petit article qui attaque le dogme de l'immuabilité des cieux.

#### La comète de 1577

Le 13 novembre 1577 apparaît une nouvelle comète dans le ciel. Encore une fois, Brahe se livre à des observations précises qu'il compare à celles d'autres observateurs. Il peut alors conclure que cette comète n'est pas un phénomène se produisant dans le monde sublunaire comme on le croyait jusqu'ici en occident, mais plutôt un phénomène se produisant au-

delà de l'orbite de la Lune, dans les cieux. En plus de contredire une fois de plus le dogme de l'immutabilité des cieux, ces observations permettent de constater que la comète aurait traversé les sphères de cristal sur lesquelles doivent être fixées les planètes selon certains astronomes. Brahe doit alors en conclure que ces sphères de cristal n'existent pas, car, dans le cas contraire, elles auraient été fracassées par le passage de la comète.

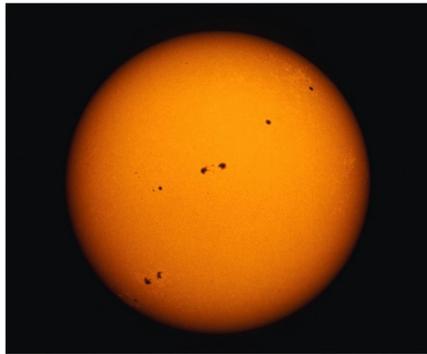
*Des montagnes sur la Lune et les tâches sur le Soleil*

Galilée est le premier à pointer un télescope vers le ciel en mai 1609, ce qui lui permet de voir des choses que personne n'a vues auparavant. Deux observations entrent en contradiction le dogme de la perfection des cieux.

Alors que le dogme de la perfection des cieux implique que la Lune doit être une sphère parfaite, Galilée observe que la Lune n'est pas parfaitement lisse. Il y a des montagnes, des vallées et des cratères.



[www.universetoday.com/71974/first-quarter-moon/](http://www.universetoday.com/71974/first-quarter-moon/)



Alors que le Soleil devrait être une sphère parfaite selon le principe de perfection des cieux, Galilée observe des tâches à la surface du Soleil.

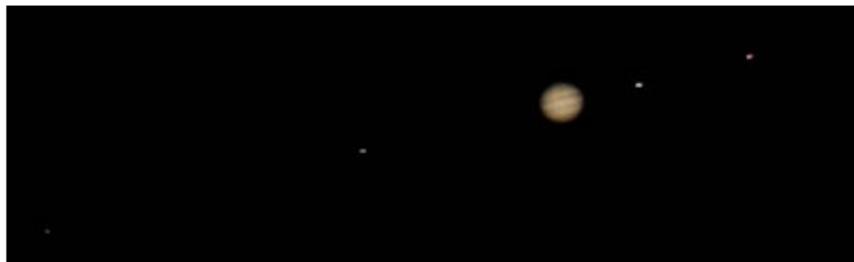
[jersey.uoregon.edu/~imamura/122/lecture-3/stellar\\_spectra.html](http://jersey.uoregon.edu/~imamura/122/lecture-3/stellar_spectra.html)

Le dogme de la perfection et de l'immutabilité des cieux s'écroule donc en quelques décennies. Ce n'est toutefois pas un coup mortel pour le système de Ptolémée. Il pourrait très bien survivre sans ce dogme.

Comme il n'y a pas de séparation entre les cieux et le monde sublunaire dans les modèles héliocentrique (Copernic) et géohéliocentrique (Brahe), il n'y a pas de dogme de perfection des cieux dans ces systèmes et ils peuvent facilement intégrer ces observations

## Les satellites de Jupiter

Avec sa lunette astronomique, Galilée observe 4 petits objets lumineux tournant autour de Jupiter. Il venait de découvrir 4 satellites de Jupiter.



[fr.wikipedia.org/wiki/Jupiter\(planète\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Jupiter(planète))

Le système de Ptolémée peut s'accommoder de lunes tournant autour de Jupiter, mais cela détruisait un peu l'harmonie du système. Tout est si élégant quand tout tourne autour de la Terre. Pourquoi alors y aurait-il des satellites tournant autour de Jupiter dans ce système ? Cela demande de complètement transformer l'explication de la cause du mouvement des planètes du système de Ptolémée.

Par contre, le système de Copernic prévoit déjà qu'il peut y avoir des lunes tournant autour des autres planètes. Si la Lune tourne autour de la Terre, pourquoi ne pourrait-il pas y avoir d'autres lunes autour des autres planètes puisque la Terre est une planète comme une autre dans ce système ?

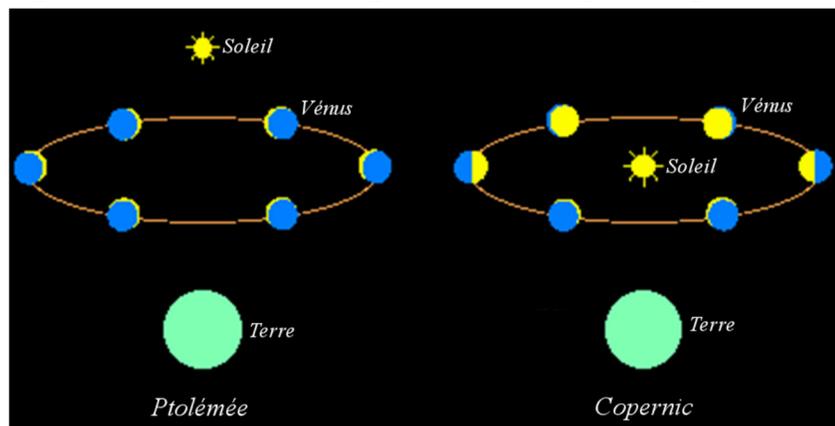
Dans le système géohéliocentrique, c'est un peu moins évident parce que la Terre et le Soleil y ont des positions privilégiées. On peut comprendre pourquoi il y a des objets tournant autour de la Terre et du Soleil dans ce système, mais rien ne laisse penser qu'il peut y avoir des satellites tournant autour des autres planètes. On peut quand même intégrer ces satellites au système, mais philosophiquement, c'était moins beau.

## Les satellites de Saturne

Alors que le débat entre les partisans des différents systèmes est encore très animé, on découvre aussi que Saturne possède des satellites. Huygens découvre Titan en 1655 et Cassini en trouve 2 autres en 1671-1672 et encore deux autres en 1684. Ces nouveaux satellites montrent encore une fois que les planètes ne tournent pas toutes autour de la Terre tel que préconisé dans le système de Ptolémée. (Notez qu'à partir de 1684, il fallut attendre 97 ans avant qu'on découvre un autre satellite dans le système solaire.)

## Les phases de Vénus

Galilée observe ensuite que Vénus a, tout comme la Lune, des phases. Or, l'aspect de ces phases vues de la Terre devrait être complètement différent selon que Vénus tourne autour de la Terre ou autour du Soleil. Comme on peut le voir sur la figure, l'aspect des phases dans les deux systèmes est assez semblable lorsque Vénus est à son point le plus près de la Terre, mais elles sont complètement différentes lorsqu'elle est à son point le plus loin. À ce point, on devrait la voir complètement sombre dans le modèle de Ptolémée alors qu'on la verrait complètement éclairée selon le modèle de Copernic.



[csep10.phys.utk.edu/astr161/lect/history/galileo.html](http://csep10.phys.utk.edu/astr161/lect/history/galileo.html)

Or, les phases de Vénus sont exactement de la forme prévue par le système de Copernic. Voici les observations de ces phases en 2002.



[scienceblogs.com/startswithabang/2010/09/13/geocentrism-was-galileo-wrong/](http://scienceblogs.com/startswithabang/2010/09/13/geocentrism-was-galileo-wrong/)

Les phases de Vénus sont un argument très fort contre le système de Ptolémée puisque les observations montrent clairement que Vénus tourne autour du Soleil et non pas autour de la Terre. On voit mal comment le système de Ptolémée peut être ajusté pour tenir compte de ces observations.

Par contre, les observations des phases de Vénus ne supportent pas uniquement le système de Copernic. Elles s'accordent très bien aussi avec les systèmes géohéliocentriques puisque Vénus tourne aussi autour du Soleil dans ces systèmes.

## Était-ce suffisant ?

Puisque toutes ces observations s'accordent mal avec le modèle de Ptolémée, mais plutôt bien avec le modèle de Copernic, on pourrait croire qu'une fois ces évidences publiées, la victoire de l'héliocentrisme était assurée, mais ce n'était pas le cas. Il reste toujours les deux arguments très forts contre le modèle de Copernic. Ces arguments sont

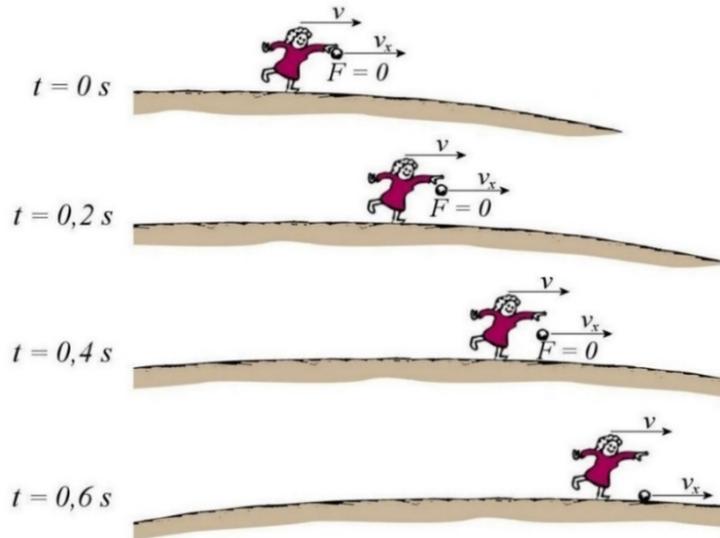
- 1) On ne voyait pas de parallaxe des étoiles.
- 2) Le mouvement de la Terre devrait avoir des effets évidents à la surface de la Terre selon la physique de l'époque qui associait toujours les forces à la vitesse.

Il est relativement facile d'expliquer pourquoi on n'observait pas de parallaxe. Les étoiles sont si loin que les parallaxes sont tellement petites qu'on ne pouvait pas les mesurer avec les instruments de l'époque. Ils sont en fait tellement petits qu'il faut attendre 1838 avant

qu'on parvienne à mesurer la parallaxe d'une étoile. À ce moment, le modèle héliocentrique était accepté depuis longtemps, même si on n'avait jamais mesuré de parallaxe. L'argument de l'absence de parallaxe pouvait donc facilement être mis de côté.

Par contre, le problème du mouvement de la Terre est un obstacle majeur. Galilée essaie de convaincre que la Terre peut se déplacer en modifiant la physique !

Galilée comprend qu'on élimine le problème si on suppose qu'un objet garde sa vitesse quand il n'y a pas de force (cette idée deviendra la première loi de Newton). Reprenons l'exemple de la pierre. Quand on lâche la pierre, il n'y a pas de force horizontale sur la pierre, ce qui signifie, selon Galilée, que la vitesse horizontale de la pierre doit rester la même. Ainsi, la vitesse en  $x$  de la pierre reste toujours identique à celle de la Terre et elle avance au même rythme que la Terre. Cela l'amène à toucher le sol devant la personne, directement sous la main de la personne. C'est exactement la même chose que ce qu'on observerait si la Terre ne se déplaçait pas.



En utilisant des arguments similaires, Galilée peut montrer qu'on ne verrait aucune différence entre ce qui se passe à la surface d'une Terre immobile et à la surface d'une Terre en mouvement à vitesse constante. Le mouvement de la Terre serait imperceptible (c'est en fait le principe de relativité).

Galilée utilise bien d'autres arguments pour convaincre les gens que la Terre se déplace, mais ils ne sont pas tous bons. Par exemple, Galilée considère que les marées sont la meilleure preuve que la Terre se déplace. Malheureusement, cette « meilleure preuve » est fausse.

Il faudrait quelques décennies pour que les arguments de Galilée en faveur d'une Terre en mouvement ne parviennent à convaincre. Pour la plupart des astronomes du 17<sup>e</sup> siècle, une Terre en mouvement reste impossible. Pour ces raisons, plusieurs ne peuvent accepter le modèle de Copernic.

Par contre, plusieurs observations s'accordent bien avec les systèmes géohéliocentriques, tout en n'ayant pas les problèmes de parallaxe et des effets supposés du mouvement de la Terre. Ainsi, les systèmes géohéliocentriques sont les systèmes les plus populaires entre 1630 et 1690 environ.

## E1.9 LA CONDAMNATION DE GALILÉE

Les positions s'étant durcies depuis le début du 17<sup>e</sup> siècle, Galilée, partisan de l'héliocentrisme, est soumis à de violentes critiques dès 1610, critiques attisées par les répliques sarcastiques que Galilée adresse souvent à ses adversaires, en particulier les Jésuites. Les plus coriaces refusent même de regarder dans le télescope, prétextant que cet appareil déforme la vision et que ce qu'on observe ne correspond pas à la réalité. Cet argument peut paraître surprenant, mais il faut se rappeler que la faible qualité des lentilles de l'époque fait en sorte que les télescopes ne donnent effectivement pas toujours une image très convaincante. Même Galilée ne peut utiliser que quelques-unes des 120 lentilles qu'il a polies pour fabriquer un télescope assez bon pour lui permettre d'observer les satellites de Jupiter.

L'Église est également plus consciente des conséquences religieuses de l'héliocentrisme mis en évidence par Giordano Bruno. L'Église ne sent le besoin de condamner la théorie que lorsque les preuves la supportant commencent à être plus convaincantes. C'est finalement le 5 mars 1616 qu'elle condamne la théorie héliocentrique, condamnation qui demeurera en vigueur jusqu'en 1822. Plus précisément, on condamne le fait d'affirmer que cette théorie représente la réalité puisque cela entre en contradiction avec certains passages bibliques. On peut exposer la théorie, mais on ne peut pas affirmer qu'elle représente la réalité.

Galilée se rend alors à Rome dans l'espoir de faire révoquer cette condamnation. Alors qu'il était sûr de faire changer l'opinion du Pape, il échoue et reçoit même les remontrances et les avertissements du cardinal Bellarmino. Entre 1618 et 1623, Galilée continue d'être arrogant envers ceux qui s'opposent à l'héliocentrisme. Il n'aide pas sa cause non plus en publiant un livre critiquant et ridiculisant certaines théories des Jésuites sur les corps flottants, la nature des comètes et les taches solaires. Il faut dire que les Jésuites sont un ordre monastique qui fut fondé pour combattre la Réforme par, entre autres, l'éducation. Comme ils dépendent directement du Pape, leur influence auprès du Saint-Père est immense. Les critiquer n'aide sûrement pas la cause de Galilée. En 1623, le cardinal Barberini devient le pape Urbain VII. Galilée se rend de nouveau à Rome pour tenter de convaincre ce dernier de révoquer la condamnation. Il espère bien réussir cette fois puisque ce nouveau pape soutient les intellectuels et est un ami de Galilée. Sa demande est encore une fois refusée, mais on accorde à Galilée la permission d'écrire un livre exposant les deux théories, héliocentrique et géocentrique. Galilée ne doit toutefois pas conclure trop catégoriquement en faveur de Copernic. Galilée devient plus confiant, d'autant plus qu'une de ses dernières œuvres a reçu les éloges papaux.

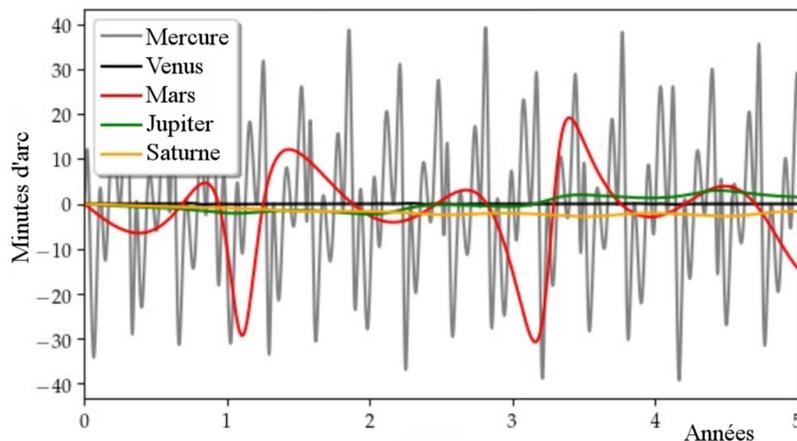
En 1632, Galilée publie son dialogue sur les deux mondes dans lequel Galilée pêche par excès de confiance et conclut trop catégoriquement en faveur de l'héliocentrisme. Partout en Europe on fait l'éloge du livre, alors qu'on est indigné à Rome. L'Église convoque alors Galilée pour le soumettre au tribunal de l'Inquisition. Ils n'ont même pas besoin de forcer Galilée à s'y rendre. Celui-ci y va de plein gré, confiant que ses arguments sont solides et qu'ils convaincront les 10 juges de l'acquitter et le Pape de révoquer la condamnation de l'héliocentrisme. Malgré tout, Galilée est condamné le 23 juin 1633. Il abjure

l'héliocentrisme pour sauver sa vie et on le traite quand même avec indulgence, vu ses 69 ans. La peine de prison à vie est commuée en une assignation à résidence jusqu'à sa mort (qui surviendra en 1642). Il est fort peu probable que Galilée ait dit les fameuses paroles « et pourtant elle se meut » signifiant que même s'il abjurait, la Terre se déplaçait quand même. De telles paroles auraient eu un effet désastreux sur le traitement réservé à Galilée par l'inquisition.

## E1.10 LE MODÈLE DE COPERNIC-KEPLER

Le système de Copernic utilise encore des orbites circulaires, des excentriques et des épicycles (et certains vont ramener des équants). Avec ces artifices, le système a une précision d'environ  $0,5^\circ$ , identique à la précision du système de Ptolémée.

Ce graphique montre l'écart entre les observations et ce qu'on peut faire de mieux avec le système de Copernic.



A Historical Method Approach to  
Teaching Kepler's 2nd law,  
Wladimir Lyra, New Mexico State  
University, USA, P7  
[arxiv.org/abs/2011.13386](https://arxiv.org/abs/2011.13386)

Avant l'invention du télescope, cet écart entre les prévisions et les observations passait inaperçu puisque les observations des positions de planètes n'étaient pas assez précises. Seules les observations de Tycho Brahe, qui ont une précision de seulement 2 minutes ( $1/30^\circ$  de degrés), permettaient de constater qu'il y avait un écart (du moins pour Mars et Mercure). C'est finalement Kepler qui hérite de la tâche de corriger le problème.

Tycho Brahe, impressionné par les travaux de Kepler, l'engage comme assistant (3 février 1600) après que Kepler, qui est protestant, ait été chassé de l'Autriche par la Contre-réforme. À ce moment, Brahe et ses assistants s'intéressent beaucoup à la planète Mars, car elle arrive en opposition avec le Soleil. Le premier assistant de Brahe, Longomontanus, patauge dans les données sur Mars, essayant de trouver les paramètres des épicycles et excentriques pour expliquer le mouvement exact de la planète dans le ciel selon le système de Brahe. Kepler demande de travailler sur l'orbite de Mars et promet d'obtenir un résultat en 8 jours. Il faudra à Kepler beaucoup plus de temps que cela. Sur son lit de mort, Brahe demande à Kepler en 1601 de continuer le travail pour démontrer que c'est son modèle planétaire qui est exact.

En travaillant sur l'orbite de Mars, Kepler est un peu chanceux. Le graphique montre clairement que Mars est la seule planète qui dévie suffisamment des prévisions du modèle de Copernic (jusqu'à 30 minutes d'arc qui est  $\frac{1}{2}^\circ$ ) pour qu'on remarque l'écart avec les observations de Tycho Brahe. Il aurait été impossible pour Kepler de découvrir la forme réelle des orbites s'il avait étudié les mouvements de Vénus par exemple. Les écarts de Mercure sont aussi assez grands, mais de sa proximité avec le Soleil fait que la planète est difficilement observable.

Kepler travaille pendant 8 ans sur les paramètres de l'orbite de Mars. Au départ, il tente de suivre les modèles en vogue (équant, excentrique, épicycle), mais sans succès. L'écart entre les positions obtenues par calcul et les positions observées reste toujours présent. Finalement, il arrive à une solution révolutionnaire décrite par ses deux lois.

- 1) Les orbites des planètes sont de forme elliptique et dont le Soleil occupe un des foyers
- 2) La loi des aires balayée qui permet de trouver la position de la planète sur l'orbite en fonction du temps.

Kepler détruit ainsi un dogme important des systèmes de Ptolémée, Copernic et Brahe. Selon Kepler, les orbites ne sont pas des cercles parfaits contrairement à ce qu'on croyait depuis que Pythagore érigea cette idée en dogme près de 2 millénaires plus tôt. Cela a dû être une conclusion particulièrement difficile à obtenir pour Kepler qui était un néoplatonicien. Cela impliquait entre autres que, pour lui, la forme circulaire revêtait une importance particulière. Cela a sûrement contribué à augmenter le temps de travail de Kepler en l'empêchant d'envisager d'autres formes que des cercles jusqu'à ce qu'il se rende compte que les cercles ne pouvaient mener à la bonne solution.

Kepler publie ses lois en 1609 dans un livre dont la lecture est très ardue. Avec les modifications proposées, le système de Copernic devient nettement plus précis, et ce, sans utiliser un seul épicycle. Le système de Copernic avec des orbites circulaires et une multitude d'épicycles a la même précision que celui de Ptolémée. Avec des orbites elliptiques sans aucun épicycle ajouté, le système de Copernic devient nettement supérieur. Les prévisions obtenues sont alors toujours en accord parfait avec les observations faites à l'époque. (On va se rendre compte plus tard qu'il y a quelques déviations lorsque les observations deviendront plus précises. Ces déviations sont dues aux perturbations.) Avec sa nouvelle théorie, Kepler calcule de nouvelles tables de position des planètes avec le système de Copernic et les orbites elliptiques. Ce sont les tables Rudolphines (1627), ainsi baptisées pour honorer l'empereur Rodolphe II qui nomma Kepler mathématicien impérial en 1601.

Les modifications apportées et l'amélioration de la précision qu'elles impliquent étaient de forts arguments pour la théorie de Copernic. À elles seules, elles ne font pas triompher l'héliocentrisme parce que le système n'était toujours pas en accord avec la physique de l'époque. De plus, les lois de Kepler ne font pas l'unanimité. Elles ne sont en fait qu'une méthode de calculs de position de planètes parmi d'autres à l'époque. (Newton connaît 7 méthodes différentes qui utilisent toutes des orbites elliptiques. Toutefois, seulement 2

de ces méthodes utilisent la loi des aires balayées.) Comme les positions de la Lune obtenues avec les lois de Kepler ne sont pas bien bonnes (l'orbite de la Lune est trop perturbée par le Soleil et les lois de Kepler ne tiennent pas compte de ces perturbations), on a encore des doutes. D'ailleurs, Galilée et Descartes n'y ont pas cru. Elles deviennent des lois uniquement après que Newton ait montré qu'elles sont une conséquence de sa loi de la gravitation.

## E1.11 L'ARRIVÉE DE LA PHYSIQUE DE NEWTON

Pendant une bonne partie du 17<sup>e</sup> siècle, c'est le système géohéliocentrique qui domine. Tant qu'on associe la force à la vitesse, on ne peut pas croire que la Terre puisse se déplacer ou tourner sur elle-même sans qu'on observe les effets de ce déplacement à la surface de la Terre. Galilée a bien fourni quelques arguments pour montrer qu'un tel mouvement est possible, mais ce n'était pas suffisant. En fait, il faut attendre la révolution de la physique par Isaac Newton en 1687 pour qu'on accepte le système de Copernic-Kepler. C'est l'étude du mouvement des planètes et des lois de Kepler qui va amener Newton à révolutionner les lois de la physique avec ses 3 lois du mouvement et sa loi de la gravitation.

### La découverte des lois de la physique et de la loi de la gravitation

Quand Christiann Huygens publie ses travaux sur le mouvement circulaire en 1673, il lance une quête qui mènera à la découverte des lois de la physique et de la loi de la gravitation. C'est dans cet ouvrage que Huygens fait la première démonstration de la formule de la force centripète ( $mv^2/r$ ) d'un objet en mouvement circulaire. Pour Huygens, il s'agit d'une force centrifuge.

Quand Robert Hooke, Christopher Wren et Edmund Halley corrigent Huygens vers 1680 en affirmant que la force est plutôt vers le centre, on commence à comprendre que le Soleil attire les planètes dans le Système solaire. Halley et Wren arrivent même à la conclusion que la force faite par le Soleil doit diminuer avec le carré de la distance. Pour arriver à cette conclusion, on commence avec le résultat de Huygens.

$$F \propto \frac{r}{T^2}$$

Ensuite, on utilise une loi que Kepler a découverte pour les planètes. Cette loi fait un lien entre les rayons des orbites et les périodes de rotation des planètes autour du Soleil. Elle dit que

$$r^3 \propto T^2$$

Avec la loi de Kepler, la formule de la force de Huygens peut être écrite sous la forme suivante.

$$F \propto \frac{r}{T^2}$$

$$F \propto \frac{r}{r^3} \quad (\text{On a utilisé la loi de Kepler})$$

$$F \propto \frac{1}{r^2}$$

(Hooke arrive aussi à cette conclusion, mais sa preuve, basée sur une force associée à  $v^2$ , est complètement erronée.)

En 1684, Halley demande à Newton comment seraient les orbites des planètes si la force de gravitation variait avec  $1/r^2$ . Cette demande lance Newton, qui ne s'était pas vraiment intéressé à la mécanique depuis la fin des années 1660, dans une étude très poussée des orbites de planètes. C'est cette étude qui l'amène à refaire complètement la mécanique en associant la force à l'accélération et qui culmine en 1687 avec la publication du livre de Newton qui révolutionne la physique à tout jamais.

C'est alors que Newton formule ses trois lois de la physique et la loi de la gravitation que l'on connaît. Toutes ces lois indiquent clairement que c'est le système de Copernic-Kepler qui devait être le bon.

Voyons comment les lois de Newton assuraient la victoire de Copernic et de Kepler.

## Les conséquences des lois de Newton

### Il n'y a pas d'effet à la surface de la Terre si elle se déplace à vitesse constante

Dans la physique de Newton, la force est associée à l'accélération par  $F = ma$  plutôt qu'à la vitesse. Avec une telle physique, il n'y a aucune différence entre ce qui se passe à la surface d'une Terre immobile et à la surface d'une Terre en mouvement à vitesse constante (comme on l'a vu au début du chapitre 3).

### Le système de Copernic-Kepler est une conséquence directe de la loi de la gravitation

Au 17<sup>e</sup> siècle, on hésite toujours entre les modèles de Copernic et les modèles géohéliocentriques comme celui de Tycho Brahe. Toutefois, les modèles géohéliocentriques ne peuvent pas s'accorder avec la gravitation de Newton. Comment pouvait-on avoir des planètes en orbites autour du Soleil qui lui-même tournait autour de la Terre ? Si les planètes tournent autour du Soleil, alors le Soleil devait être très massif. Puisque le Soleil devait tourner autour de la Terre, la Terre devait être encore plus massive que le Soleil. Mais alors, pourquoi une planète comme Mars tournerait-elle autour du Soleil alors que la gravitation l'amènerait alors à tourner autour de la Terre ?

Les lois de la gravitation pourraient s'accorder avec le système de Ptolémée si on suppose que la Terre est le corps le plus massif du système solaire. Mais alors, il devient difficile d'expliquer les phases de Vénus.

De plus, avec les 3 lois de Newton et la loi de la gravitation de Newton, on peut déduire directement que les planètes doivent suivre les trois lois de Kepler. Seul le modèle de Copernic-Kepler pouvait s'harmoniser avec les théories de Newton.

Ainsi, quelques années après la publication du livre de Newton, il ne reste plus vraiment de partisans des théories géocentriques. Il fallut donc près de 150 ans pour que les idées de Copernic s'imposent.

## **Ajout de planètes au modèle de Copernic-Kepler**

Bien après la victoire du modèle de Copernic-Kepler, on ajoute de nouvelles planètes au modèle à mesure qu'on en découvre de nouvelles. Uranus s'ajoute aux autres planètes en 1781 et Neptune s'ajoute en 1846. De nombreuses autres planètes mineures et de nombreux satellites de planète s'ajoutent également par la suite.