Nan 093

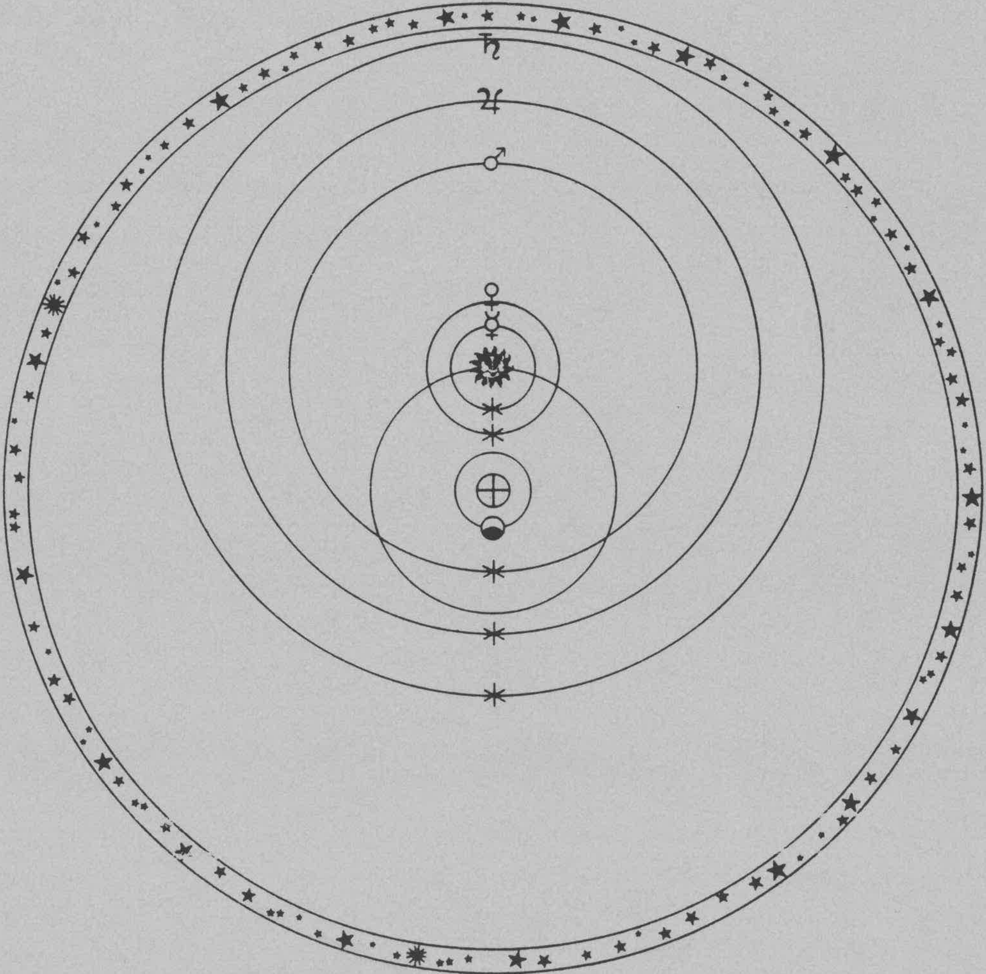
UNIVERSITE DE NANTES
INSTITUT DE RECHERCHE SUR
L'ENSEIGNEMENT DES MATHEMATIQUES
DES PAYS DE LA LOIRE

* * *

A CONSULTER
SUR PLACE

Jacques GAPAILLARD

NOTES D'HISTOIRE DE L'ASTRONOMIE



Mai 1994

40 F

AVERTISSEMENT

L'origine de ces **Notes d'Histoire de l'Astronomie** remonte aux années 1984-85 et 1985-86 où j'ai eu le plaisir d'animer des stages organisés par l'IREM de Nantes à l'intention des professeurs des classes de terminale A2. Les programmes de cette section ouvraient en effet la possibilité d'un enseignement optionnel en histoire de l'astronomie. J'avais donc rassemblé, sous la forme de notes, un assez grand nombre de données historiques et scientifiques sur l'astronomie, qui constituaient un support nécessaire pour l'animateur passionné, certes, mais encore débutant sur le sujet, que j'étais alors. C'est l'essentiel de ces notes que l'IREM de Nantes publie aujourd'hui.

Il va sans dire que ce texte hâtivement rédigé et le plus souvent réduit à une collection de faits bruts, était uniquement destiné à mon propre usage et qu'il n'avait donc pas été écrit en vue d'une quelconque diffusion. En dépit de quelques remaniements, corrections et compléments qui ont semblé souhaitables pour la présente publication, il a conservé une forme très proche de son état initial, avec les défauts inhérents à ce genre d'aide-mémoire ou de précis - présentation schématique et essentiellement chronologique, sécheresse des commentaires -, sans compter un manque d'homogénéité si l'on compare les rédactions de chapitres aux sujets pourtant similaires. Les modifications subies par la version d'origine, et notamment plusieurs apports personnels, n'ont pas davantage été de nature à masquer les emprunts que j'avais faits aux précieux articles du *Dictionary of Scientific Biography* (15 volumes, New York, Scribner, 1970-1978) qui fut, au départ, la principale source utilisée.

Depuis la haute Antiquité jusqu'à la découverte du satellite de Pluton en 1978, ces *Notes* recouvrent l'histoire de l'astronomie dite classique - excluant les apports relativement récents de l'astrophysique - sans toutefois prétendre en aborder toutes les questions. En dehors des imperfections déjà signalées, le texte pourra encore être jugé trop détaillé sur certains points et pas assez sur d'autres. Par ailleurs, on veillera à distinguer les éléments historiques des données scientifiques modernes relatives au même sujet et avec lesquelles ils sont souvent confrontés.

J'espère que ces *Notes* pourront malgré tout constituer un outil de travail acceptable, au moins pour une première approche sérieuse de l'histoire de l'astronomie. Car c'est bien, en effet, d'un outil de travail qu'il s'agit, destiné à compléter l'indispensable culture de l'enseignant, et non d'un catalogue de connaissances qui pourraient être restituées telles quelles devant une classe de lycée. En particulier, il est évident que plusieurs points sont traités avec un surcroît de détails si l'on songe à ce qu'il conviendrait de présenter aux élèves.

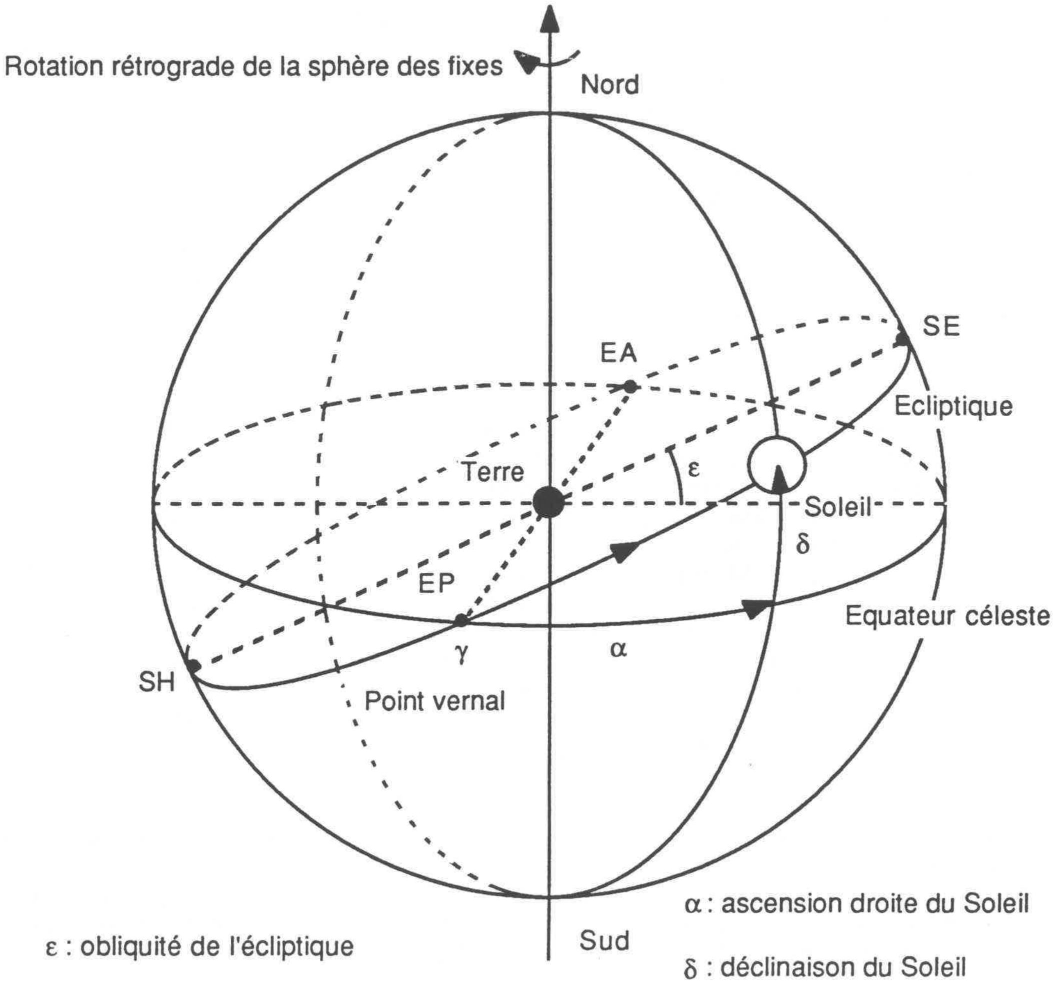
Cela dit, c'est à chacun de faire le meilleur usage de ces *Notes*, après avoir retiré, je le souhaite, quelque bénéfice de la lecture, sans doute peu attrayante au départ, d'un texte souvent dense et aride. L'enseignant le plus directement intéressé est évidemment celui qui doit aborder l'astronomie et son histoire dans le cadre d'un enseignement optionnel ou modulaire. Mais les développements historiques de l'astronomie et de la mécanique étant étroitement liés, le professeur de physique pourra aussi en tirer parti sur le plan pédagogique. Enfin, ces éléments d'histoire de l'astronomie s'adressent plus généralement à tous ceux qui désireraient tout simplement s'informer sur un sujet passionnant mais trop souvent mal connu.

Centre François Viète
Histoire et Philosophie des Sciences et des Techniques
Université de Nantes — *Jacques Gapaillard*
Mai 1994

TABLE DES MATIÈRES

1 - INTRODUCTION

Comment l'homme n'aurait-il pas été très tôt fasciné par le spectacle du ciel ? On comprend que, se sentant plus ou moins dépendant des phénomènes qui s'y déroulent, il ait, par des observations de plus en plus attentives, cherché à percer leurs mystères en dégageant les lois qui les régissent. Mais c'était là une entreprise colossale et il s'est écoulé beaucoup de temps avant que l'Astronomie, née à l'aube de l'humanité, ne dépasse le stade primitif où elle se bornait à enregistrer des constatations, des apparences.



La sphère des fixes

Ces apparences sont essentiellement les suivantes :

1) La **Terre** nous semble fixe.

2) Les **étoiles** paraissent disposées sur une sphère centrée sur l'observateur ; leurs distances angulaires mutuelles sont fixes, ce qui permet de les grouper en **constellations** immuables.

3) Cette **sphère des étoiles**, ou **sphère des fixes**, tourne autour d'un axe de direction invariable par rapport aux étoiles, ou **axe du monde**, en 24 heures, c'est-à-dire au rythme de la succession des jours et des nuits, et dans le sens rétrograde (sens des aiguilles d'une montre), l'axe étant orienté Sud-Nord.

4) Dans cette rotation, la sphère des étoiles entraîne **sept astres** : le Soleil, la Lune, Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne (auxquels correspondent les sept jours de la semaine).

5) En plus de ce mouvement d'entraînement auquel ils sont soumis, ces sept astres se distinguent des étoiles par leur déplacement plus ou moins lent parmi elles : par opposition aux étoiles fixes, ce sont les astres errants ou **«planètes»** (du grec «planêtês» : errant, vagabond). Les Anciens désignaient par «planète» aussi bien le Soleil et la Lune que les cinq *vraies* planètes visibles à l'œil nu ; ce sens large du mot sera signalé par des guillemets. Ces déplacements apparents des sept «planètes» s'opèrent avec les particularités suivantes :

> **a) Le Soleil** parcourt un grand cercle de la sphère des étoiles en 365 jours, soit à raison d'environ 1° par jour, dans le sens direct (sens contraire à celui des aiguilles d'une montre) autour de l'axe du monde. Ce cercle est l'**écliptique** dont le plan est incliné d'environ 66°1/2 sur l'axe du monde. Le soleil est l'objet d'**éclipses**.
>
> **b) La Lune** effectue un tour sur la sphère des étoiles en 1 mois, à raison de 3°1/6 par jour, soit un peu plus de 1/2 degré à l'heure, dans le sens direct. Au cours de ce périple, elle ne s'écarte de l'écliptique que d'environ 5° au maximum. Elle présente des **phases** périodiques. Comme le Soleil elle est l'objet d'**éclipses** mais, alors que les éclipses de Soleil ont toujours lieu à la nouvelle Lune, celles de Lune se produisent toujours à la pleine Lune.
>
> **c)** Les cinq autres astres errants ne s'écartent non plus jamais beaucoup de l'écliptique (pas de plus de 8° 1/2 au nord ou au sud) et se déplacent globalement dans le sens direct mais avec des **stations** (arrêts) et des phases de **rétrogradation**. De plus, leur comportement vis à vis du Soleil permet de classer ces cinq planètes en deux groupes bien distincts :
>
> - d'une part, **Mars**, **Jupiter** et **Saturne** qui peuvent occuper des positions quelconques par rapport au Soleil ;
> - d'autre part, **Mercure** et **Vénus** qui, au contraire, ne s'écartent jamais du Soleil de plus de 28° et 48° respectivement, de sorte que le Soleil semble les entraîner avec lui. Il en résulte que ces deux planètes ne sont visibles que le matin si elles se lèvent suffisamment tôt avant le Soleil, ou le soir si elles se couchent nettement après lui. Aussi est-il probable que les Anciens, observant tantôt l'Étoile du Soir et tantôt l'Étoile du Matin, n'aient d'abord pas compris qu'il s'agissait en réalité d'un seul et même astre, à savoir Vénus.

Les Égyptiens sont de très anciens observateurs du ciel. Leurs observations les conduisirent en ~4228 (en ~4236 selon d'autres) à remplacer leur calendrier de 360 jours par le **calendrier vague** de 365 jours.

Les Chinois se sont aussi depuis longtemps intéressés au ciel. On trouve la trace de l'observation d'une étoile nouvelle (nova ?) en ~2679, d'une comète en ~2316, et ils auraient observé une éclipse de Soleil le 22 octobre ~2317 (date peu sûre).

Cependant, les connaissances des Égyptiens et des Chinois n'ont pas eu d'influence sur les développements ultérieurs de l'astronomie. Il n'en est pas de même pour les Babyloniens qui ont très tôt enregistré des observations précises que les Grecs ont su exploiter plus tard pour faire de l'Astronomie une science à part entière.

2 - LES BABYLONIENS

Les premiers grands observateurs sont certainement les peuples de Mésopotamie. Les tablettes les plus anciennes qui nous soient parvenues, datant de ~2800, attestent que les Sumériens pratiquaient l'astronomie depuis longtemps déjà. Leur savoir fut transmis aux Babyloniens qui utilisaient aussi un **calendrier lunaire** pour régler la vie agricole. Dans le même but, les Babyloniens observaient des **levers héliaques** d'étoiles remarquables (jour où telle étoile redevient visible pour la première fois dans le ciel du matin). Ils avaient regroupé les étoiles en 36 puis 52 **constellations** (23 boréales, 17 équatoriales et 12 australes)

Aujourd'hui, le ciel est divisé en 88 constellations (29 boréales, 14 équatoriales, 45 australes). Elles sont d'étendues variées s'échelonnant de 68 à 1303 degrés carrés. Le degré carré est une unité d'angle solide, (la mesure de) l'angle solide d'un cône étant par définition l'aire du domaine qu'il découpe sur la sphère unité centrée en son sommet ; c'est donc, dans l'espace, l'analogue d'un angle plan. La sphère unité totale a une aire de 4π. Nous disons qu'elle correspond à un angle solide de 4π radians carrés. Comme un radian vaut $180/\pi$ degrés, 1 radian carré = $(180/\pi)^2$ degrés carrés ; donc l'angle solide de la sphère unité, ou encore l'étendue totale du ciel vaut :

$$4\pi(180/\pi)^2 = (4\text{x}180^2)/\pi \approx 41252{,}96125 \text{ degrés carrés.}$$

On voit apparaître le **zodiaque** (du grec «zôdiakos» : qui concerne les animaux), bande du ciel centrée sur l'écliptique (8° 30' de part et d'autre), vers le XII^e siècle avant notre ère. Vers ~650 il est divisé en 12 segments. Une tablette datant de ~538 décrit un zodiaque sous sa forme définitive et avec les noms des 12 constellations qui le composent, noms encore en usage aujourd'hui. Chacun des 12 segments de 30° est divisé en 3 sous-segments de 10° chacun pour mieux définir la position des astres qui se déplacent parmi les constellations zodiacales.

Notons au passage que le **système sexagésimal** de mesure des angles nous vient des Babyloniens.

Pour ce qui est des observations, les textes Mul Apin (v.~700) donnent un résumé des connaissances astronomiques à cette époque et contiennent des déductions ne pouvant résulter que d'observations étendues sur une très longue période. D'ailleurs, d'autres textes indiquent que des observations régulières de Vénus étaient faites dès ~1975 et, à propos du problème des apparitions tantôt matinales et tantôt vespérales de Vénus et de Mercure, les Babyloniens savaient qu'il s'agissait d'une même planète au moins depuis le ~XVI^e siècle pour Vénus, et depuis le ~VIII^e siècle pour Mercure. Ptolémée affirme que les Babyloniens observaient des éclipses vers ~747. En fait, la première observation d'éclipse solaire datée avec certitude remonte, d'après une tablette se trouvant au British Museum, au 15 juin ~763.

Vers cette époque, les Babyloniens savaient que les éclipses de Soleil se produisent uniquement à la nouvelle Lune et les éclipses de Lune à la pleine Lune, et ils avaient remarqué que les éclipses de Lune se succèdent approximativement à 6 mois d'intervalle. Pour les éclipses de Soleil, plus difficilement observables, il ne semble pas qu'ils aient remarqué une périodicité.

Le Saros.

On a cru longtemps, à la suite de ce qu'en a dit l'astronome britannique Edmund Halley (1656-1742), que les Babyloniens connaissaient le **Saros**, nom chaldéen donné au X^e siècle de notre ère à un cycle de 18 ans et 11 jours, qui ramène le Soleil, la Lune et la Terre presque exactement dans les mêmes positions relatives. Mais c'est probablement faux.

Prenons, par exemple, le cas des éclipses de Lune. Elles se produisent quand les deux conditions suivantes sont remplies :

1. La Lune est pleine (donc est en opposition par rapport au Soleil)
2. La Lune est dans le plan de l'écliptique.

L'intervalle entre deux pleines Lunes (ou durée d'une **lunaison**) est la **révolution synodique** de 29, 5305881 j = S (où j = jour).

L'intervalle entre deux retours de la Lune dans le plan de l'écliptique est la **révolution draconitique** de 27,2122178 j = D.

Il en résulte que si deux entiers n_s et n_d sont tels que $n_s \times S \approx n_d \times D$, la durée ainsi définie représente un intervalle entre deux éclipses de Lune (ou aussi bien entre deux éclipses de Soleil). Le Saros est obtenu pour $n_s = 223$ et $n_d = 242$ pour lesquels on a 223 S ≈ 6585,32115 j et 242 D ≈ 6585,35671 j, ce qui fait à peu près 18 ans et 11 jours (en comptant des années de 365,25 j), plus exactement 18 ans, 11 j, 8 h ou 18 ans, 10 j, 8 h selon qu'on inclut 4 ou 5 «29 février». Le résidu de 8 h entraîne un décalage de 120° vers l'ouest pour la zone de visibilité des éclipses de Soleil.

En fait, le Saros est d'autant plus remarquable pour prédire les éclipses que, après cette durée, la Lune se retrouve aussi à peu près dans la même position sur son orbite. Sans quoi, du fait de la forte excentricité de cette dernière, la Lune pourrait avoir jusqu'à plus de 6° d'avance ou de retard, ce qui suffirait à empêcher l'éclipse. Or l'intervalle entre deux passages consécutifs de la Lune à son périgée est la **révolution anomalistique** de 27,554550 j = A, et il se trouve fortuitement que 239 A ≈ 6585,53745.

Dans l'intervalle d'un Saros, on compte en moyenne 28 éclipses de Lune et 43 de Soleil (totales ou partielles), mais ces nombres doivent être portés respectivement à 43 et 70 si l'on inclut les éclipses par la pénombre.

Pour terminer, disons encore que les Babyloniens, qui croyaient à une origine divine des objets célestes, avaient surtout des préoccupations astrologiques et accompagnaient leurs observations de prédictions. L'astrologie est donc née en Mésopotamie, peut-être avant le ~VII^e siècle. Sans se désintéresser de cette question (car l'astrologie tenait une grande place en Grèce dès le ~III^e siècle et était acceptée par tous), les Grecs, tout en reconnaissant aux astres une nature divine, surent aussi se dégager de l'emprise du surnaturel et créer parallèlement l'astronomie scientifique dont ils sont les véritables initiateurs.

3 - LES GRECS DE L'ÉCOLE IONIENNE

3.1. Thalès de Milet (v.~625 - v. ~547)

C'est le fondateur de l'école ionienne , mais sa vie et son œuvre sont très mal connues et, malgré le célèbre théorème auquel son nom reste attaché (en France), sa contribution à la géométrie n'est pas claire.

Ce qui est certain, c'est que Thalès est à l'origine d'une révolution décisive dans l'histoire de la pensée. Avec Thalès, l'attitude de l'homme face à la nature, de purement contemplative, devient aussi spéculative. Les divinités continuent de présider aux phénomènes naturels, mais par l'entremise de lois qui échappent à leur pouvoir. Dans ces conditions, il prend un sens de s'interroger sur ces lois et de tenter de les découvrir. C'est la porte ouverte à toutes les spéculations, et les grecs ne vont pas manquer d'imagination pour formuler des hypothèses et échafauder des théories. Sans doute beaucoup de celles-ci nous semblent aujourd'hui naïves et fausses. Mais ceci est secondaire : mieux vaut une théorie fausse que pas de théorie du tout. L'important est de manier des idées, et il finira toujours par en sortir quelque chose. C'est donc un pas décisif qui a été franchi et Thalès nous fait assister tout simplement à la **naissance de la philosophie** : Thalès est le premier philosophe.

Quant à sa cosmologie, elle est surtout connue par les allusions d'Aristote. Thalès aurait considéré l'eau comme la matière première de toute chose et aurait eu l'idée d'une Terre flottant sur l'eau, une eau parfois agitée, ce qui explique les tremblements de terre.

Selon Hérodote (v.~484 - v.~425), Thalès se serait rendu célèbre pour avoir prédit une éclipse de Soleil qui aurait effectivement eu lieu en Ionie le 28 mai ~585. On a longtemps considéré qu'il avait dû accomplir cet exploit grâce à sa connaissance du Saros babylonien, mais on a vu que les Babyloniens ne connaissaient sans doute pas ce cycle astronomique. De plus, la prédiction d'une éclipse de Soleil, dont on sait qu'elle n'est visible qu'en certaines des régions de l'hémisphère éclairé de la Terre (contrairement aux éclipses de Lune qui sont perceptibles en tout lieu d'où la Lune est visible), est chose très difficile et tout à fait impossible à l'époque de Thalès. Il est plus vraisemblable que Thalès a été après coup crédité de cette prédiction, simplement parce qu'il était l'homme de science du lieu. C'est pour la même raison qu'Anaxagore (voir plus bas) passait pour avoir prédit la chute d'un énorme météorite à Aegospotami vers ~468 ou ~ 467 !

3.2. Anaximandre de Milet (v.~6110 - après ~546)

Élève de Thalès, il enseigne que la Terre est un cylindre aplati dont la face supérieure est seule habitée, forme qui assure à la Terre une certaine stabilité. Mais, innovant audacieusement par rapport à la pensée de son maître, il imagine cette **Terre isolée dans l'espace**, sans aucun support, au centre d'un **ciel sphérique**, opaque, contenant du feu visible seulement par des trous correspondant aux étoiles. Cette sphère ou «roue» des étoiles coexiste avec une roue du Soleil et une roue de la Lune de principes analogues.

Anaximandre serait premier à avoir donné des indications de distances, à savoir, pour les rayons des roues des étoiles, du Soleil et de la Lune, respectivement 9d, 27d et 18d, où d est le diamètre de la Terre. Il aurait ainsi placé les étoiles plus proches de nous que le Soleil et la Lune, ce qui est tout à fait invraisemblable à cause des occultations d'étoiles par la Lune, phénomènes facilement observables. D'ailleurs, d'autres historiens prétendent au contraire qu'il aurait placé le Soleil, la Lune et les planètes en deçà des étoiles.

3.3. Anaxagore de Clazomènes (v.~500 - v.~428)

Il professe que la Lune et les planètes sont, comme la Terre, de nature pierreuse et non ignée, et, reprenant une idée de **Parménide d'Élée** (v.~515 - après ~450) il affirme que **la Lune brille d'une lumière «empruntée» au Soleil**. Corrélativement, il donne la première **explication correcte des éclipses de Lune** par immersion dans l'ombre de la Terre. Mais il considère que la Terre et la Lune sont plates. Par ailleurs, il déclare que le Soleil est plus grand que le Péloponnèse.

4 - LES GRECS DE L'ÉCOLE PYTHAGORICIENNE

4.1. Pythagore de Samos (v.~560 - v.~480)

C'est un personnage des plus mystérieux, devenu au cours des siècles une figure de légende. Il n'aurait lui-même rien écrit et sa vie et son œuvre sont surtout connues par ce qu'on en a écrit deux ou trois siècles plus tard. De plus, si sa pensée a eu une influence considérable, il est difficile de savoir ce qui lui revient en propre, les générations suivantes ayant eu tendance à lui attribuer des idées ou découvertes qui pouvaient aussi bien être celles des ses disciples contemporains ou ultérieurs, et déjà Aristote (~383 - ~322) observait une certaine prudence à cet égard.

Né à Samos où il connut sans doute l'école ionienne, il voyagea beaucoup en Égypte et en Chaldée et s'initia aux mathématiques de ces pays.

Puis en ~530 (ou en ~520) il quitta Samos pour Crotone en Italie du Sud, où il fonda une communauté à la fois politique, philosophique et religieuse qui eut bientôt une influence considérable. Obligé de quitter Crotone vers ~500, il transféra son école à Métaponte près de Tarente, où il mourut.

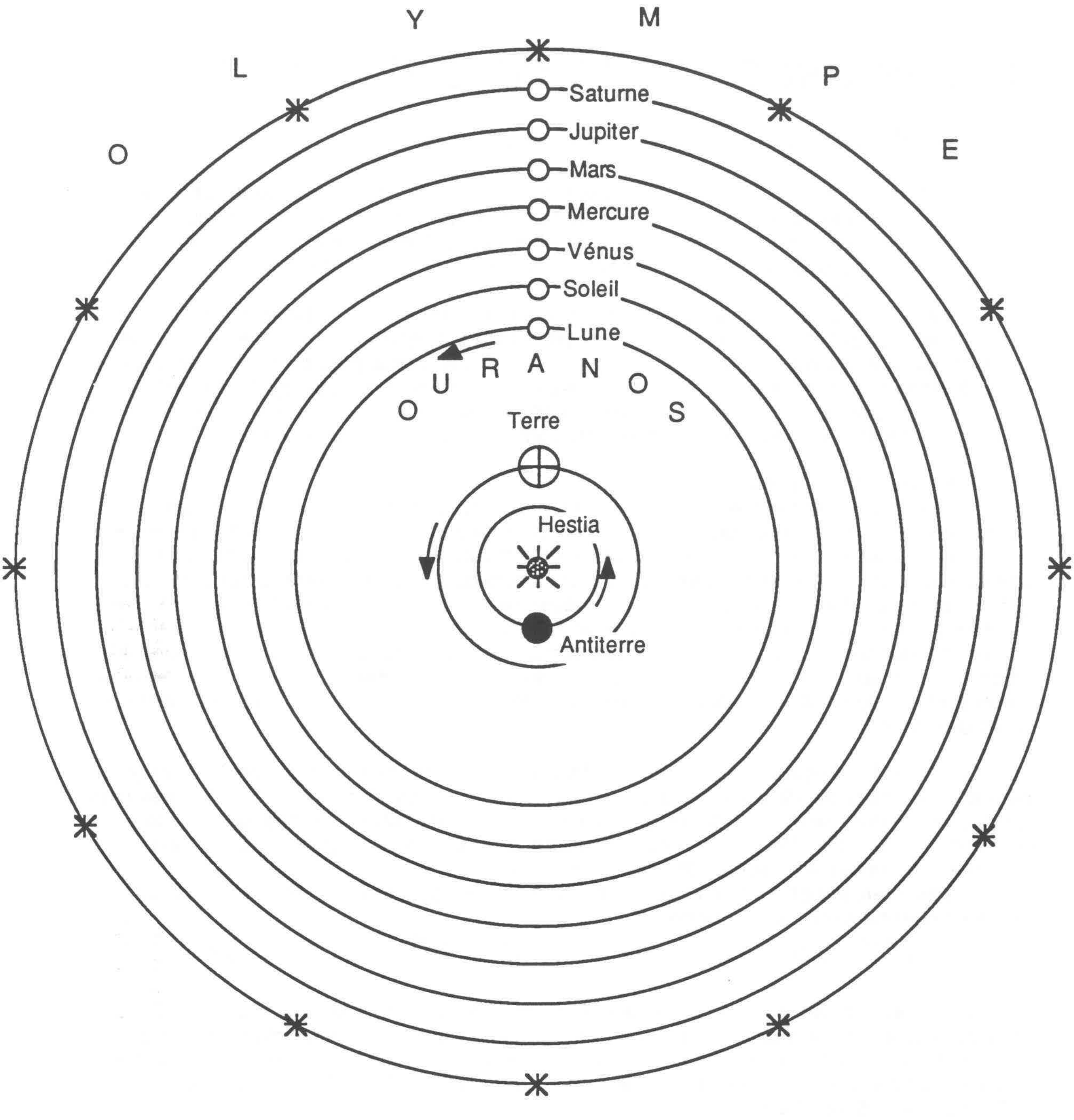
L'astronomie pythagoricienne a subi à la fois l'influence babylonienne et celle d'Anaximandre. Ainsi une tradition attribue à Pythagore la découverte de l'identité de l'Étoile du Soir et de l'Étoile du Matin, ce qu'il avait pu apprendre aussi bien des Égyptiens que des Babyloniens. De même, son célèbre théorème de géométrie énonce un résultat déjà connu des Babyloniens, et le seul mérite de Pythagore aurait peut-être été d'en donner une démonstration, sans qu'on sache laquelle. Quant aux apports proprement pythagoriciens, ils résultent essentiellement de la doctrine mystique de l'école dominée par le **culte du nombre et de la perfection géométrique**. C'est uniquement pour des raisons de cet ordre qu'apparut l'idée d'une **terre sphérique**, immobile au centre du ciel également sphérique, et celle d'**orbites circulaires** des «planètes» qui retint longtemps l'attention des astronomes. De même, toutes les «planètes» étaient supposées sphériques.

L'ordre retenu pour les «planètes» était d'abord : Lune, Mercure, Vénus, Soleil, Mars, Jupiter, Saturne, puis Mercure et Vénus furent placés au-delà du Soleil (à cette époque aucun transit de ces planètes devant le Soleil n'avait été observé). D'autre part, Pythagore mettait en relation les 7 «planètes» et les 7 notes de la gamme. Ainsi était produite une harmonie céleste inaudible par les simples mortels (car, dit Aristote, ils y baignaient depuis leur naissance) mais perceptible par le seul Pythagore, selon ses disciples. Enfin, la tradition attribue à Pythagore l'évaluation à 24° de l'inclinaison de l'équateur sur l'écliptique, due en réalité à Œnodipes de Chio au ~V^{e} siècle.

4.2. Philolaos de Crotone (v.~450 - v.~400)

Né en Italie du Sud, il vécut à Thèbes puis à Tarente. L'authenticité des quelques rares écrits de ce pythagoricien qui nous sont parvenus est partiellement contestée. Cependant, on s'accorde pour voir en lui l'auteur d'un système astronomique original (dont l'idée aurait pourtant pu être reprise de Pythagore) qui, s'il n'est pas encore héliocentrique, n'est plus géocentrique.

L'univers s'organise à partir d'un **Feu central** autour duquel la Terre décrit une orbite circulaire en 1 jour, en lui présentant toujours la même face non habitée, de sorte que ce Feu demeure invisible aux hommes. Sur une orbite plus petite et en restant opposée à la Terre par rapport au Feu central , gravite une nouvelle planète, l'**Anti-Terre**, qui demeure ainsi hors de notre vue. Les autres corps célestes tournent aussi autour du Feu mais au-delà de la Terre et dans l'ordre d'éloignement croissant suivant : la Lune, le Soleil, Vénus, Mercure (ou Mercure, Vénus ?), Mars, Jupiter, Saturne, puis la sphère des étoiles.



Le système de Philolaos

Il faut noter que le Feu central n'est pas le Soleil, lequel serait un miroir réfléchissant et concentrant vers la Terre la lumière du Feu central, ou encore, selon d'autres sources, une sorte de lentille collectant la lumière des étoiles pour la diriger vers la Terre.

Ce curieux système serait surtout dû à des exigences philosophiques, le feu, élément noble par excellence, étant seul digne d'occuper le centre de l'univers, tandis que l'Anti-Terre aurait pour unique objet de porter à 10, nombre cher aux pythagoriciens, le nombre des principaux corps célestes. Quoi qu'il en soit, la grande innovation de ce système réside dans la proposition audacieuse d'une **Terre située hors du centre de l'univers et en mouvement**, et devenant ainsi une planète semblable aux autres, nouveauté philosophique qui préfigure les systèmes héliocentriques ultérieurs.

5 - LES GRECS DE L'ÉCOLE D'ATHÈNES

5.1. Méton (seconde moitié du V^e siècle avant J.C.)

C'est sa qualité d'Athénien qui nous fait ranger cet astronome sous cette rubrique bien qu'il vécut avant la fondation de l'école d'Athènes par Platon. On sait très peu de choses de sa vie et aucun de ses écrits ne nous est parvenu. Il est considéré comme le premier astronome grec ayant fait des observations astronomiques sérieuses et on sait qu'il observa le solstice d'été le 27 juin ~432.

Méton s'est rendu célèbre pour avoir publié en ~433 un calendrier basé sur l'équivalence entre 19 années et 235 lunaisons. Autrement dit, dans ce calendrier les phases de la Lune se répètent aux mêmes dates avec une périodicité de 19 ans. Cette période de 19 ans appelée «grande année» par les Anciens est maintenant connue sous le nom de **cycle de Méton**.

Notons que les Babyloniens connaissaient probablement cette périodicité depuis le début du ~V^e siècle, et il est possible que cette connaissance soit parvenue jusqu'à Méton.

Le calendrier grec.

Le cycle de Méton est lié au type de calendrier utilisé par les grecs. Comme beaucoup de calendriers anciens, celui des grecs était avant tout un calendrier lunaire, c'est-à-dire basé sur la lunaison avec pour sous-multiple et multiple approximatifs le jour et l'année. Approximatifs car une lunaison équivaut sensiblement à 29,5 jours tandis qu'une année correspond à peu près à 365,25 jours ou 12,4 lunaisons. Aussi les améliorations successives apportées par les Grecs ont-elles pour but, en conciliant autant que possible ce qui est théoriquement inconciliable, de définir un calendrier où, d'une part, les mois comportent un nombre entier de jours modulé de façon à suivre au mieux la succession des lunaisons et où, d'autre part, l'année comporte un nombre entier de mois également modulé, cette fois-ci pour éviter la dérive des saisons au cours des années.

La première exigence fut d'abord satisfaite en faisant alterner les mois de 30 jours (*mois pleins*) et les mois de 29 jours (*mois caves*), soit un mois moyen de 29,5 jours, un peu plus court que la révolution synodique S = 29,5305881 jours. Mais l'année de 12 mois ne comportait ainsi que 354 jours. Pour répondre à la seconde exigence, on décide donc d'intercaler certaines années un 13^e mois (plein).

Cette intercalation se fit d'abord tous les deux ans, puis tous les trois ans, la durée de l'année moyenne s'en trouvant portée à :

$\frac{354 + 384}{2}$ = 369 j dans le premier cas, et $\frac{354 \times 2 + 384}{3}$ = 364 j dans le second.

La solution de Méton consiste à intercaler 7 mois tous les 19 ans, d'où $12 \times 19 + 7 = 235$ mois par cycle. On ne dispose d'aucune précision sur cette intercalation mais on sait que le cycle de Méton comportait exactement 6940 jours. Si n et n' sont respectivement les nombres de mois pleins et de mois caves par cycle, on doit donc avoir $30\,n + 29\,n' = 6940$ et $n + n' = 235$, d'où $n = 125$ et $n' = 110$.

En fait, 235 S = 6939,6882j de sorte que, à la fin du cycle, les phases de la Lune se produisent avec une avance de 0,3118 j, soit 7h 29m, sur le calendrier. De plus, 6940j font un peu plus de 19 années juliennes (365,25 x 19 = 6939,75) à l'issue desquelles la Lune aurait encore une avance de 0,0618j, soit 1h 29m, sur le calendrier.

En proposant ce cycle de 19 ans, le but de Méton était, semble-t-il, beaucoup moins d'améliorer le calendrier civil que de créer un cadre dans lequel il serait facile de dater les événements astronomiques par l'indication du jour, du mois et du rang de l'année dans le cycle. Le rang d'une année dans un cycle Méton est le **nombre d'or** intervenant dans le comput julien. L'an 1 de notre ère s'est vu attribuer *a posteriori* le nombre d'or 2. Le premier cycle de Méton commença le 27 Juin ~432, date à laquelle Méton observa le solstice d'été.

5.2. Platon (~428 - ~348)

Il aurait voyagé en Égypte et il est allé à plusieurs reprises en Sicile et en Italie du Sud où il fut en contact avec l'école pythagoricienne vers ~390. Vers ~387 (ou ~380), il fonde à Athènes **l'Académie**, école qui poursuivra ses activités jusqu'en 529.

A travers une œuvre sous forme de dialogues et qui nous est intégralement parvenue, il aborde les grands problèmes, tant politiques que philosophiques et métaphysiques. Entre autres, il développe une théorie de la connaissance où se mêlent rationalisme et idéalisme pythagoricien. En particulier, l'univers est ordonné, donc accessible à la connaissance.

Comme les pythagoriciens, Platon est fasciné par les **polyèdres réguliers**. Mais alors que Pythagore, semble-t-il, n'en connaissait que trois, à savoir le tétraèdre, le cube et le dodécaèdre, Platon, depuis la théorie formulée par Théétète (v.~415 - v.~369), connaissait aussi l'octaèdre et l'icosaèdre. En dehors de leur valeur esthétique, la fascination exercée par ces cinq polyèdres réguliers, dits aussi «solides platoniciens», tient à ce qu'il n'en existe pas d'autres. Ils sont donc nécessairement signifiants, c'est-à-dire qu'ils doivent correspondre à quelque réalité profonde de la nature. Aussi Platon les associe aux **cinq éléments** primordiaux dont les quatre premiers avaient été distingués par **Empédocle d'Agrigente** (~484 - ~424): le tétraèdre au feu, l'octaèdre à l'air, l'icosaèdre à l'eau et le cube à la terre, tandis qu'au dodécaèdre correspond un nouvel élément, l'**éther**.

Pour Platon comme pour Pythagore, l'univers est sphérique, de même que tous les astres et la Terre qui se tient immobile en son centre. Ceci étant, la cosmologie de Platon a varié dans les détails au cours de son œuvre.

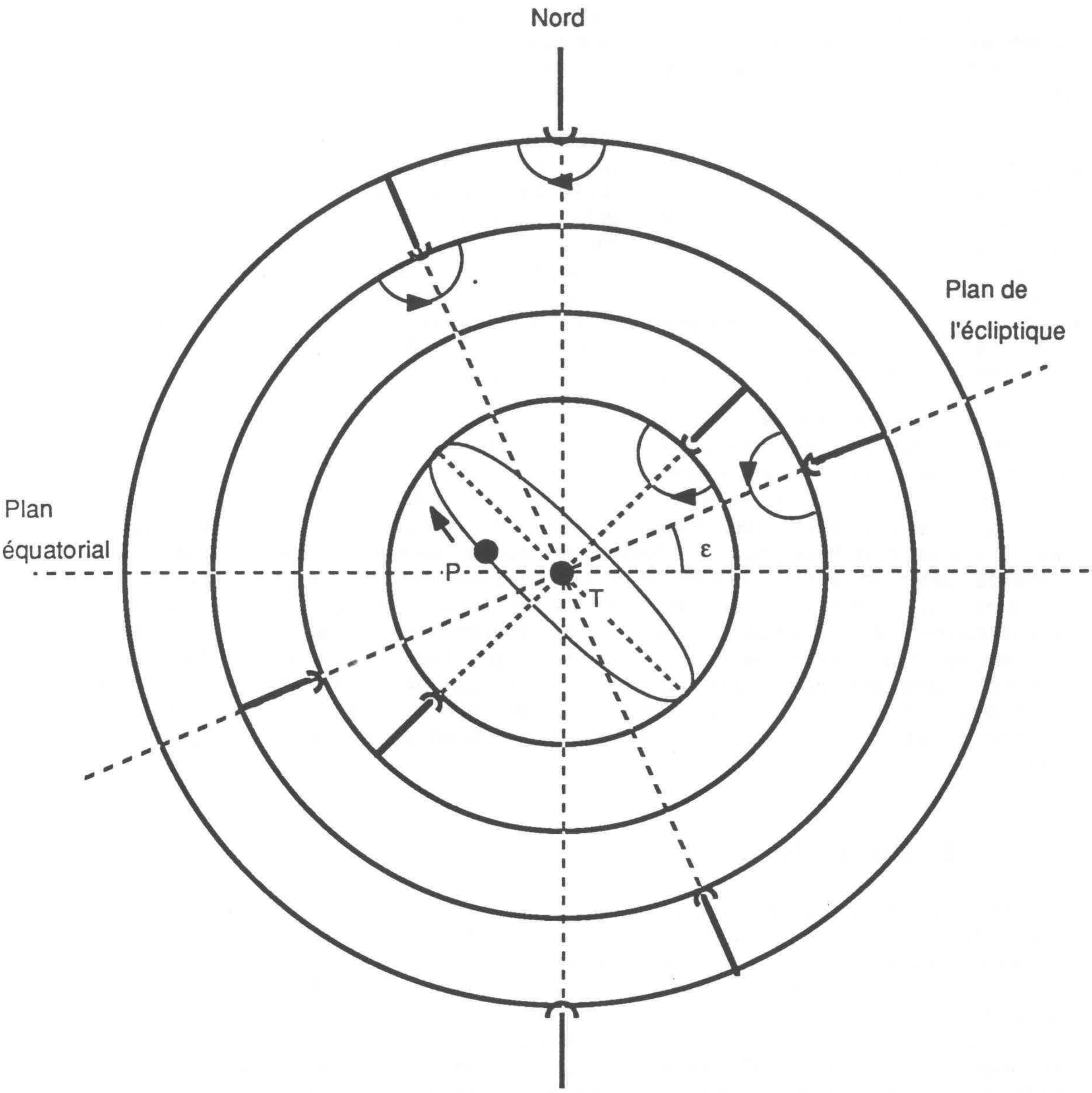
Selon le *Timée*, à partir de la Terre on trouve dans l'ordre : la Lune, le Soleil, Mercure et Vénus (ces deux planètes étaient inversées dans la *République*), enfin Mars, Jupiter et Saturne. D'autre part, le cosmos est structuré en couches sphériques concentriques. Les trois premières, celles de la terre, de l'eau et de l'air correspondent au **domaine sublunaire**. La quatrième est celle du feu où circulent les «planètes» et qui remplit le **domaine supralunaire**. Les dimensions indiquées par Platon reposent sur des considérations numérologiques dont l'interprétation n'est d'ailleurs pas très claire. Introduit plus tard dans l'*Épinomis*, l'éther prendra la place précédemment occupée par le feu, tandis que celui-ci sera repoussé vers l'extérieur. Platon est alors conduit à agrandir, mais sans préciser davantage, les domaines ci-dessus, et par suite à considérer que le Soleil est beaucoup plus grand que la Terre.

5.3. Eudoxe de Cnide (v.~400 - v.~347)

Ayant étudié la géométrie avec Architas de Tarente (~440 - ~360), il suit les leçons de Platon pendant un premier séjour à Athènes . Puis il passe plus d'un an en Égypte, notamment avec les prêtres d'Héliopolis. Ensuite il s'établit à Cyzique où il fonde une école. C'est là qu'il termine une œuvre commencée en Égypte, les *Phénomènes*, rééditée ultérieurement sous le titre du *Miroir*.

Il s'agit essentiellement d'une description du ciel d'où Eudoxe tirera plus tard son calendrier astronomique, l'***Octaétéride***, basé sur un cycle de 8 ans et comportant 99 lunaisons. Ce cycle s'obtenait par intercalation de trois 13^e mois tous les huit ans (Voir § 5.1), d'où une durée de 354x5 + 384x3 = 2922 jours, correspondant à une année moyenne de 365,25 jours et à un peu près moins de 99 lunaisons (99 S ≈ 2923,53 j). Mais, selon certains, une telle période de 8 ans était déjà connue dès le ~VIII^e siècle. Cependant, l'*Octaétéride* eut un certain retentissement et la science du calendrier fut plus tard désignée comme l'«art d'Eudoxe». Il est vrai que l'*Octaétéride* préfigure notre calendrier moderne.

Lors d'un second séjour à Athènes, Eudoxe eut des relations plus étroites avec Platon dont il est considéré comme l'élève, mais il est difficile d'évaluer leur influence mutuelle. Une tradition veut que Platon ait proposé à Eudoxe le problème de la représentation des mouvements planétaires apparents au moyen de rotations uniformes de sphères. Dans son livre *Sur les vitesses*, Eudoxe donne la solution magistrale des **sphères homocentriques** (= concentriques), toutes centrées au centre de la Terre. Mais, contrairement à la théorie platonicienne où chaque «planète» est simplement entraînée par la rotation d'une sphère, l'exigence de mouvements uniformes et la complexité des déplacements apparents des astres imposent que le mouvement de chacun d'eux soit commandé par plusieurs sphères emboîtées, (où chaque sphère intérieure tourne autour d'un axe solidaire de la sphère immédiatement extérieure), à savoir 3 pour la Lune, 3 pour le Soleil, 4 pour chacune des cinq planètes, plus la sphère des étoiles, soit en tout 27 sphères.



Système des sphères homocentriques d'Eudoxe,
pour chacune des cinq planètes

Notons qu'il ne s'agit pas ici d'une spéculation philosophique mais d'un ingénieux modèle géométrique destiné à rendre compte aussi exactement que possible de la réalité des phénomènes tels que Eudoxe les connaissait après de longues et minutieuses observations. C'est-à-dire que Eudoxe ne reconnaissait à son modèle aucune prétention à décrire la réalité physique du monde, mais y voyait seulement un artifice propre à reconstituer les mouvements apparents des astres dans le ciel, ou encore, selon l'expression platonicienne, propre à «sauver les apparences». Quant à la valeur des observations faites par Eudoxe, on peut s'en faire une idée par les révolutions synodiques (intervalle de temps séparant deux conjonctions consécutives de la planète et du Soleil) qu'il attribuait aux planètes (données modernes entre parenthèses) :

Mercure	110 j (116 j)	Vénus	570 j (584 j)
Mars	260 j (780 j)	Jupiter	390 j (399 j)
Saturne	390 j (378 j)		

On constate qu'en dehors de Mars, ces valeurs sont acceptables.

Cela étant, le système d'Eudoxe ne rend compte des déplacements réels des «planètes» qu'en première approximation, sauf pour la Lune où la représentation est assez remarquable.

Terminons par l'estimation faite par Eudoxe de la durée des saisons : 91 jours pour le Printemps, l'Été et l'Automne, et 92 jours pour l'Hiver (Méton donnait respectivement 94, 90, 90 et 92 jours).

5.4. Callipe de Cyzique (né v.~370)

Cet élève d'Eudoxe fit probablement de minutieuses observations qui révélèrent l'insuffisance du système des sphères homocentriques. Callipe vit alors la nécessité d'ajouter 2 sphères pour la Lune, 2 pour le Soleil et une pour chacune des planètes Mercure, Vénus et Mars, d'où un système de 34 sphères.

D'autre part, Callipe, vers ~330, déduisit de ses observations des valeurs étonnamment précises pour les durées des saisons, à savoir 94, 92, 89 et 90 jours pour le Printemps, l'Été, l'Automne et l'Hiver.

Callipe s'aperçut aussi que le cycle de Méton (Voir § 5.1) était un peu trop long, et il proposa alors un cycle de 76 ans composé de 4 cycles de Méton moins 1 jour, soit 6940 x 4 - 1 = 27759 jours. Or, 76 années juliennes font exactement 365,25 x 76 = 27759 jours, et 235 x 4 = 940 lunaisons font 940 S = 27758,75281 jours, de sorte qu'à la fin du cycle, les phases de la Lune se produisent avec une avance de seulement 0,24719 jours ≈ 5h 56m. Le **cycle de Callipe** est donc préférable à celui de Méton et il fut largement utilisé par la suite pour dater avec précision les événements astronomiques.

5.5. Aristote (~384 - ~322)

Né à Stagire en Macédoine, Aristote arrive en ~367 à Athènes où il fréquente l'Académie de Platon jusqu'à la mort de ce dernier en ~347. Puis il s'éloigne d'Athènes pendant 12 ans, devenant en ~342 le précepteur du futur Alexandre le Grand. Il revient ensuite à Athènes pour 12 ans où il fonde **le Lycée** (~335), connu plus tard sous le nom d'**école péripatéticienne**, et enseigne jusqu'à la mort d'Alexandre en ~323. Il quitte alors Athènes et meurt peu après à Chalcis en Eubée.

Son savoir encyclopédique embrasse l'ensemble des sciences. Ses idées et ses nombreux travaux (méthodologie et classification des sciences, physique, cosmologie, biologie, etc.) eurent une influence considérable sur la pensée scientifique, et ses conceptions prévalurent jusqu'au Moyen Age.

En ce qui nous concerne ici, elles ne furent remises en question de façon décisive qu'à partir de Copernic pour la cosmologie, en attendant que Galilée jette les bases de la mécanique moderne.

Aristote aurait observé une occultation de Mars par la Lune en avril ou mai ~357. D'autre part, il avance une **première estimation de la grandeur de la Terre** qu'il affirme sphérique : 400.000 stades de tour ce qui, avec un stade de 157m, donne un diamètre presque deux fois trop grand.

Le système d'Aristote, exposé dans son traité *Du ciel* (plus connu sous son nom latin *De cælo*), est semblable à celui de Platon. En particulier, la Terre est sphérique et immobile au centre du monde, et Aristote avance des arguments en faveur de ces deux propriétés.

D'autre part, Aristote adopte, en le complétant, le système des sphères homocentriques d'Eudoxe et Callipe. Seulement, à la différence de ceux-ci, il ne conçoit pas ces sphères comme des abstractions géométriques, mais au contraire affirme leur réalité physique, donc leur attribue une «épaisseur». L' univers d'Aristote étant exempt d'espaces vides, entre les groupes de sphères assurant le mouvement de chacune des «planètes» autour de la Terre doivent venir s'intercaler des **sphères compensatrices**. Leur rôle est à la fois de remplir l'espace entre les groupes de sphères relatifs aux différentes «planètes», et d'assurer la cohésion mécanique de l'ensemble du système tout en évitant, par des déplacements appropriés de ces sphères additionnelles, que les mouvements d'un groupe de sphères n'altèrent ceux des groupes voisins. Le nombre total des sphères du système est ainsi porté à 56.

Par ailleurs, Aristote insiste sur la distinction déjà faite par Platon, entre les **domaines sublunaire et supralunaire**. Le premier est le domaine du changement, de la corruption. Le second, en revanche, où se déplacent tous les astres, est le domaine de la pureté et de l'éternité ; personne n'y a jamais observé aucun changement : c'est la doctrine aristotélicienne de l'**immutabilité** du ciel.

Notons encore que le concept de continuité de la matière, l'absence de vide, fait écarter par Aristote les idées atomistes ainsi que les corrélations platoniciennes entre les éléments et les polyèdres réguliers (A l'exception du cube et du tétraèdre, la juxtaposition de polyèdres du même type laisse des vides).

Enfin, Aristote a développé une **théorie de la mécanique** qui lui permettait de réfuter la rotation axiale de la Terre au moyen d'un argument qui a opéré pendant plus de dix-huit siècles : si la Terre tournait, une pierre lancée verticalement ne retomberait pas sur place mais nettement à l'ouest du lanceur (cf. §11 (b1)).

5.6. Héraclide du Pont (v.~388 - v.~315)

Né à Héraclée du Pont sur la côte sud de la Mer Noire, ou Pont Euxin, il fréquente l'Académie de Platon peut-être dès avant ~360 et après la mort de Platon (~347). Il suit aussi les leçons d'Aristote. En ~339, il manque de peu d'être élu à la tête de l'Académie et retourne alors à Heraclea où il restera jusqu'à la fin de sa vie.

Aucun de ses écrits ne nous est parvenu. Des interprétations hardies de commentaires ultérieurs relatifs à ses œuvres, ont conduit certains à lui attribuer un système astronomique original par son héliocentrisme partiel. En effet, selon cette doctrine, Vénus et Mercure gravitent sur des orbites circulaires centrées sur le Soleil tandis que ce dernier et les autres «planètes» tournent autour de la Terre.

En revanche, Héraclide est certainement le premier à avoir affirmé l'immobilité du ciel et la **rotation axiale de la Terre** en 24 heures (rotation diurne). En cela au moins, il est le premier précurseur de Copernic.

Terminons en disant que certains voient en lui le promoteur de la théorie des épicycles (voir §6.2).

5.7. Aristarque de Samos (v.~310 - v.~230)

On sait peu de chose de sa vie. Il aurait étudié à Athènes, fréquentant le Lycée, ainsi qu'à Alexandrie. Il fait une observation du solstice d'été en ~280 (ou ~281).

Le seul ouvrage d'Aristarque qui nous soit parvenu est *Sur les grandeurs et les distances du Soleil et de la Lune* où sont exposées pour la première fois des méthodes géométriques conduisant aux premières **estimations scientifiques de rapports de distances et de diamètres d'astres**, même si l'imprécision des observations entraîne des erreurs substantielles. Nous examinerons plus loin les méthodes d'Aristarque.

Mais ce qui est encore plus remarquable c'est que, vraisemblablement guidé par les estimations ci-dessus, Aristarque fut le premier à proposer un **système astronomique héliocentrique**, ceci étant attesté par diverses sources, principalement par Archimède (~287 - ~212) dans son *Arénaire*. Pour Aristarque, les planètes, y compris la Terre, tournent autour du Soleil immobile au centre de l'Univers.

Cependant, pour diverses raisons, ce système génial ne connut pas le succès qu'il méritait, **18 siècles avant Copernic** :

1) Des raisons philosophiques et religieuses : il était inacceptable que l'homme ne soit plus au centre du monde, et le stoïcien Cléanthe d'Assos (~331 - ~220) déclara même qu'Aristarque devrait être condamné pour impiété.

2) L'astrologie, très en vogue dès cet époque, était essentiellement géocentrique.

3) Indépendamment des réalités physiques, il semblait plus commode aux astronomes anciens de représenter les mouvements irréguliers des astres dans un monde géocentrique, attitude qui devait aboutir au système très élaboré proposé plus tard par Ptolémée.

4) Enfin, si la Terre décrivait une vaste orbite autour du Soleil, on ne manquerait pas de percevoir un effet de **parallaxe**, c'est-à-dire une variation des écarts angulaires apparents de mêmes étoiles pour deux positions diamétralement opposées de la Terre sur son orbite. Ainsi, par un simple effet de perspective, les constellations devraient présenter des déformations périodiques annuelles.

L'objection ci-dessus était pertinente, mais elle tirait sa force de la relative proximité des étoiles enseignée par l'astronomie antique. Les Anciens, et après eux tous les astronomes jusqu'au XVI^{e} siècle, étaient en effet bien loin de soupçonner combien était immense la distance nous séparant des étoiles. Et plus les mesures d'angles gagnaient en précision, plus l'absence de parallaxe décelable confortait l'immobilité de la Terre.

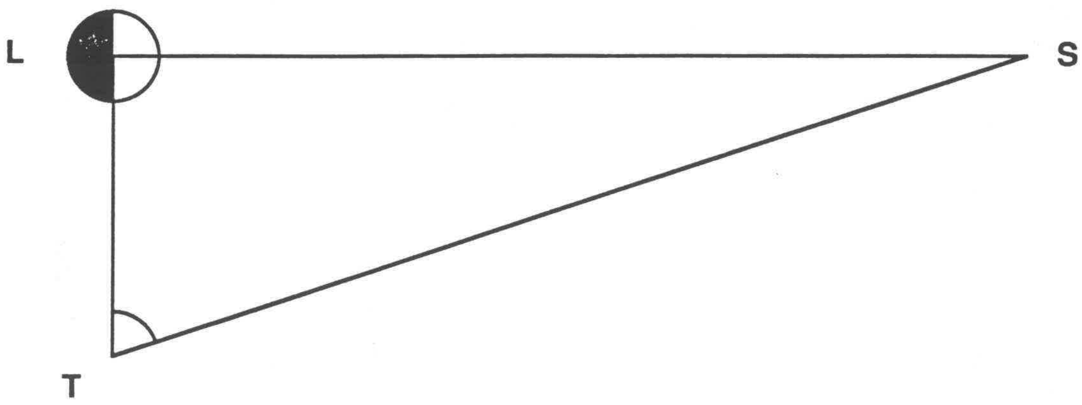
En fait, il fallut attendre 1838 pour que Friedrich Bessel (1784 - 1846) détermine la première parallaxe stellaire, celle de l'étoile 61 du Cygne qu'il trouva égale à 0",314 (proche de la valeur moderne 0",292). Cette **parallaxe annuelle** est définie comme l'angle sous lequel, depuis l'étoile, on verrait transversalement la distance Terre-Soleil (ou, plus exactement, le demi-grand axe de l'orbite terrestre, égal par définition à 1 *unité astronomique* (u.a.)). Supposons que la parallaxe d'une étoile soit de 1" (en réalité aucune étoile n'est assez proche pour cela), la distance de l'étoile (au Soleil) est alors dite de 1 *parsec* par définition (en abrégé 1 pc) (1 pc x $(1/3600)(\pi/180)$ = 1 u.a., d'où 1 pc ≈ 206265 u.a. ≈ 3. 10^{13} km ≈ 3,26 a.l. (années de lumière)).

Terminons cette question en signalant qu'Aristarque avait prévu le grand éloignement des étoiles et donc la difficulté de déceler une parallaxe. Ce qu'il en disait peut s'exprimer par l'égalité :

$$\frac{R_T}{T_S} = \frac{T_S}{R_E}$$

où R_T est le rayon de la Terre, T_S la distance Terre-Soleil et R_E le rayon de la sphères des étoiles.

Revenons maintenant aux problèmes de grandeurs et de distances.



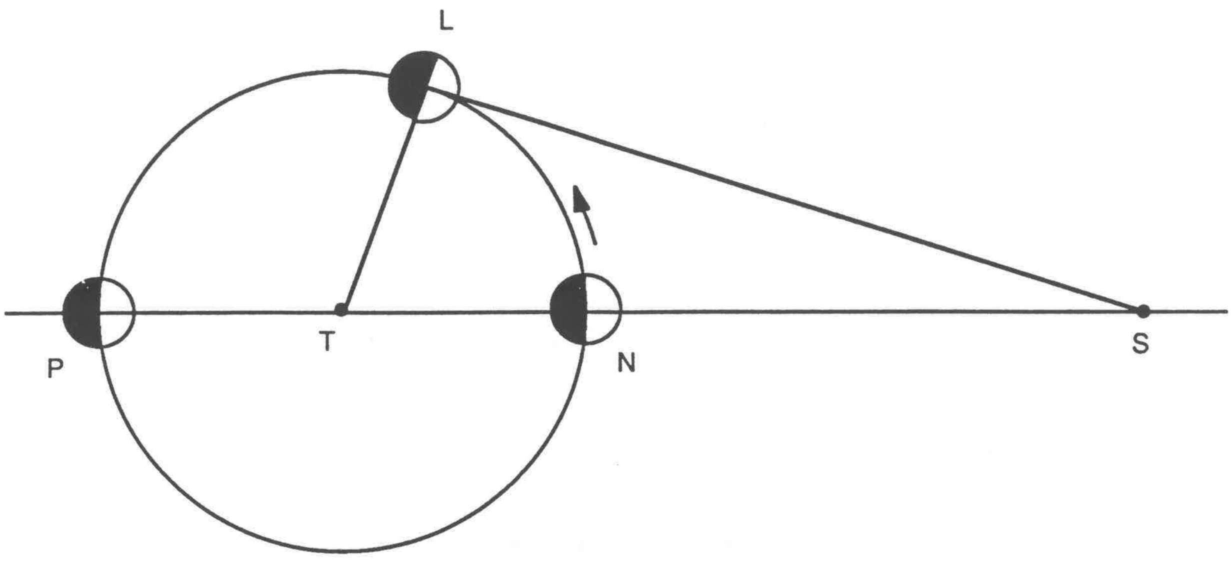
Pour comparer les distances Terre-Lune et Terre-Soleil, Aristarque se basait sur la configuration de ces astres lorsque la Lune est en quadrature (premier ou dernier quartier). Il suffit alors de déterminer l'angle $\widehat{LTS}$. Mais pour Aristarque, il y avait deux difficultés :

1) Détermination de l'époque de la quadrature ;

2) Mesure de l'angle $\widehat{LTS}$, une petite erreur pouvant avoir de grandes conséquences.

Aristarque trouva $\widehat{LTS} = 1D - \frac{1}{30} D = 87°$ d'où, par des procédés géométriques, il déduisit l'encadrement $18 \leq \frac{TS}{TL} \leq 20$. En fait, il avait $\frac{TS}{TL} = \frac{1}{\sin 3°} \approx 19{,}11$.

Une version améliorée de la méthode d'Aristarque s'obtient en remarquant que, compte tenu du mouvement de la Terre, l'intervalle de temps séparant la nouvelle Lune du premier quartier est plus court de 35 minutes en moyenne que celui qui sépare le premier quartier de la pleine Lune.



On utilise la durée de la révolution synodique de la Lune : S = 29,5305881 j . Si τ est la durée du trajet NL en jours, on a $2\tau + \frac{35}{24 \times 60} = \frac{S}{2}$, et en degrés :

$\widehat{LTS} = \frac{360}{S}\tau = \left(\frac{S}{4} - \frac{35}{48 \times 60}\right)\frac{360}{S} = 90 - \frac{35}{85}$, d'où $\widehat{TSL} = \frac{35}{85} \approx 0{,}148° \approx 8'53"$, et par suite $\frac{TS}{TL} \approx \frac{1}{\sin(8'53")} \approx 387$. On voit ainsi que $\widehat{LTS} \approx 89°\ 51'\ 7"$, alors qu'Aristarque lui attribuait la valeur de 87°.

Aristarque déduit aussi de l'observation d'une éclipse de Lune les estimations suivantes (R_S et R_L sont les rayons du Soleil et de la Lune ; les valeurs correctes figurent entre parenthèses) :

$$5832 \leq \frac{R_S}{R_L} \leq 8000 \qquad \left(\frac{R_S}{R_L} \approx 403\right)$$

$$0{,}033 < \frac{1}{30} \leq \frac{R_L}{TL} \leq \frac{2}{45} < 0{,}045 \qquad \left(\frac{R_L}{TL} \approx 0{,}0045\right)$$

$$\frac{19}{3} \leq \frac{R_S}{R_T} \leq \frac{43}{6} \qquad \left(\frac{R_S}{R_T} \approx 110\right)$$

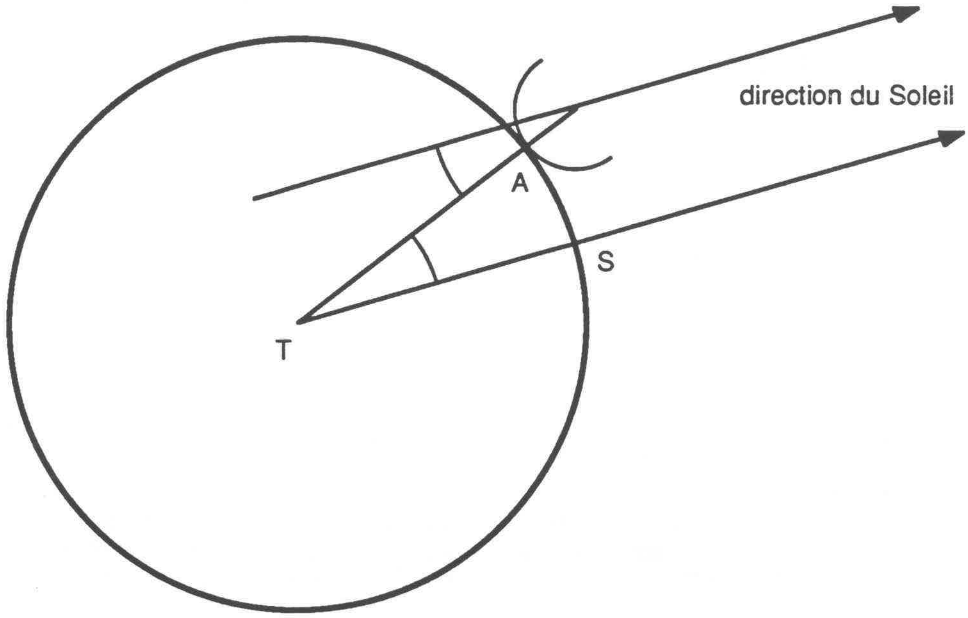
$$2{,}5 < \frac{108}{43} \leq \frac{R_T}{R_L} \leq \frac{60}{19} \approx 3{,}16 \qquad \left(\frac{R_T}{R_L} \approx 3{,}67\right)$$

Certains ouvrages modernes attribuent à Aristarque une méthode d'estimation du rapport TL/R_S également fondée sur l'observation d'une éclipse de Lune, mais en considérant que le cône d'ombre de la Terre est pratiquement cylindrique en raison de l'éloignement du Soleil. Cependant, Aristarque n'utilisait aucune approximation de ce genre, et il semble que cette version simplifiée de sa méthode, séduisante par sa simplicité même, ait été «fabriquée» *a posteriori* à des fins «pédagogiques», sans souci de l'authenticité historique.

6 - LES GRECS DE L'ÉCOLE D'ALEXANDRIE

6.1. Ératosthène (~276 - ~195)

Il naquit à Cyrène (en Lybie) et passa la majeure partie de sa vie à Alexandrie où il fut à la tête de la célèbre Bibliothèque depuis environ ~235 jusqu'à sa mort. Il fit des travaux en mathématiques et son nom est resté attaché à son fameux «crible», méthode de détermination des nombres premiers.



Mais Ératosthène se rendit surtout célèbre pour ses travaux en géographie et notamment, en ce qui nous concerne ici, pour avoir été le premier à effectuer une **estimation scientifique du rayon de la Terre**. Son calcul était basé sur les données suivantes :

1) Au solstice d'été, le Soleil se reflète dans un puits à Syène (Assouan) ; il est donc au zénith et, par conséquent, Syène est sensiblement sur le tropique.

2) Alexandrie est à peu près sur le méridien de Syène.

3) A Alexandrie au solstice d'été, l'ombre portée sur le gnomon hémisphérique ou *scaphé* (dont l'invention est attribuée à Aristarque) est de 1/50 de grand cercle.

4) La distance entre Syène et Alexandrie est estimée à 5000 stades.

On en déduit immédiatement que le méridien total mesure : 5000 x 50 = 250000 stades. Cette valeur fut ensuite corrigée à 252.000 stades. Comme le stade égyptien, sans doute utilisé par Ératosthène, vaut 157,5 m, on obtient :

$$157{,}5 \times 252000 = 39690 \text{ km}$$

pour la longueur du méridien, d'où un rayon terrestre de 6.317 km contre la valeur moyenne 6.371 km obtenue de nos jours.

Le résultat d'Ératosthène est donc d'une précision étonnante. Mais il faut noter qu'il résulte de deux erreurs qui se compensent :

1) Il existe une différence d'environ 3° (2°59') en longitude entre Syène et Alexandrie.

2) La distance entre les deux villes est de 5346 stades égyptiens.

De plus, Syène n'était pas exactement sur le tropique puisque sa latitude était de 24° 5' contre 23° 44' pour celle du tropique à l'époque d'Ératosthène, soit un écart de 21' correspondant à environ 40 km.

La forme de la Terre.

Les données actuelles sur la forme de la Terre sont les suivantes :

On appelle *géoïde* la surface des mers supposée prolongée à tout le globe. Le géoïde n'est pas une surface géométrique simple mais s'écarte peu d'un ellipsoïde de révolution aplati. Rapporté à un repère orthonormé Oxyz, un tel ellipsoïde d'axe Oz et de plan équatorial xOy a pour équation :

$$\frac{x^2+y^2}{a^2}+\frac{z^2}{b^2}=1, \qquad (o<b<a).$$

Les *méridiens* sont des ellipses toutes égales, donc égales au méridien dans le plan yOz, d'équation :

$$\frac{y^2}{a^2}+\frac{z^2}{b^2}=1.$$

Les *parallèles* sont des cercles. Le parallèle de cote z, $-b<z<b$, est le cercle dont la projection orthogonale sur le plan xOy a pour équation :

$$x^2+y^2=a^2\left(1-\frac{z^2}{b^2}\right)$$

On retient les valeurs a = 6378,140 km, avec l'*aplatissement* $\alpha=\frac{a-b}{a}=\frac{1}{298{,}257}$, d'où $b=a(1-\alpha)\approx 6356{,}755$ km.

Avec ces données, le périmètre équatorial vaut $2\pi \times 6378{,}140 \approx 40.075{,}036$ km ≈ 40075 km, tandis que chaque méridien a pour longueur 40.007,88 ≈ 40.008 km.

Quand, pour simplifier, on assimile le géoïde à une sphère de rayon R, on choisit généralement R de manière que la sphère ait même volume $\left(\frac{4}{3}\pi R^3\right)$ que l'ellipsoïde $\left(\frac{4}{3}\pi a^2 b\right)$.

D'où : $R=\sqrt[3]{a^2b}\approx 6371$ km. C'est encore sensiblement ce même rayon que l'on trouverait si l'on demandait à la sphère d'avoir la même aire que l'ellipsoïde. Mais la sphère ayant les méridiens de même longueur que ceux de l'ellipsoïde (environ 40008 km) aurait un rayon un peu plus petit, voisin de 6367,5 km.

On a donné successivement les estimations suivantes de l'aplatissement de l'ellipsoïde terrestre :

- Newton (1687) $\frac{1}{230}$
- Huygens (1690) $\frac{1}{578}$
- Convention (1799) $\frac{1}{334{,}29}$
- Delambre (1810) $\frac{1}{308{,}604}$
- Everest (1830) $\frac{1}{300{,}807}$
- Bessel (1830) $\frac{1}{299{,}1528}$
- Clarke (1880) $\frac{1}{293{,}466}$
- Hayford (1909) $\frac{1}{297}$ (adopté en 1924)
- Valeur actuelle $\frac{1}{298{,}257}$ (adopté en 1976)

6.2. Apollonius de Perge (2ème moitié du ~III^{e} s. - début du ~II^{e} s.)

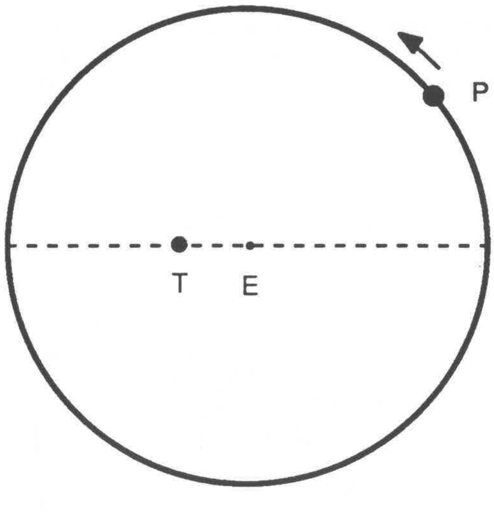
Né à Perge en Asie mineure, il est célèbre pour son étude des sections coniques. Son ouvrage *Les coniques* comportait 8 livres dont 7 nous sont parvenus en grec ou traduits en arabe. En revanche, son œuvre en astronomie ne nous est connue que par ses successeurs, mais il semble certain que Ptolémée lui doit une contribution décisive dans la **théorie des épicycles**.

L'origine de cette théorie n'est pas bien connue. On la fait souvent remonter à Héraclide du Pont mais certains pensent que Platon la connaissait et d'autres avancent que c'est une invention des pythagoriciens. Du moins Apollonius a-t-il eu le mérite de la développer.

La théorie des sphères d'Eudoxe-Callipe-Aristote qui, par l'ingéniosité des combinaisons de rotations uniformes, rendait à peu près compte de la marche des astres dans le ciel, présentait cependant un grave défaut. Il résulte en effet de ce modèle que les astres se tiennent à distance constante de la Terre. Or, ceci semble en contradiction avec les grandes variations d'éclat de Vénus et de Mars, constatées de longue date. D'autre part, on avait noté des variations du diamètre apparent de la Lune, expliquant que les éclipses centrales de Soleil peuvent être totales ou seulement annulaires.

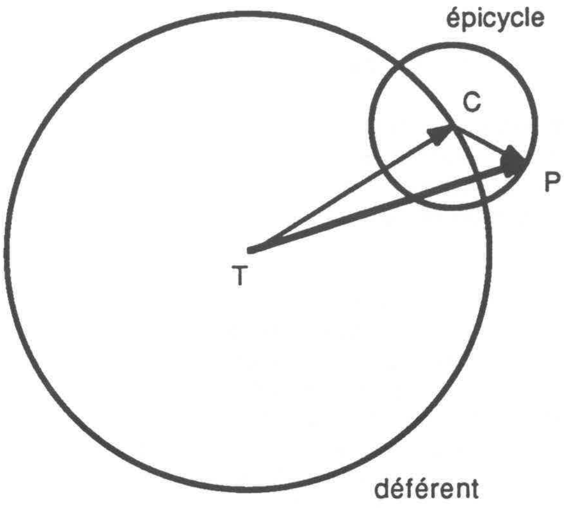
Le système des excentriques et des épicycles permettait, tout en sauvegardant le dogme platonicien du mouvement circulaire uniforme, de rendre compte non seulement du déplacement général direct des «planètes» dans le zodiaque (mouvement moyen en longitude), mais aussi des variations de leur distance à la Terre, et encore des *anomalies* (variations de vitesse, rétrogradations) observées dans leur marche le long de l'écliptique.

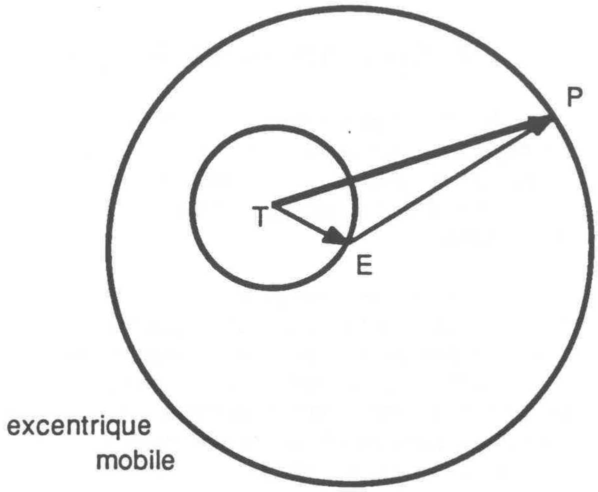
Le plus simple est, l'**excentrique** fixe, parcouru par la «planète» P d'un mouvement uniforme, et centré en E en dehors de la Terre T.



Dans le système à épicycle (1), un premier cercle, le **déférent**, centré sur la Terre T, est parcouru d'un mouvement uniforme par le centre C d'un second cercle, l'**épicycle**, qui entraîne la «planète» P dans une rotation uniforme.

Il est facile de voir que ce système est cinématiquement équivalent à celui (2) dit à *excentrique mobile*, lequel est évidemment de même nature que le précédent ; la seule différence est que, contrairement à l'usage, l'épicycle est ici plus grand que le déférent. Disons donc que l'on parle plutôt de *système à épicycle* quand l'épicycle est plus petit que le déférent, et de *système à excentrique mobile* dans le cas contraire.





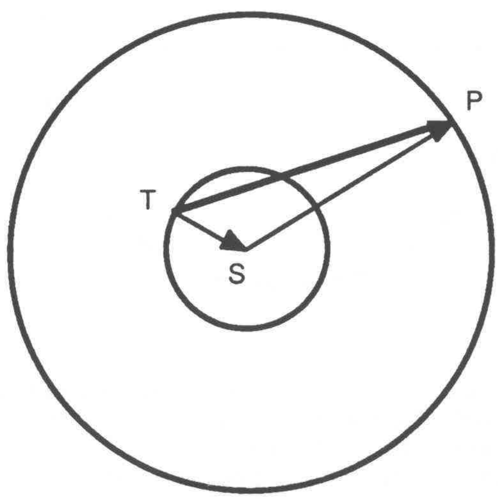
(1) (2)

Remarquons que le système à excentrique fixe entre dans ce cadre comme cas particulier si, dans la figure (1), les vitesses angulaires sont telles que CP conserve une direction fixe.

L'équivalence de ces deux systèmes fut démontrée par Ptolémée mais elle était connue d'Apollonius dont il est probable que Ptolémée a repris une démonstration.

Comme on observe que Mars a son éclat maximum lorsqu'il est en opposition avec le Soleil, sa distance doit alors être minimum et il faut donc que le centre E de l'excentrique de Mars soit aligné avec la Terre et le Soleil. On avait toujours E sur le segment TS.

Ces systèmes d'aspect très artificiel peuvent toutefois recevoir une justification. En effet, si nous considérons, pour simplifier, que la Terre T se déplace d'un mouvement circulaire uniforme autour du Soleil S, de même que la (vraie) planète (supérieure) P, nous obtenons le schéma suivant :



Or, ce système est encore équivalent au système à excentrique mobile (2), où l'excentrique serait centré sur le Soleil (la planète P aurait alors un mouvement héliocentrique). En remontant au système à épicycle (1), on voit donc que l'épicycle n'est autre que le «reflet» de l'orbite de la Terre autour du Soleil, géométriquement et même cinématiquement.

Mais, comme on le sait maintenant, les mouvements circulaires uniformes étaient inadaptés à la description de la marche des «planètes». Les représentations précédentes ne pouvaient donc être que des approximations plus ou moins valables, et les ajustements nécessités par chaque cas conduisaient à des épicycles de rayons variables selon les planètes et à des excentriques centrés hors du Soleil.

6.3. Hipparque de Nicée (1^er^ quart du ~II^e^ s. - après ~127)

On le considère souvent comme le plus grand astronome de l'Antiquité. Né à Nicée en Asie Mineure, il y commence sa carrière qui se poursuit à Rhodes à partir de ~141.

Hipparque est l'auteur de nombreuses observations astronomiques rapportées par Ptolémée et s'échelonnant entre l'équinoxe d'automne du 26 ou 27 septembre ~147 et la position de la Lune le 7 juillet ~127. D'autres observations, depuis ~162 sont aussi attribuées à Hipparque mais de façon moins certaine. On lui doit également l'amélioration des instruments d'observation de l'époque.

Il étudie la Lune et le Soleil dont il précise la théorie épicyclique en se basant sur ses propres observations mais aussi sur les données babyloniennes. Il s'intéresse en particulier, comme Aristarque, aux problèmes de grandeurs et de distances, et il parvient aux conclusions suivantes :

- diamètre apparent moyen de la Lune = $\frac{360°}{650} \approx 33'$ (valeur moderne ≈ 31') ;

- diamètre apparent du Soleil = id° (en réalité compris entre 31' 28" et 32' 32") ;

- le Soleil n'a pas de parallaxe sensible, donc sa parallaxe est plus petite que 7' (Parallaxe solaire = angle sous lequel, du Soleil, on voit transversalement le rayon équatorial de la Terre. Valeur moderne ≈ 8",8) ;

- la distance Terre-Lune est de 71 rayons terrestres (observations de l'éclipse de Soleil du 14 Mars ~190) ramenée plus tard à $67 + \frac{1}{3}$ rayons terrestres R_T (valeur correcte : compris entre 57,29 et 63,58 R_T) ;

- la distance Terre-Soleil est au moins de 490 R_T , portée plus tard à 2500 R_T (en fait, environ 23450 R_T) ;

Par ailleurs, Hipparque prédit des éclipses de Lune et de Soleil sur une période de 600 ans et dresse un catalogue d'étoiles avec 800 positions.

Mais il existe deux points forts dans l'œuvre d'Hipparque : l'**invention de la trigonométrie** et de la **découverte de la précession des équinoxes**. (De plus, il est possible qu'il soit aussi l'inventeur de la **projection stéréographique** utilisée par Ptolémée).

Trigonométrie.

Hipparque écrit un ouvrage sur les **cordes** et construit une table. Il se base sur un cercle divisé en degrés et minutes (cette habitude avait été empruntée peu avant aux babyloniens). Le rayon R exprimé aussi en minutes était donc :

$$R = \frac{360 \times 60}{2\pi} \approx 3437',75 \approx 3438'$$

Le rapport avec le sinus est le suivant : $\text{crd}\ \alpha \approx 2 \times 3438 \sin\frac{\alpha}{2}$ (en minutes).

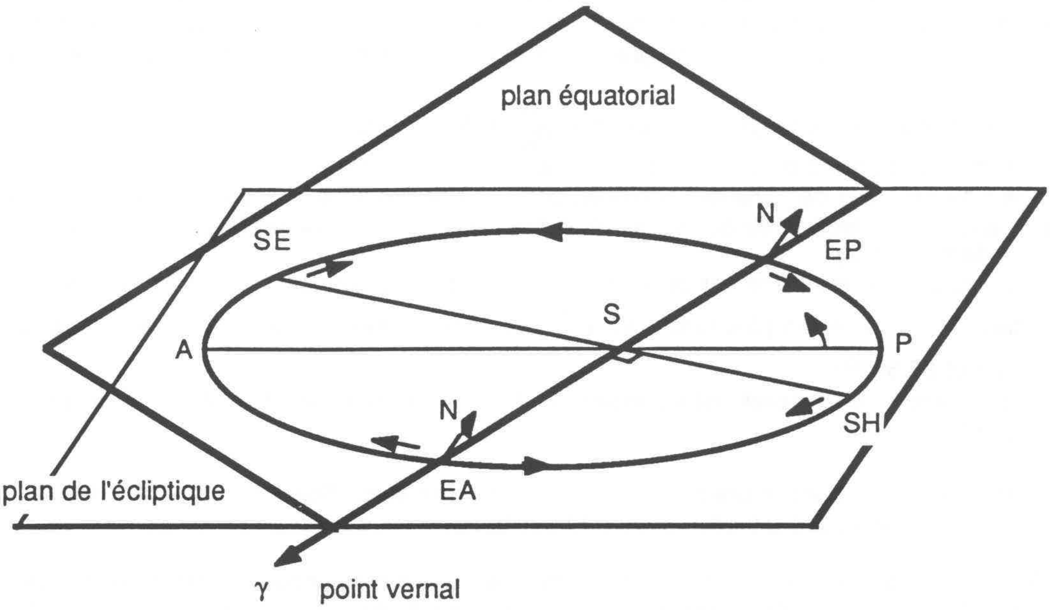
Précession des équinoxes.

On appelle ainsi le lent déplacement, dans le sens rétrograde, des équinoxes (et donc aussi des solstices) sur l'écliptique. Dans son ouvrage *Sur le déplacement des solstices et des équinoxes*, Hipparque compare la distance de l'étoile Épi de la Vierge (Spica, α Virginis), proche de l'écliptique, à l'équinoxe d'automne, d'une part en ~294 et ~293, d'autre part à son époque. Avec ces données manquant de précision, il obtient un déplacement d'environ 2° en 160 ans, dans le sens rétrograde, soit 45" par an. Plus tard, il conclura à un déplacement d'au moins $\frac{1}{100}$ de degré, soit au moins 36" par an (1° par siècle).

La valeur actuelle (1994) est d'environ 50",2896 par an (50",2675 en 1900, 49",8131 en ~150, époque d'Hipparque). Donc l'équinoxe de printemps, par exemple, accomplit un tour complet en 25780 ans environ, c'est-à-dire en près de 26000 ans. Ainsi les solstices et les équinoxes, ou plus correctement les lieux où se trouve le Soleil à ces époques (*points équinoxiaux* et *points solsticiaux*), se déplacent lentement parmi les constellations zodiacales.

A l'équinoxe de printemps, le Soleil se trouvait ou se trouve :
- dans la constellation du Taureau en ~2500 (vieil empire babylonien),
- dans la constellation du Bélier à l'époque d'Hipparque,
- dans la constellation des Poissons aujourd'hui.

On désigne par la lettre grecque γ, et on appelle **point vernal**, la position apparente du Soleil, sur la sphère des fixes, à l'équinoxe de printemps ; c'est-à-dire encore, la direction dans laquelle le Soleil est vu, depuis la Terre, à l'équinoxe de printemps.



La précession est due à l'action gravitationnelle de la Lune et du Soleil sur le renflement équatorial de la Terre. Soulignons les **conséquences importantes** suivantes de ce phénomène.

1) L'**année tropique** (intervalle séparant deux équinoxes de printemps consécutifs), qui rythme le retour des saisons, est plus courte que l'**année sidérale** (intervalle séparant deux passages consécutifs de la Terre dans l'alignement du Soleil et d'une étoile donnée du plan de l'écliptique), puisque le point équinoxial n'est pas fixe sur l'écliptique mais se déplace à la rencontre du Soleil. Actuellement la différence est d'environ

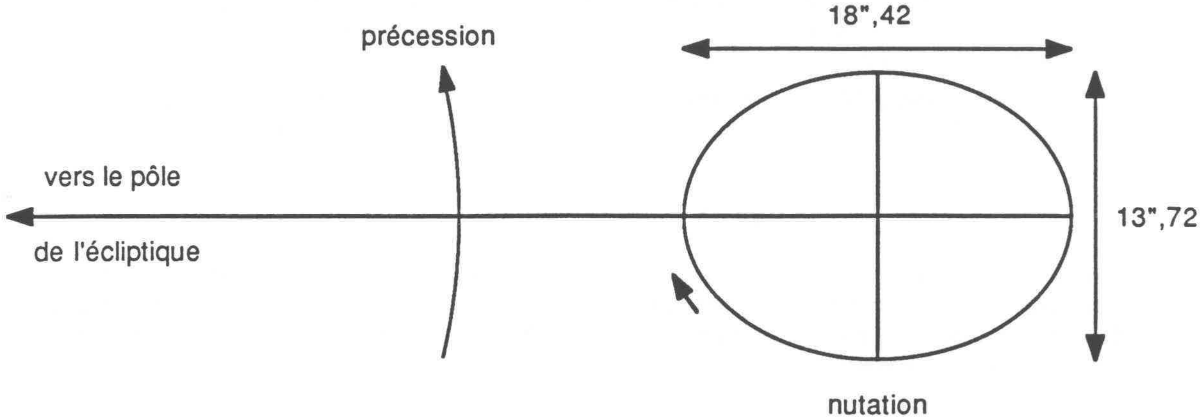
$$\frac{365,25}{360 \times 3600} \times 50,29 \times 24 \times 60 = 20\text{m } 24,56\text{s}$$

2) **La direction de l'axe de la Terre est variable.** Rapportée à un point fixe, elle engendre lentement un cône, à la manière de l'axe d'une toupie en rotation. Le pôle nord céleste décrit ainsi, en environ 26000 ans et dans le sens direct, un cercle centré sur le pôle boréal de l'écliptique et de rayon angulaire égal à l'*obliquité de l'écliptique* ε (inclinaison du plan de l'écliptique sur le plan de l'équateur céleste ou terrestre ; voir ci-dessous). Il en résulte que si l'Étoile polaire, étoile α de la Petite Ourse, est actuellement l'étoile brillante la plus proche du pôle nord céleste (en 2100 elle en sera à moins de 28'), il n'en a pas toujours été ainsi. En

~2100, l'«étoile polaire» était l'étoile α du Dragon. Le déplacement du pôle nord céleste (de même que celui du pôle sud) est d'environ 20" par an.

Autres mouvements de la Terre.

1) La nutation. Découverte par Bradley en 1737. C'est un mouvement périodique du pôle, de période 18,613 ans (soit environ 18 ans 7 mois) qui se superpose à la précession. Si la précession était nulle, le pôle céleste nord, par exemple, décrirait en 18,613 ans une petite ellipse de grand axe égal à 18",42 et dirigé vers le pôle de l'écliptique, et de petit axe égal à 13",72. Par composition avec la précession, le pôle céleste décrit une courbe sinueuse. Ce mouvement, dû à l'action de la Lune, constitue le **terme principal** de la nutation, ou nutation de Bradley, auquel s'ajoutent de nombreux autres termes à plus courte période et à faible amplitude, parmi lesquels un terme solaire de période 6 mois et un terme lunaire de période 13,66 j.



2) Variation de l'obliquité de l'écliptique. L'obliquité de l'écliptique ε diminue actuellement à raison de 46",8 par siècle. En fait, il s'agit d'un mouvement de balancement, d'amplitude 2° environ, qui s'inversera dans 10000 ans. A l'époque d'Hipparque on avait $\varepsilon \approx 23°$ 51'. Au début de l'année 1994, la valeur (moyenne, c'est-à-dire compte non tenu de la nutation) de ε est 23° 26' 24",26.

Une conséquence de ce mouvement est le déplacement des tropiques et cercles polaires à la surface de la Terre. Ainsi le cercle polaire boréal remonte lentement vers le nord d'environ 14,5 mètres par an.

En Laponie suédoise, le voyageur venant de Luleå traverse le cercle polaire peu avant d'atteindre Jokkmokk. Il en est averti par un panneau placé à l'endroit où le cercle polaire a été matérialisé par une ligne blanche en travers de la route. Mais la position de cette ligne est de temps en temps réactualisée, comme en témoignent des traces d'anciennes lignes plus au sud, encore visibles si la chaussée n'a pas été récemment refaite.

3) Variation de l'excentricité de l'orbite terrestre. Elle diminue actuellement d'environ 42. 10^{-6} par siècle. En 1900 on avait e = 0,0167505, mais en 1994, e = 0,0167111. Cette excentricité devrait encore décroître pendant environ 24000 ans, puis son sens de variation s'inversera.

4) Avance du périhélie de la Terre. La longitude du périhélie, point de l'orbite où la Terre est la plus proche du Soleil, augmente actuellement d'environ 1° 45' par siècle. Au début de l'année 1900 elle valait 101° 13' 06", et au début de 1994 elle est de 102° 50' 03". A cette notion héliocentrique de périhélie de la Terre correspond la notion géocentrique de périgée du Soleil qui avance sur l'écliptique, passant successivement par les points équinoxiaux et solsticiaux. Ainsi le périgée du Soleil coïncidait ou coïncidera

- avec l'équinoxe d'automne vers ~4000,
- avec le solstice d'hiver vers 1250,

- avec l'équinoxe de printemps vers 6400,
- avec le solstice d'été vers 11500,
- à nouveau avec l'équinoxe d'automne vers 16000,

soit un cycle d'environ 20000 ans.

6.4. Ménélaüs (fin du ~II^e s. - début du ~I^{er} s.).

On ne sait presque rien de sa vie ; peut-être est-il né à Alexandrie. Il est connu pour ses travaux en géométrie (théorème de Ménélaüs donnant une condition nécessaire et suffisante pour l'alignement de trois points appartenant aux trois côtés d'un triangle ou à leurs prolongements). D'autre part, on sait que, par comparaison de positions de l'Épi de la Vierge, il conclut à une précession de 3°55' en 391 ans, soit 36" par an, ce qui confirme le résultat obtenu par Hipparque.

Mais sa contribution la plus importante au développement de l'astronomie est contenue dans *Les Sphériques* où il expose la **trigonométrie sphérique**.

Cette discipline étudie les **triangles sphériques**, c'est-à-dire les triangles tracés sur une sphère de centre O et dont les côtés sont des arcs de grands cercles. Pour un tel triangle ABC, on désigne par A la mesure de l 'angle des plans OAB et OAC (de même pour B et C) et par a la mesure de l'angle $\widehat{BOC}$ (de même pour b et c).Il existe alors de nombreuses relations entre les quantités A,B, C, a, b, c. Par exemple : cos a = cos b cos c + sin b sin c cos A et

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

Pour réaliser l'intérêt de la trigonométrie sphérique pour l'étude des positions apparentes des astres, il suffit d'imaginer que la sphère considérée est la sphère céleste et que A et B sont des étoiles observée depuis la Terre en O ; l'angle c représente alors la distance angulaire de ces deux étoiles.

6.5. Claude Ptolémée (v. 100 - v.170)

Les seules dates certaines concernant Ptolémée sont celles de ses propres observations astronomiques, se situant entre le 26 mars 127 et le 2 février 140 ; mais il semble qu'il vivait encore sous Marc-Aurèle (161 - 180). Ses nom et prénom indiquent qu'il était égyptien d'ascendance grecque et avait acquis la citoyenneté romaine. Il vivait à Alexandrie.

Ptolémée est l'auteur de nombreux ouvrages parmi lesquels : l'*Almageste*, un vaste traité d'astronomie dont nous parlerons plus loin, avec les œuvres dérivées que sont les *Tables manuelles* et les *Hypothèses planétaires*, un traité de géographie où il fait avancer considérablement la cartographie théorique (tout en dressant des cartes aussi fausses que les précédentes car s'appuyant sur des données erronées), un traité d'optique, un traité d'acoustique, les *Harmoniques*, et enfin un traité d'astrologie, la *Tétrabible*.

C'est l'*Almageste* qui fit la célébrité de Ptolémée. Ce vaste ouvrage embrasse en 13 livres l'ensemble des connaissances des Anciens en astronomie.

Le titre grec était à l'origine *la composition mathématique* puis devint *la grande composition* (ê megistê suntaxis). L'ouvrage fut traduit en arabe vers 80 sous le titre *al-majisti*. Une traduction directe du grec en latin, faite en 1160 en Sicile, a eu peu d'influence. En revanche, la traduction d'arabe en latin en 1175 par Gérard de Crémone, sous le titre *Almagesti* ou *Almagestum*, eut un retentissement considérable. En 1538 eut lieu la première impression à Bâle. Enfin signalons que l'*Almageste* fut traduite en français par l'abbé Halma (avec des notes de l'astronome Jean-Baptiste Delambre (1749-1822)) en 1813 -1816.

Voici une description succinte du contenu de cet important ouvrage.

• **Livres I et II.**

Description du monde géocentrique que la postérité a retenu sous le nom de **système de Ptolémée**.

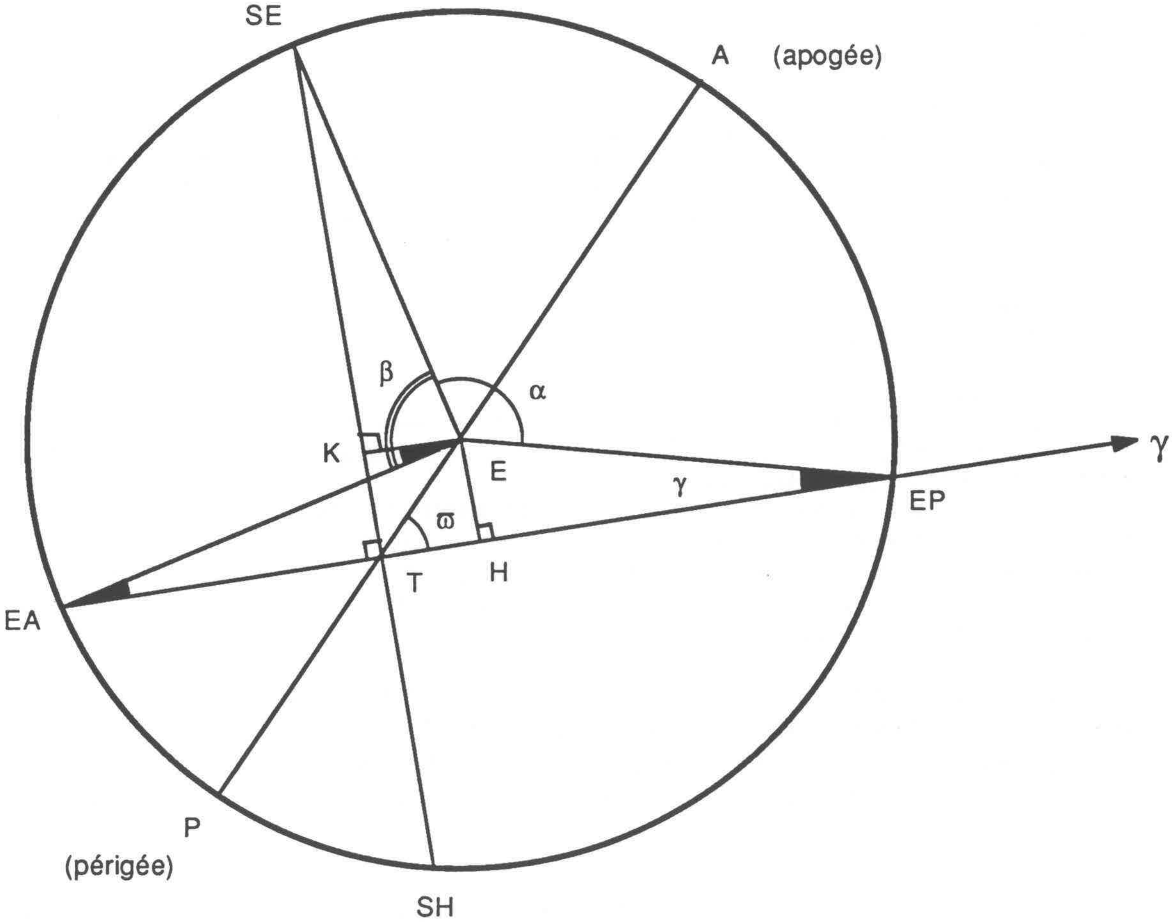
Traité de trigonométrie et une table de cordes à 3 décimales, basée sur un cercle de rayon 60, reprenant les travaux d'Hipparque.

Traité de trigonométrie sphérique, reprenant les idées de Ménélaüs.

Estimation de l'obliquité de l'écliptique : $23° \ 50' \leq \varepsilon \leq 23° \ 52'$. On rappelle qu'Ératosthène et Hipparque avaient déjà trouvé 23° 51' 20", valeur finalement adoptée par Ptolémée. En fait, vers + 150, on avait $\varepsilon \approx 23° \ 40' \ 36''$.

• **Livre III.**

Théorie du Soleil. Ptolémée adopte la même (sur)estimation de l'année tropique que Hipparque, ce qui devait entraîner de nombreuses erreurs par la suite. D'autre part, en observant les solstices et équinoxes, Ptolémée trouve les mêmes durées pour les saisons que Hipparque, à savoir : Printemps 94 j ™, Été 92 j ™, Automne 88 j • , et Hiver 90 j •. A partir de ces données (les deux premières suffisent), Ptolémée calcule les deux éléments d'une représentation de la marche du Soleil par un excentrique fixe parcouru en un an d'un mouvement uniforme, à savoir la longitude de l'apogée et l'excentricité. Hipparque avait déjà fait un calcul analogue et obtenu les mêmes résultats. Voici celui de Ptolémée mené de façon moderne.



On calcule d'abord les angles α et β. Avec une année tropique de $365{,}25 - \frac{1}{300}$ j, Ptolémée obtient, d'après le déplacement uniforme du Soleil sur son orbite:

$$\alpha = 94{,}5 \times \frac{360}{365{,}25 - \frac{1}{300}} \approx 93°{,}1425 \approx 93° \ 08' \ 33''$$

$$\beta = 92,5 \times \frac{360}{365,25 - \frac{1}{300}} \approx 91°,1712 \approx 91°\ 10'\ 17''$$

(Ces angles ont été exagérés sur la figure afin de la rendre lisible).

Pour le reste de la construction, on utilise que les solstices s'observent dans une direction perpendiculaire à celle des équinoxes. La longitude ϖ de l'apogée vérifie :

$$\operatorname{tg} \varpi = \frac{EH}{EK} = \frac{R \sin \gamma}{R \cos (\beta - \gamma)} = \frac{\sin \frac{\alpha+\beta-\pi}{2}}{\cos \frac{\beta-\alpha+\pi}{2}}$$

Il en résulte $\varpi \approx 65°,437 \approx 65°\ 26'\ 13''$. Puis on obtient l'excentricité :

$$e = TE = R \sqrt{\sin^2 \frac{\alpha+\beta+\pi}{2} + \cos^2 \frac{\beta-\alpha+\pi}{2}} \approx 0,04138\ R$$

En prenant, comme Ptolémée, R = 60 pour rayon de l'excentrique, on trouve ainsi $e \approx 2,483$. Les résultats de Ptolémée sont $\varpi = 65°,3$ et e = 2,3, tandis que Hipparque donnait e =2,5.

• **Livres IV et V.**

Ils sont consacrés à la théorie de la Lune. La théorie d'Hipparque est améliorée et le modèle épicyclique de Ptolémée rend compte de façon remarquable du mouvement de la Lune en longitude. De plus, Ptolémée découvre l'**évection**, une inégalité du mouvement de la Lune qui n'avait pas été perçue par Hipparque. C'est une inégalité en longitude de demi-amplitude 1° 16' et de période 31,81 j.

• **Livre VI.**

Il traite des éclipses.

• **Livres VII et VIII.**

Ils concernent les étoiles. Ptolémée reprend la valeur de la précession donnée par Hipparque (1° par siècle) et il dresse un catalogue des positions de 1200 étoiles (au moins 300 de plus que le catalogue d'Hipparque).

D'autre part, Ptolémée introduit un **classement des étoiles selon leur luminosité** apparente en distinguant 6 classes, les étoiles les plus brillants étant de *1ère grandeur* et celles à la limite de visibilité étant de *6ème grandeur*. Cette classification est encore utilisée de nos jours, à ceci près qu'elle est largement précisée et étendue par la notion moderne de *magnitude apparente*.

L'astronome américain Norman Pogson (1809-1891) montra en 1856 qu'une étoile de 1ère grandeur est 100 fois plus lumineuse qu'une étoile de 6ème grandeur. Un écart d'une grandeur correspond donc au rapport $\sqrt[5]{100} \approx 2,512 \approx 2,5$ entre les luminosités. La luminosité ou éclat E d'une étoile est déterminée par des procédés photométriques et on a la magnitude apparente:

$$m = C - 2,5 \log_{10} E$$

où l'on prend C =0 si l'éclat d'une étoile de magnitude apparente nulle est pris comme unité. Une telle théorie est conforme à la loi physiologique de Gustav Fechner (1801-1887), selon laquelle la sensation varie comme le logarithme de l'excitation, loi utilisée notamment en acoustique.

Les étoiles ne sont plus visibles à l'œil nu pour m>6,5.

Comme cette magnitude apparente m ne tient aucun compte de la distance de l'étoile, on définit la *magnitude absolue* M comme la magnitude apparente que posséderait l'étoile ramenée à la distance de 10 parsecs. Alors, si d est la distance de l'étoile exprimée en pc et si ω est sa parallaxe en secondes d'arc, on a :

$$m = C - 2{,}5 \log_{10} E \quad \text{et} \quad M = C - 2{,}5 \log_{10} \left[E\left(\frac{10}{d}\right)^2 \right],$$

d'où :

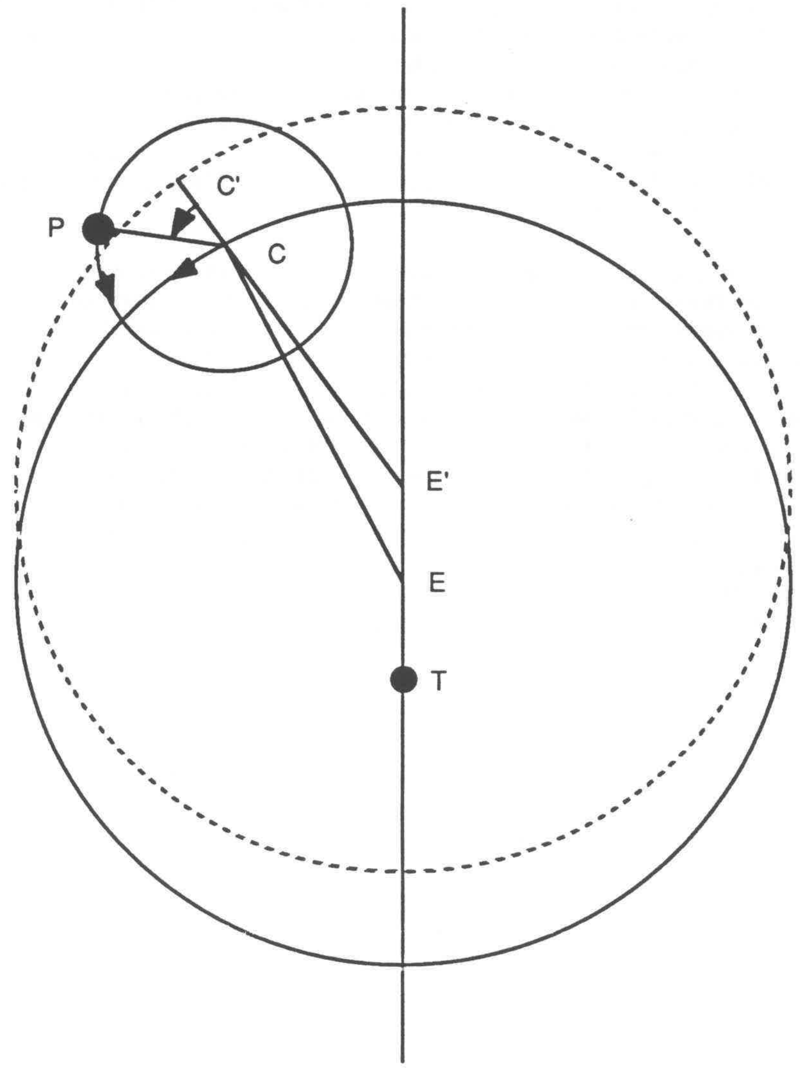
$$M - m = 5 - 5 \log_{10} d = 5 + 5 \log_{10} \omega.$$

Exemples :

ÉTOILE	MAGNITUDE APPARENTE	MAGNITUDE ABSOLUE	DISTANCE (en pc)	PARALLAXE (en ")
Soleil	-26,7	4,9	$485. 10^{-8}$	———
Sirius	-1,4	1,4	2,7	0,374
Véga	0,0	0,5	8,1	0,123
Proxima	1,1	4,5	1,33	0,751

• **Livres VIII à XIII.**

Ils traitent de la théorie des planètes. Pour mieux rendre compte de leur mouvement, Ptolémée introduit le modèle excentrico-épicyclique à **équant**.



Le point P se meut uniformément sur l'épicycle, mais le point C ne décrit pas uniformément le déférent excentrique de centre E ; son mouvement est régi par le mouvement uniforme de C' sur le cercle de centre E' tel que E soit le milieu de E'T (e = ET = EE'). Un tel système permet à Ptolémée d'obtenir la première théorie satisfaisante du mouvement des planètes, mais le dogme du mouvement circulaire uniforme y est assez malmené.

De plus, Ptolémée rend compte du mouvement des «planètes» (autres que le Soleil) en latitude, dû à l'inclinaison de leurs orbites sur l'écliptique. Il s'agit là d'un problème difficile dans le cadre inadéquat du géocentrisme, alors que la situation est en principe claire du point de vue héliocentrique. La solution de Ptolémée consiste à incliner de façon variable le déférent et l'épicycle sur l'écliptique, le contrôle de ces inclinaisons étant assuré par des cercles situés dans des plans perpendiculaires à l'écliptique et entraînant dans leur rotation les plans de l'épicycle et du déférent.

Selon Ptolémée, les «planètes» sont disposées dans l'ordre suivant à partir de la Terre :

Lune, Mercure, Vénus, Soleil, Mars, Jupiter, Saturne.

En se reportant aux ordres que nous avons déjà indiqués, on voit que les positions relatives de Mercure, de Vénus et du Soleil ont embarrassé les Anciens, et pour cause, puisque Mercure et Vénus sont tantôt plus proches, et tantôt plus éloignées de la Terre que le Soleil. Cette disposition adoptée par Ptolémée avait l'avantage de séparer les vraies planètes en deux groupes correspondant à leur comportement vis à vis du Soleil (voir l'Introduction). Cependant il est remarquable que Ptolémée s'obstine encore à placer Vénus plus proche du Soleil que Mercure alors que c'est l'inverse qui a lieu.

Cependant, ces questions de localisation spatiale des «planètes» ne jouent qu'un rôle tout à fait accessoire dans l'*Almageste*. Les systèmes de cercles relatifs à chaque «planète» fonctionnent de façon indépendante et la théorie de Ptolémée atteint valablement son but qui est, comme pour celle d'Eudoxe, de «sauver les apparences», c'est-à-dire de rendre compte des mouvements apparents des sept «planètes».

Si le XIXᵉ siècle a considéré, avec Delambre, que Ptolémée n'était qu'un astronome médiocre qui se serait borné à compiler les connaissances de ses devanciers, principalement d'Hipparque, les historiens ont aujourd'hui rendu justice à celui qui doit être regardé comme l'un des plus grands savants grecs. Sans doute ne peut-on attribuer à Ptolémée aucune découverte ou innovation vraiment originale. Mais l'ingéniosité avec laquelle il modifiait les théories existantes pour qu'elles rendent mieux compte des faits observés, ainsi que le soin apporté aux démonstrations mathématiques font de l'*Almageste* un travail de haute tenue scientifique et où l'apport personnel de Ptolémée est indéniable. Quant à l'abondante iconographie des représentations du «système de Ptolémée», elle ne donne évidemment aucune idée de la réelle sophistication de la théorie. Enfin, Ptolémée ne manque pas de citer ses sources, et nous lui sommes ainsi redevables de beaucoup de connaissances sur les œuvres perdues de ses prédécesseurs. Il est juste de reconnaître que l' *Almageste* est à la fois le résumé et le couronnement de l'astronomie grecque.

7 - L'ASTRONOMIE MÉDIÉVALE

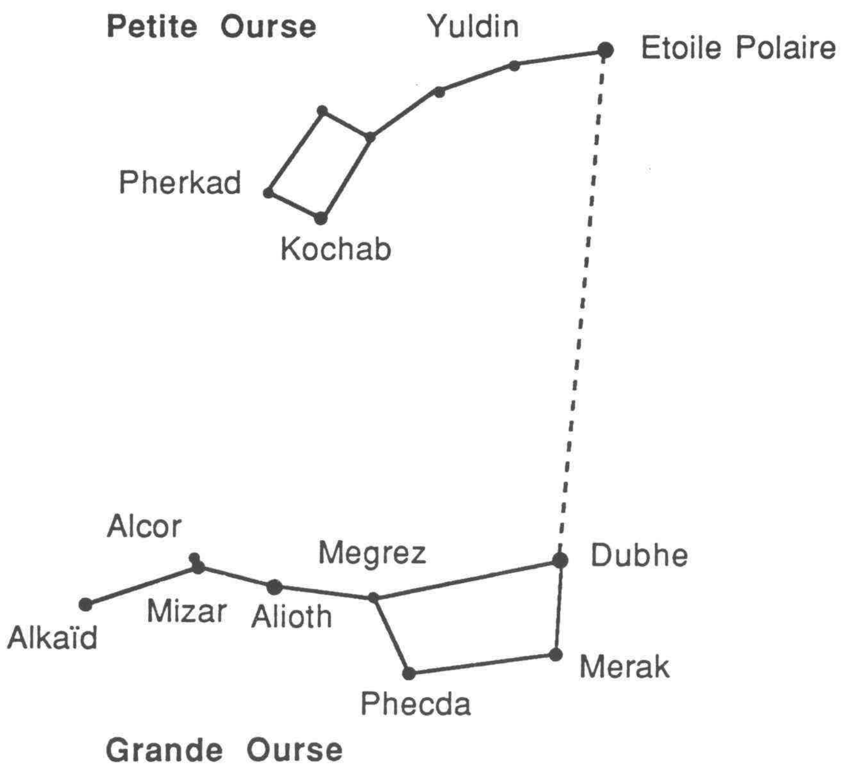
Après la brillante performance de Ptolémée, on assiste au déclin de la science grecque dès le début du III^e siècle, puis à son oubli pendant tout le haut Moyen Age. Parmi les causes de ce déclin on peut citer la chute de l'empire romain d'occident (476) ainsi que l'attitude des pères de l'Église qui voulaient détourner le monde chrétien de la science païenne. Mais autour de l'an mille, cette dernière revint en force sur le devant de la scène scientifique par **deux redécouvertes** successives.

La première redécouverte, au IX^e siècle, fut le fait des Arabes qui traduisirent et étudièrent avec enthousiasme les grands textes grecs, notamment, en ce qui nous concerne, les œuvres d'Aristote et de Ptolémée. Il subsiste des traces de l'activité des Arabes de cette époque en astronomie dans les noms qu'ils ont donné à de nombreuses étoiles et qu'elles portent encore aujourd'hui. Sans remettre en cause la théorie de Ptolémée, ils se sont attachés à l'améliorer pour rendre compte des résultats de leurs observations. Parmi les principaux astronomes arabes citons :

• **Al-Farghani** (1ère moitié du IX^{ème} siècle) dont les *Éléments*, traduits en 1135 par Jean d'Espagne et en 1175 par Gérard de Crémone, ont été très diffusés à partir de cette époque. Il trouve une obliquité de l'écliptique de 23° 33' en 857 - 858 (il aurait dû trouver 23° 35') et remarque que cette valeur diffère de celle obtenue par Ptolémée (23° 51' 20").

• **Al-Battani** (v. 855-929), le plus grand astronome arabe. Il trouve $\varepsilon = 23° 35'$, précise le mouvement du Soleil et la précession et, en trigonométrie, il introduit les sinus à la place des cordes.

• **Al-Sufi** (903 - 989) dresse un catalogue d'étoiles (en 964) à la suite duquel la plupart des étoiles les plus brillantes portent des noms arabes. Par exemple :



Notons encore que sur le catalogue d'Al-Sufi figure la nébuleuse d'Andromède. C'est seulement en 1923 que l'astronome américain Edwin Hubble (1889-1953) reconnut sa nature extragalactique et qu'il s'agit d'une galaxie semblable à la nôtre.

• **Al-Zarqali** (v. 1080) découvre le mouvement de l'apogée du Soleil sur l'écliptique, dont il estime l'avance à environ 12" par an (en réalité 1' 2").

• **Al-Shatir** (v. 1350) améliore la théorie de la Lune.

La seconde redécouverte de la science grecque eut lieu du X^e au XII^e siècle par les savants chrétiens occidentaux qui furent mis en contact avec ce savoir par l'intermédiaire des Arabes, principalement en Espagne. Ces connaissances anciennes qui avaient déjà émerveillé les Arabes suscitèrent en occident un intérêt considérable. Les difficultés qui surgirent d'abord d'incompatibilités entre la philosophie aristotélicienne et la théologie chrétienne, furent bientôt aplanies, surtout grâce aux efforts de saint Thomas d'Aquin (1227-1274), et le grand philosophe païen devint paradoxalement le savant officiel du monde chrétien. Avec l'adoption de la cosmologie d'Aristote, secondée par l'astronomie géocentrique savante de Ptolémée et par la lecture littérale de nombreux passages de la Bible, la Terre n'avait jamais été aussi fermement installée au centre de l'univers.

C'est ainsi que l'influence de l'Almageste sur l'astronomie s'est prolongée jusqu'à la fin du XVI^e siècle où les astronomes continuent à faire usage de déférents et d'épicycles.

Les plus grands astronomes du Moye Age occidental sont l'Autrichien Georg **Peuerbach** (1423-1461) et son élève l'Allemand Johannes Müller (1436-1476), plus connu sous le nom de **Regiomontanus**. Mais il faut citer aussi le Britannique Jean de **Sacrobosco** (v. 1190 - v. 1250) dont le *De sphæra mundi (la Sphère du monde)* connut un succès considérable et devint l'ouvrage de base pour l'enseignement de l'astronomie dans les universités récemment fondées. Ce fut aussi le premier livre d'astronomie imprimé, à Ferrare en 1472, après quoi il connut plus de soixante éditions jusqu'au milieu du XVI^e siècle !

8 - NICOLAS COPERNIC (1473 - 1543)

(a) Sa vie.

Nicolas Copernic est né en Pologne sur les bords de la Vistule, à Torùn (Thorn), le 19 février 1473, dans une famille aisée de marchands.

En 1491, il entre à l'université de Cracovie où il étudie l'astronomie, la dialectique, la philosophie.

Grâce à l'influence de son oncle, l'évêque Lucas Watzenrode, il est élu chanoine du chapitre de la cathédrale de Frombork (Frauenburg).

En 1496, il entreprend, pour 3 ans, l'étude du droit canon à l'université de Bologne. Conjointement il étudie la médecine, la philosophie, le grec et poursuit ses études d'astronomie.

Le 9 mars 1497, il observe une occultation d'Aldébaran par la Lune.

Le 6 novembre 1500, il observe une éclipse de Lune à Rome où il donne des conférences, sans doute en astronomie.

En 1501, il retourne en Pologne pour sa charge de Frombork, mais on le retrouve bientôt à l'université de Padoue où il étudie la médecine et le droit.

Le 31 mai 1503, il obtient le titre de docteur en droit canon de l'université de Ferrare et rentre en Pologne.

Il réside d'abord à Lidzbark Warminski où il est à la fois le médecin et le secrétaire de son oncle.

A partir de 1510 il se fixe à Frombork qu'il ne quittera plus que pour deux séjours à Olsztyn, en 1516-1519 et 1520-1521, s'occupant d'astronomie mais aussi de l'administration des biens du chapitre, ainsi que de la vie politique et de problèmes monétaires. En 1513, il fera construire à Frombork une tour d'observation munie de trois instruments.

Copernic meurt à Frombork le 24 mai 1543.

(b) Ses écrits.

Dès avant le 1er mai 1514, sans doute vers 1510-1512, il écrit le premier jet de son nouveau système astronomique : *Nicolai Copernici de hypothesibus motuum cælestium a se constitutis commentariolus (Bref exposé de Nicolas Copernic sur les hypothèses des mouvements célestes qu'il a constituées)*, appelé plus brièvement le ***Commentariolus***. Cet ouvrage, dont quelques copies seulement circulent parmi des amis de confiance, ne fut pas publié par Copernic. Il fut édité seulement en 1878. Il contient déjà l'essentiel de la théorie :

- la rotation diurne du ciel n'est qu'une apparence due à la rotation diurne de la Terre ;
- le déplacement annuel du Soleil sur l'écliptique n'est aussi qu'une apparence due à la révolution annuelle de la Terre autour du Soleil ;
- les alternances de mouvements directs et rétrogrades des planètes sont causées par le déplacement orbital de la Terre.

L'année de sa mort, en 1543, Copernic publie à Nuremberg son œuvre capitale élaborée dès 1532 : ***De revolutionibus orbium cælestium*** *(Des révolutions des orbes célestes)*. Cet ouvrage est divisé en 6 livres :

Livre I : Exposé du système du monde.
Traité de trigonométrie.

Livre II : Astronomie sphérique
Catalogue d'étoiles (observations anciennes et modernes)
Durée de l'année, précession.

Livres III à VI : Théorie du mouvement des planètes, de la Terre et de la Lune.

Craignant le scandale, Copernic a longtemps hésité à publier son œuvre. Pourtant, en 1533, le Pape Clément VII fut informé du contenu du *Commentariolus* sans émettre d'objection. En 1536, Copernic fut même invité à publier par le cardinal archevêque de Capoue, membre de la curie romaine. Mais ce n'est qu'en 1543 que Copernic se laissa convaincre par ses amis et grâce aux efforts de son élève et admirateur, l'astronome allemand **Georg Joachim Rheticus** (1514-1574) (Né à Feldkirch, ce dernier avait choisi ce nom latin pour marquer qu'il était originaire de Rhétie, ancienne province romaine incluant l'actuel Vorarlberg). Encore Copernic prit-il soin de biffer la référence à Aristarque qui figurait dans son manuscrit. On rapporte que c'est sur son lit de mort, le 24 mai 1543, que Copernic vit le premier exemplaire imprimé de son ouvrage.

Arrivé à Frombork en 1539, Rheticus se passionna pour l'œuvre de Copernic et, quelques mois plus tard, il en publiait un bref résumé, la *Narratio prima*, à Dantzig en 1540. Une seconde édition suivit à Bâle en 1541. Le succès fut immense et Copernic n'avait plus de raison de différer la publication de son œuvre. C'est Rheticus qui s'occupa de cette publication mais, à son insu et contre l'avis de Copernic, une préface fut rédigée par **Osiander**, célèbre théologien luthérien. Craignant des réactions de l'Église, celui-ci présente le système de Copernic comme un ensemble d'hypothèses d'intérêt essentiellement technique, n'ayant «pas besoin d'être vraies ni même probables ; il suffit qu'elles conduisent à des résultats compatibles avec les observations». Osiander entendait désamorcer ainsi les critiques prévisibles. Mais ce faisant il trahissait la pensée de Copernic. D'ailleurs la préface d'Osiander est en complète contradiction avec celle de Copernic qui lui fait suite, et on peut s'étonner que les historiens du XIX^{e} siècle aient pu croire qu'elle était de Copernic lui-même. On a prétendu que la mort de Copernic aurait été précipitée par la contrariété qu'il aurait éprouvée en découvrant la préface d'Osiander au début de son livre.

Une seconde édition du *De revolutionibus* eut lieu en 1566.

(c) Ses théories.

α) L'univers de Copernic est beaucoup plus vaste que celui d'Aristote et de Ptolémée, mais il est encore fini, limité par la sphère des fixes. De 20000 R_T selon Ptolémée, le rayon de cette sphère est porté par Copernic à au moins 1,3. 10^6 R_T, ceci pour réfuter par avance l'objection au mouvement orbital de la Terre liée à l'absence apparente de parallaxe.

En revanche, comme Aristote, Copernic croit à la matérialité des sphères ou orbes des planètes.

β) Les planètes circulent autour du Soleil dans l'ordre d'éloignement croissant suivant : Mercure, Vénus, Terre, Mars, Jupiter, Saturne, la Lune seule continuant à tourner directement autour de la Terre. Cette conception du monde planétaire a deux conséquences immédiates :

- l'explication des élongations maximum de Mercure (28°) et de Vénus (48°) par rapport au Soleil, puisque ces deux planètes gravitent autour du Soleil en deçà de la Terre ;
- l'explication des stations et rétrogradations des planètes par un simple effet de perspective, les planètes ne circulant pas autour du Soleil à la même vitesse angulaire que la Terre.

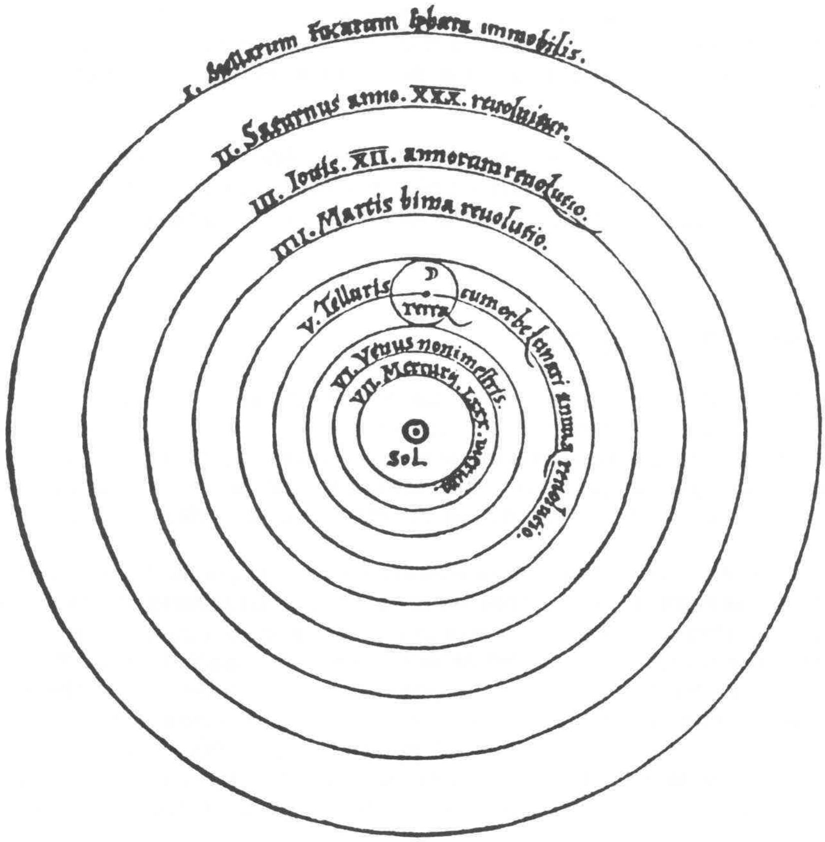
γ) Copernic continuait à sous-estimer grossièrement la distance Terre-Soleil avec 1142 R_T, ce qui est encore moins que les 1210 R_T de Ptolémée et bien loin de la réalité qui est d'environ 23500 R_T. Cependant, ses distances relatives des planètes au Soleil sont remarquablement correctes, comme le montre le tableau suivant.

Planètes	Mercure	Vénus	Terre	Mars	Jupiter	Saturne
Valeurs de Copernic	0.386	0,719	1	1,520	5,219	9,174
Valeurs modernes	0,387	0,723	1	1,524	5,203	9,555

D'autre part, la période révolution d'une planète est une fonction croissante de sa distance au Soleil.

δ) Copernic est attaché au mouvement circulaire uniforme, plus encore que Ptolémée puisqu'il refuse d'utiliser l'excentrique à équant. Par ailleurs, il reproche à Ptolémée la complexité de son système, mais comme il ne peut soutenir que les planètes se meuvent sur des orbites circulaires centrées sur le Soleil, il doit lui aussi avoir recours aux déférents, épicycles et excentriques. De plus, si l'orbite de la Terre lui fait gagner un cercle, l'abandon de l'équant nécessite l'adjonction d'un épicycle supplémentaire.

En fait, le système de Copernic est d'une grande complexité qui n'apparaît pas sur les représentations habituelles, à commencer par celle donnée dans le *De revolutionibus* (reproduction ci-dessous), et Copernic a besoin de presque autant de cercles que Ptolémée.



ε) En ce qui concerne l'explication du déplacement des planètes en latitude, on se souvient que le cadre géocentrique de Ptolémée était tout à fait inadapté puisque les mouvements planétaires y sont directement rapportés au centre de la Terre. La solution du problème passe évidemment par l'héliocentrisme puisque nous savons bien que les plans orbitaux des planètes passent par le centre du Soleil.

Cependant, si le système de Copernic est globalement héliocentrique, il ne l'est pas dans le détail. En fait, chez Copernic, le Soleil se borne à éclairer le monde et ne joue strictement aucun rôle dans la marche des planètes Les plans orbitaux de celles-ci ne passent pas par le centre du Soleil, mais par un point distinct qui est le centre de l'orbite terrestre. C'est dans cette erreur regrettable que réside l'échec de la théorie copernicienne puisque Copernic, alors qu'il était si près de la solution, doit encore avoir recours à des artifices semblables à ceux utilisés par Ptolémée, pour expliquer, d'ailleurs assez mal, les mouvements des planètes en latitude.

Paradoxalement, c'est pour la théorie de la Lune (où l'héliocentrisme n'a aucune incidence) que Copernic obtient vraiment une simplification en supprimant l'équant, et avec des résultats encore meilleurs que ceux de Ptolémée.

ζ) Aux mouvements diurne et annuel de la Terre, Copernic ajoute un **mouvement en déclinaison** pour expliquer la stabilité de la direction de l'axe de la Terre malgré sa révolution autour du Soleil. Copernic pensait en effet, qu'abstraction faite de sa rotation axiale, la Terre était rigidement liée à un orbe sphérique matériel dont la rotation l'entraînait dans sa révolution annuelle. L'axe de la Terre n'étant pas perpendiculaire au plan de l'écliptique, il est clair que, dans ces conditions, il ne conserverait pas une direction fixe et le mouvement en déclinaison imaginé par Copernic avait pour objet de compenser cette déviation de l'axe terrestre. Copernic avait même prévu une légère surcompensation, expliquant ainsi ,de façon moderne, la précession des équinoxes par un lent mouvement conique de l'axe de la Terre.

η) La précession de 50" par an était regardée par Copernic comme une moyenne. De même, l'obliquité de l'écliptique évaluée par Ptolémée à 23° 52' et par Copernic à 23° 28', était considérée par Copernic comme oscillant de 24' sur une longue période. Enfin, Copernic a d'abord cru à la fixité de l'aphélie de la Terre. Pourtant Ptolémée situait l'apogée du Soleil 24° 30' avant le solstice d'été, mais cette avance n'était plus que de 12° 10' selon Al-Zarqali, et 7° 43' selon Al-Battani. Copernic est revenu plus tard sur sa première opinion mais il a contesté les observations des arabes et a attribué à l'aphélie de la Terre un mouvement annuel de 25" (en réalité supérieur à 1').

θ) Copernic a réfuté les objections de Ptolémée et d'Aristote au mouvement axial de la Terre. Pour lui cette rotation n'a pas d'effets visibles car l'air, les nuages et tous les objets qui nous entourent sont de nature terrestre et participent donc naturellement à la rotation de notre planète.

d) L'attitude de l'Église.

Si l'Église catholique a tardé à réagir, les luthériens ont, eux, immédiatement condamné la doctrine copernicienne comme contraire aux Écritures.

Dans le monde catholique, l'opposition est d'abord venue de l'Université où la théorie de Copernic s'oppose à la tradition philosophique. Même les professeurs acquis aux idées de Copernic ont continué à enseigner l'astronomie de Ptolémée pour des raisons pédagogiques de simplicité.

Mais avec le durcissement de la Contre-Réforme après le concile de Trente (1545-1563), l'Église intervient directement dans le débat en condamnant **Giordano Bruno** (1548-1600). A travers une œuvre parfois obscure et souvent provocatrice, ce philosophe de la nature milite en faveur des idées coperniciennes. Il va même au-delà en proposant un univers infini, tant par ses dimensions que par son contenu, peuplé d'une infinité de mondes semblables au nôtre. Il s'oppose ainsi violemment à la pensée aristotélicienne et aux Écritures. Arrêté par l'Inquisition de Venise en 1592 , il fut finalement excommunié et mourut sur le bûcher à Rome, le 17 février 1600. Ses livres furent évidemment mis à l'*Index*, sort que partagea le *De revolutionibus* en 1616 et pour deux siècles, ce qui n'empêcha pas l'ouvrage de Copernic d'être largement diffusé en Europe.

9 - TYCHO BRAHÉ (1546-1601)

14 décembre 1546 : naissance de Tycho Brahé en Scanie (au Danemark à l'époque, maintenant en Suède), dans une famille de la vieille noblesse danoise.

1559 -1562 : études à l'université luthérienne de Copenhague.

21 août 1560 : une éclipse partielle de Soleil prédite se produit à Copenhague. Tycho Brahé se passionne alors pour l'observation astronomique et se procure des éphémérides.

1562 : études à l'université de Leipzig. Il est censé y faire des études de droit sous la surveillance d'un tuteur. Il poursuit secrètement l'étude de l'astronomie et se procure encore trois tables astronomiques.

Août 1563 (autour du 23) : il observe une conjonction de Jupiter et Saturne. Tycho Brahé est frappé par le fait que les tables astronomiques prédisent mal le phénomène (de 1 mois à quelques jours d'écart). Il considérera plus tard que cet événement fut décisif dans sa carrière.

1er mai 1564 : début des observations de Tycho Brahé avec un matériel rudimentaire.

1566 : études à l'université de Rostock.

28 octobre 1566 : observation d'une éclipse de Lune.

6 décembre 1566 : Tycho Brahé perd son nez dans un duel avec un autre danois. Il portera un prothèse censée être en or et argent, mais plutôt en cuivre comme on s'en est aperçu lors de l'ouverture de sa tombe le 24 juin 1901.

9 avril 1567 : observation d'une éclipse de Soleil partielle.

1568 : inscription à l'université de Bâle.

1569-1570 : séjour à Augsbourg. Tycho Brahé se fait construire des instruments :
- un grand quadrant pour mesurer la hauteur des astres, d'environ 19 pieds de rayon (plus de 6 m) ;
- un sextant de 5 pieds 1/2 de rayon (environ 1,80m) pour mesurer des distances angulaires ;
- un grand globe de 5 pieds (1,60m) de diamètre pour y inscrire les résultats des observations (sur ce globe 1' équivaut à environ 0,5 mm).

Il est donc clair qu'à cette époque il avait déjà le projet de refaire la carte du ciel.

11 novembre 1572 : à l'abbaye de Heridsvad, Tycho Brahé observe une **supernova** dans la constellation de Cassiopée. L'observation se poursuivra jusqu'à la fin de mars 1574.

Tycho Brahé reconnaît qu'il s'agit d'une étoile, ou du moins d'un phénomène localisé dans le domaine des étoiles. Il entame ainsi le dogme aristotélicien de l'immutabilité du ciel, même si l'interprétation qu'il proposait de ce phénomène extraordinaire ne s'opposait pas directement à l'opinion d'Aristote.

Jusqu'à présent, il n'y a eu que deux ou trois autres observations certaines de supernovæ dans notre galaxie (m : magnitude):

1006 : Ali Ibn Ridwan en Égypte et Annales de Saint-Gall (Suisse) (m = - 9,5 visible plusieurs années, pas de trace radio retrouvée)

Juillet 1054 : en Chine et au Japon (devenue la nébuleuse du Crabe dans la constellation du Taureau, visible 22 mois, m = - 4)

1604 : par Kepler (visible 12 mois, m = 3)

1660 : supernova dont on ne possède aucune description historique et dont les restes constituent la radiosource Cassiopée A, la plus intense du ciel après le Soleil.

1573 : Publication à Copenhague du *De Nova Stella*.

1574 : Tycho Brahé donne des cours à Copenhague. Il y fait l'éloge de Copernic pour la qualité mathématique de son système et, en particulier, pour avoir abandonné l'équant de Ptolémée.

1575 : visite à Cassel au Landgrave Guillaume IV. Les deux hommes font des observations et sont convaincus de la nécessité d'observations prolongées et systématiques.

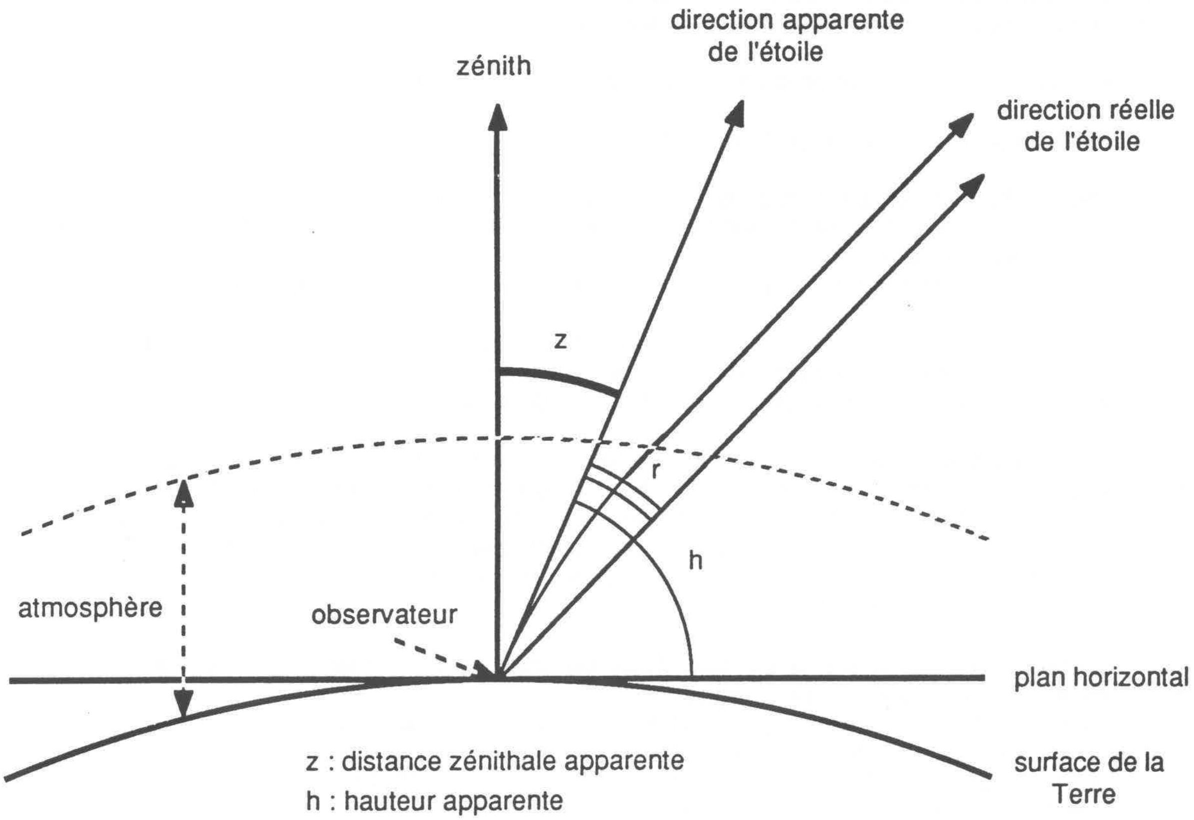
Février 1576 : le roi Frédéric II de Danemark, auprès duquel Tycho Brahé avait sans doute été recommandé par Guillaume IV, offre à l'astronome l'île de Ven (dans le Sund entre le Danemark et la Suède, appartenant aujourd'hui à la Suède) avec tous ses revenus, pour y établir un observatoire tous frais de construction payés).

Tycho Brahé commence la construction d'**Uraniborg** (château céleste), vaste palais devant abriter sa famille, ses collaborateurs et ses instruments d'observation.

1580 : Uraniborg est à peu près terminé et contient un quadrant mural méridien d'environ 1,95m de rayon.

1584 : installation d'une imprimerie. Construction de **Stjerneborg** (château des étoiles) à côté d'Uraniborg, avec cinq chambres souterraines pour abriter des instruments. Les chambres d'observations souterraines ont pour but d'éviter les turbulences atmosphériques. Stjerneborg abritait en particulier une grande roue armillaire équatoriale de 2,75 m de diamètre.

En utilisant des instruments de grande taille et soigneusement gradués, Tycho Brahé atteint une **précision des mesures** angulaires insurpassable à l'œil nu, dix fois meilleure que celle des mesures antérieures (erreur inférieure à 1', alors que Copernic considérait 10' comme un idéal inaccessible).



z : distance zénithale apparente

h : hauteur apparente

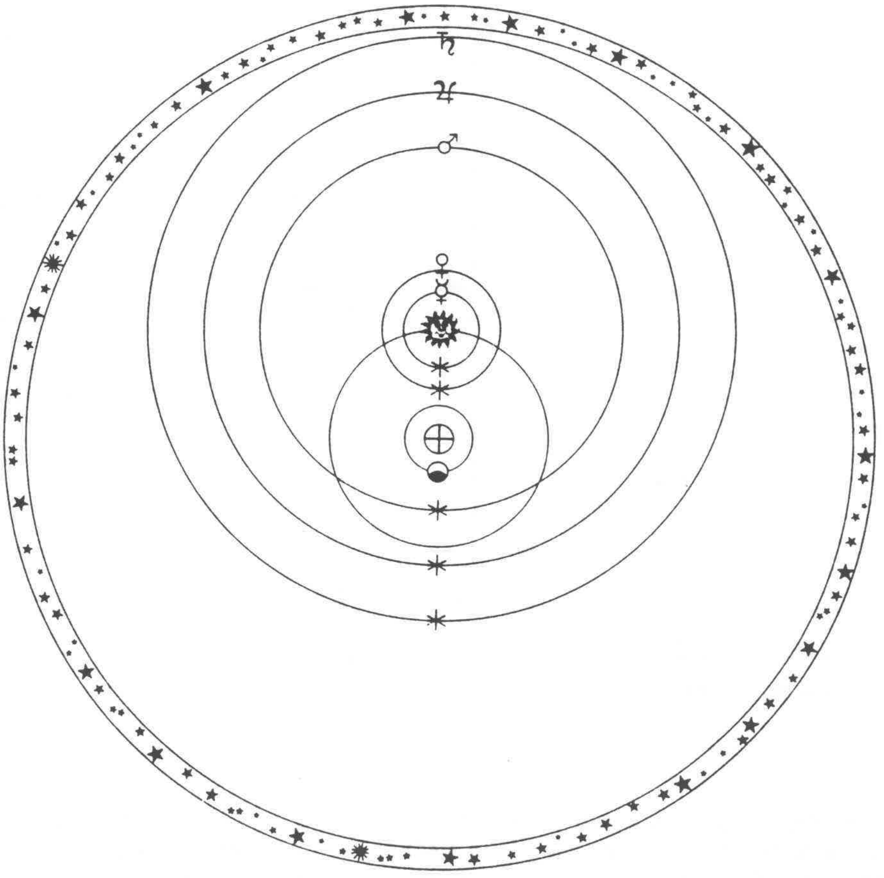
r : correction de réfraction

Par ailleurs, Tycho Brahé est le premier astronome à prendre sérieusement en compte la **réfraction atmosphérique**. L'effet de ce phénomène est de rapprocher du zénith la position apparente des étoiles par rapport à leur position réelle sur la voûte céleste (cf. figure précédente). Il convient donc de diminuer la distance zénithale observée d'une *correction de réfraction*. Cette correction, nulle pour une étoile observée au zénith, est une fonction croissante de la distance zénithale apparente. Elle vaut environ 1' à 45° de distance zénithale (ou de hauteur), et dépasse 36' à l'horizon. En première approximation, cette correction est proportionnelle à la tangente de la distance zénithale apparente. Une formule plus précise, et tenant compte de la température et de la pression atmosphériques au sol, a été établie par Laplace au début du XIX^{e} siècle.

Tycho Brahé dresse une table empirique indiquant la correction de réfraction à appliquer selon la hauteur apparente de l'étoile. L'intention est louable, mais il sous-estime fortement cette correction et il la considère comme nulle pour les hauteurs supérieures à 20°.

Cela dit, la qualité des observations de Tycho Brahé est remarquable, et il y ajoute la constance d'un observateur inlassable et systématique.

13 novembre 1577 : observation d'une comète jusqu'au 26 janvier 1578. Tycho Brahé reconnaît que, contrairement à Aristote qui prétendait que les comètes étaient des phénomènes sublunaires et même atmosphériques, la comète appartient au domaine supralunaire et traverse les orbes ou sphères des planètes, ce qui le conduit à nier la matérialité de ces sphères.



1588 : publication de *De mundi ætherei recentioribus phænomenis (Sur des phénomènes récents du monde de l'éther)* qui traite de la comète.

A Uraniborg, Tycho Brahé a observé au moins 6 autres comètes, notamment en 1580, 1582, 1585 et 1590.

Le traité de 1588 contient une description du **système astronomique de Tycho Brahé** que celui -ci dit avoir trouvé «comme par inspiration en 1583», mais on sait aujourd'hui que le véritable auteur de ce système est l'astronome Paul Wittich (v. 1550-1587).

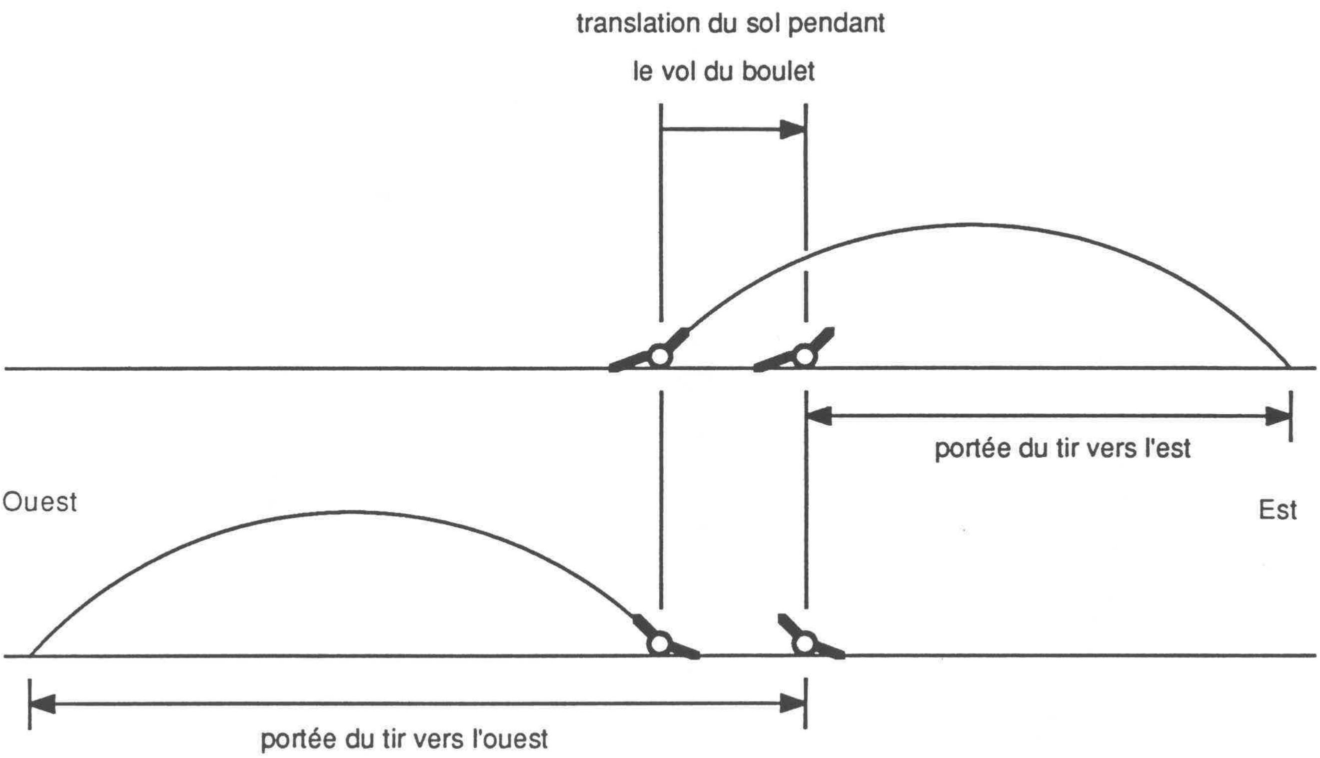
Selon ce système la Terre est immobile au centre de la sphère céleste qui tourne sur elle-même en 24 heures, les planètes tournent autour du Soleil qui tourne lui-même, ainsi que la Lune, autour de la Terre.

Bien qu'il fût difficilement crédible sur le plan physique, ce système qui semblait combiner les avantages de ceux de Ptolémée et de Copernic, eut un certain succès dans la première moitié du XVII^{e} siècle, en particulier auprès des Jésuites.

Cette position de Tycho Brahé, en retrait par rapport à Copernic, était motivée par les points suivants :

1) Respect des Écritures saintes qui semblent enseigner l'immobilité de la Terre.

2) L'immobilité de la Terre est conforme au bon sens et, de plus, Tycho Brahé est sensible à l'objection d'Aristote du jet vertical d'une pierre contre la rotation diurne de la Terre (cf. §11 (b1)). Il imagine même un autre argument contre ce mouvement de la Terre, consistant à prévoir que, si elle tournait, un canon tirant dans les mêmes conditions vers l'ouest, puis vers l'est, aurait une portée nettement supérieure dans le premier cas que dans le second. Ceci parce que, pendant le vol du boulet, le canon serait emporté vers l'est par la rotation de la Terre.



3) Tycho Brahé faisait des mesures très précises. Si la Terre tournait autour du Soleil alors qu'on ne décelait toujours aucune parallaxe stellaire, il fallait reculer considérablement les étoiles et admettre pour l'univers des dimensions énormes, ce que Tycho Brahé refusait. Il avait pour cela deux raisons :

(a) Par rapport aux distances interplanétaires, c'est un espace immense qui séparerait la planète la plus éloignée, Saturne, de la sphère des étoiles, et une telle configuration du monde semblait absurde à Tycho Brahé.

(b) Tycho Brahé avait cru pouvoir assigner un diamètre apparent aux étoiles. Mais éloigner celles-ci revenait alors à leur attribuer des tailles gigantesques, par exemple de l'ordre de l'orbite terrestre, ce que Tycho Brahé (qui ignorait tout des étoiles géantes et supergéantes) ne pouvait admettre.

En conséquence, Tycho Brahé alla même jusqu'à réduire nettement la dimension de la sphère stellaire par rapport à celle prévue par Ptolémée, avec un rayon de 14000 R_T contre 20000 R_T chez l'astronome grec.

1587-1595 : Tycho Brahé découvre trois inégalités dans le mouvement de la Lune :
- La **variation** , inégalité en longitude de demi-amplitude 39' 30" et de période une demi- révolution synodique.
- L'**oscillation de l'inclinaison** entre 5° 0' 1" et 5° 17' 35" avec une période de 173 jours.
- L'**oscillation de la ligne de nœuds** selon la même période, avec une demi-amplitude de 1° 31' (oscillation qui se superpose à la rétrogradation séculaire par laquelle les nœuds accomplissent un tour en 6798,4 j ≈ 18,6 ans).

1588 : mort de Frédéric II auquel succède son fils Christian IV, beaucoup moins motivé par l'astronomie que son père. Tycho Brahé, endetté, n'est plus soutenu par le nouveau souverain mais se maintiendra encore neuf ans à Uraniborg.

15 mars 1597 : dernière observation de Tycho Brahé à Ven.

Octobre 1597 : il arrive au château de Wandsbek près de Hambourg.

1598 : publication à Wandsbek (près de Hambourg) de *Astronomiæ instauratæ mechanica (Les instruments de l'astronomie rétablie)*, œuvre dédiée à l'empereur d'Allemagne Rodolphe II de Habsbourg et qui contient une description des instruments utilisés par Tycho Brahé. A l'exemplaire destiné à l'empereur, il joint un catalogue des positions de 777 étoiles auxquelles il avait adjoint à la hâte celles de 223 autres.

Juin 1599 : arrivée de Tycho Brahé à Prague. Il installe son observatoire au château de Benátky (à environ 35km au nord-est de Prague) où il **rencontre Kepler le 4 (ou 3 ?) février 1600**.

Été 1600 : installation au Belvédère (pavillon royal de plaisance) près du château de Prague.

Février 1601 : installation à la maison du vice-chancelier Curtius.

24 octobre 1601 : mort de Tycho Brahé à Prague après 11 jours de maladie, sans doute de la prostate.

4 novembre 1601 : obsèques solennelles de Tycho Brahé à Prague, en l'église Notre-Dame-de-Týn.

1602 : publication à Prague de l'*Astronomiæ instauratæ progymnasmata (Exercices pour l'astronomie rétablie)*.

Sur son lit de mort, Tycho Brahé a demandé à Kepler de terminer ses *Tables Rudolphines*. Ainsi Kepler a eu accès aux observations de Tycho Brahé que celui-ci refusait de communiquer. Mais Kepler n'a pas obtenu les instruments de Tycho Brahé dont, pour la plupart, on ne sait pas très bien ce qu'ils sont devenus. Le grand globe fut finalement placé au sommet de la Tour Ronde de Copenhague, au milieu du XVIIe siècle, où se trouve un musée Tycho Brahé.

Signalons encore que, comme beaucoup d'astronomes de cette époque, Tycho Brahé a fait des prédictions astrologiques. Par exemple, à Rostock, de l'éclipse de Lune du 28 octobre 1566, il prédit la mort de Soliman le Magnifique qui était âgé, et a ensuite appris qu'il était mort avant l'éclipse. Mais à partir de 1588, il attache peu d'importance à cette activité.

10 - JOHANNES KEPLER (1571-1630)

27 décembre 1571 : naissance de Johannes Kepler à Weil der Stadt (Wurtemberg), dans une famille luthérienne.

1576 : il entre à l'école de Leonberg.

1577 : sa mère lui montre la grande comète étudiée par Tycho Brahé (cf. §9 ci-dessus).

1580 : son père lui fait observer une éclipse de Lune.

1584 : il entre à l'école du couvent de Adelberg.

1586 : il entre au séminaire supérieur de Maulbronn. Il se destine à être pasteur.

1588 : il obtient le grade de bachelier à Tübingen mais reste encore une année à Maulbronn pour compléter ses études.

1589 : il entre au grand séminaire («Stift») de l'université de Tübingen. Il suit, entre autres, les cours de mathématiques et d'astronomie de **Michael Mästlin** (1550-1631). Copernicien convaincu mais prudent, ce dernier exerce une influence décisive sur son jeune élève.

1591: il obtient le grade de maître et est autorisé à rester à l'université pour y faire des études à la faculté de théologie.

13 mars 1594 - 11 avril 1594 : après des hésitations, Kepler quitte Tübingen et arrive à Graz (Styrie) pour prendre possession d'un poste de professeur de mathématiques qui lui a été proposé à l'école luthérienne du monastère. Il y est chargé d'un cours élémentaire de mathématiques et d'astronomie, mais aussi de la confection annuelle d'un calendrier comportant des prévisions astrologiques relatives à la météorologie et aux événements politiques. Dans son calendrier pour 1595, Kepler prédit un froid intense et des invasions par les Turcs. Ces prédictions se réalisent et Kepler acquiert une célébrité locale. Cinq autres calendriers sont ainsi publiés à Graz les années suivantes ; d'autres le seront plus tard à Prague de 1602 à 1606, puis de 1618 à 1624. Par ailleurs, il nous reste de Kepler plus de 800 horoscopes, y compris le sien propre. Cependant il n'accepte pas les règles habituelles de l'astrologie et observe une certaine distance vis-à-vis de cet art divinatoire.

19 juillet 1595 : Kepler croit avoir trouvé la clé de l'univers, c'est-à-dire à la fois la raison profonde de l'existence d'exactement six planètes, et celle de leurs distances relatives au Soleil (Notons que le monde de Kepler est héliocentrique).
Rejoignant le mysticisme de Platon, Kepler s'efforce de relier les planètes aux cinq polyèdres réguliers : c'est la solution du «secret du monde».

Rappelons que la relation d'Euler dans les polyèdres, $S - A + F = 2$ (où S = nombre de sommets, A = nombres d'arètes, F = nombres de faces), impose qu'il n'y ait que 5 polyèdres réguliers convexes (mais Euclide avait déjà donné une démonstration de cette propriété), à savoir :

F = 4 :	tétraèdre,	à faces triangulaires,
F = 6 :	cube,	à faces carrées,
F = 8 :	octaèdre,	à faces triangulaires,
F = 12 :	dodécaèdre,	à faces pentagonales,
F = 20 :	icosaèdre,	à faces triangulaires.

Dans le système de Kepler, les orbites planétaires se plaçaient sur des sphères centrées sur le Soleil et coincées entre les polyèdres emboîtés, chacune étant circonscrite au polyèdre inférieur et inscrite dans le polyèdre supérieur, ceci dans l'ordre suivant :

Mercure, *octaèdre*, Vénus, *icosaèdre*, Terre, *dodécaèdre*,
Mars, *tétraèdre*, Jupiter, *cube*, Saturne.

Le plus surprenant est que Kepler, en donnant aux sphères porteuses des orbites planétaires une certaine épaisseur pour tenir compte des excentricités de ces dernières, retrouvait ainsi sensiblement les dimensions des orbites indiquées par Copernic. Nul doute, pour Kepler, que cette concordance était signifiante.

Février 1595 - août 1596 : séjour de Kepler en Wurtemberg pour préparer la publication de l'ouvrage où il révélera sa découverte.

1596 : publication à Tübingen du *Prodromus dissertationum cosmographicarum continens mysterium cosmographicum...*, connu sous le titre encore plus abrégé de ***Mysterium cosmographicum (Le Secret du monde).***

1er janvier 1600 : Kepler quitte Graz pour un séjour à Prague.

4 (ou 3 ?) février 1600 : première rencontre de Kepler avec Tycho Brahé au château de Benátky.

1er juin 1600 : Kepler est de retour à Graz.

30 septembre - 19 octobre 1600 : les persécutions dont sont victimes les Protestants en Styrie contraignent Kepler à quitter Graz avec sa famille pour aller s'installer à Prague.

1600-1601 : les relations de Kepler avec Tycho Brahé sont difficiles, sans doute parce qu'il s'agit de deux fortes personnalités, mais aussi parce que Tycho Brahé refuse à Kepler, de même qu'à quiconque, le libre accès à ses précieux registres d'observations, ne divulguant ses résultats qu'avec la plus grande parcimonie.

Avant l'arrivée de Kepler, Tycho Brahé avait chargé son élève Christen Sørensen (ou Christian Severin), dit **Longomontanus** (1562-1647), de regarder de plus près la théorie de Mars où il avait sans doute aperçu quelque difficulté. Kepler collabore donc à ce travail en cours et obtient rapidement d'importants résultats :

1) L'orbite de Mars ne doit pas être rapportée au centre de l'orbite terrestre comme le voulait Copernic (ou au soleil moyen qui lui correspond dans le système de Tycho Brahé), mais au Soleil lui-même. Ainsi **le plan de l'orbite de Mars est fixe et passe par le (centre du) Soleil**, avec une inclinaison constante de 1° 50' (valeur correcte 1° 51') sur le plan de l'écliptique. Voilà qui corrige la fâcheuse erreur de Copernic signalée au §8.

2) De même que Ptolémée, ou Copernic pour la Terre, Tycho Brahé représentait la marche du Soleil par un simple excentrique parcouru à vitesse uniforme. Kepler reconnaît l'insuffisance de ce modèle. Il propose de l'améliorer au moyen d'un équant.

3) Kepler pense qu'un modèle similaire devrait convenir pour Mars, avec une excentricité moitié de celle donnée par Copernic et adoptée par Tycho Brahé.

Fin avril - début septembre 1601 : Kepler s'absente de Prague pour régler à Graz des affaires concernant l'héritage de sa femme.

24 octobre 1601 : mort de Tycho Brahé qui lègue sur son lit de mort ses observations à Kepler en lui recommandant de compléter les *Tables rudolphines*.

26 octobre 1601 : Kepler succède à Tycho Brahé comme Mathématicien impérial auprès de l'empereur Rodolphe II de Habsbourg.

1601-1606 : travail de Kepler sur Mars.
Avec la mort providentielle de Tycho Brahé, Kepler se trouve dans des conditions idéales pour mener à bien sa recherche sur Mars. Mais la tâche est particulièrement difficile et seules des qualités exceptionnelles pouvaient permettre à Kepler d'aboutir. Le succès final est autant le fruit de sa ténacité que celui de son ingéniosité.

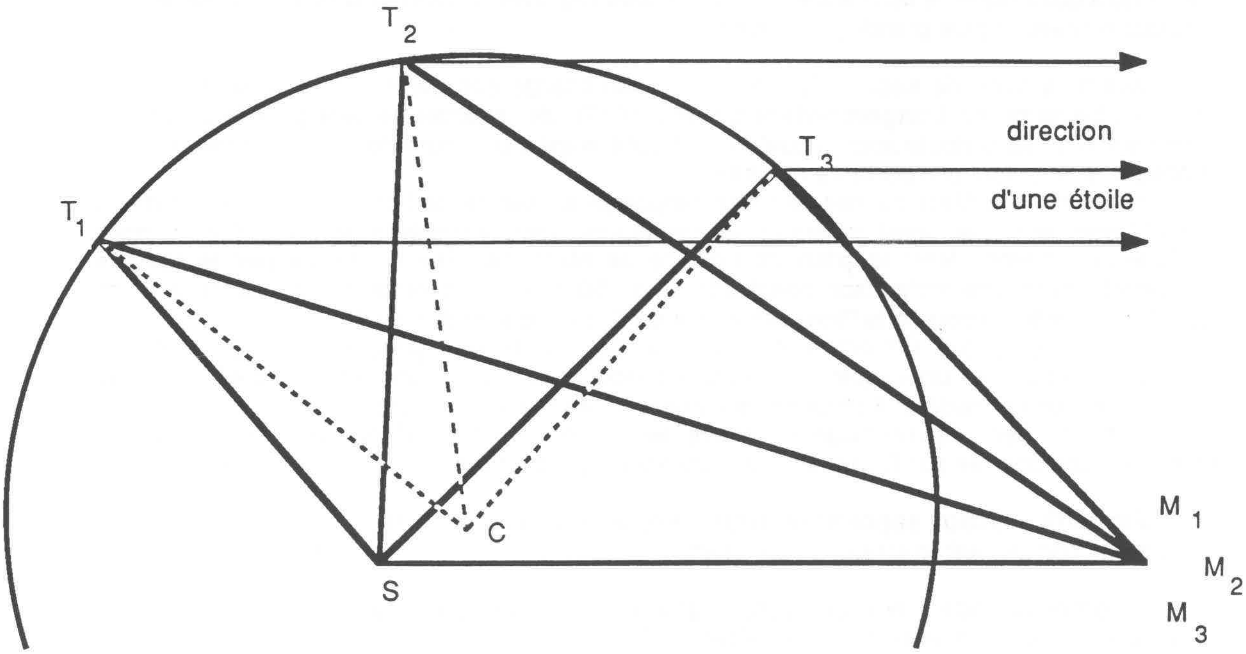
Kepler essaie donc d'ajuster aux données de Tycho Brahé sur Mars, un modèle excentrique à équant. Mais plusieurs tentatives échouent et, finalement, si certaines positions calculées ne diffèrent que de 2' (en longitude) de celles observées par Tycho Brahé, d'autres s'en écartent de 8'. Pour Kepler qui avait la plus grande confiance en la précision des mesures de Tycho Brahé, de tels écarts sont intolérables.

A partir de là, Kepler est convaincu que l'astronomie théorique est entièrement à reprendre. Les jours de la vieille astronomie circulaire sont comptés. Mais cette réforme de l'astronomie doit passer par la détermination de l'orbite de Mars.

1. Détermination de l'orbite de la Terre. Dans un premier temps, Kepler s'efforce de préciser l'orbite de la Terre, en conservant toutefois l'hypothèse de sa circularité. Il s'agit donc de situer cette orbite par rapport au Soleil, et il suffit pour cela d'en déterminer trois points. Voici le principe de la méthode de Kepler.

Si Mars, la Terre et le Soleil sont représentés respectivement par les points M, T et S, à une époque donnée une observation de Mars fournit la direction TM (par rapport aux étoiles), tandis que les théories existantes, bien qu'imparfaites, permettent de connaître avec une précision suffisante, les directions ST et SM à cette même époque. Voilà donc déterminé le triangle MTS à une homothétie près, à l'époque considérée.

Mais trois déterminations semblables à trois époques différentes sont inutilisables pour définir l'orbite terrestre si on ne sait établir aucune relation entre elles. C'est alors qu'intervient le génie de Kepler qui comprend que le problème est résolu si les trois époques sont espacées de 687 jours (ou de multiples de cette durée). Simplement parce que 687 jours est la révolution sidérale de Mars ; c'est donc le temps à l'issue duquel Mars se retrouve dans la même position par rapport au Soleil et aux étoiles. Alors trois triangles M_1T_1S, M_2T_2S et M_3T_3S correspondant à trois époques remplissant les conditions ci-dessus, sont tels que les point M_1, M_2 et M_3 sont confondus, et il reste à tracer le cercle $T_1T_2T_3$ pour obtenir la position de l'orbite circulaire de la Terre par rapport au Soleil et aux étoiles.



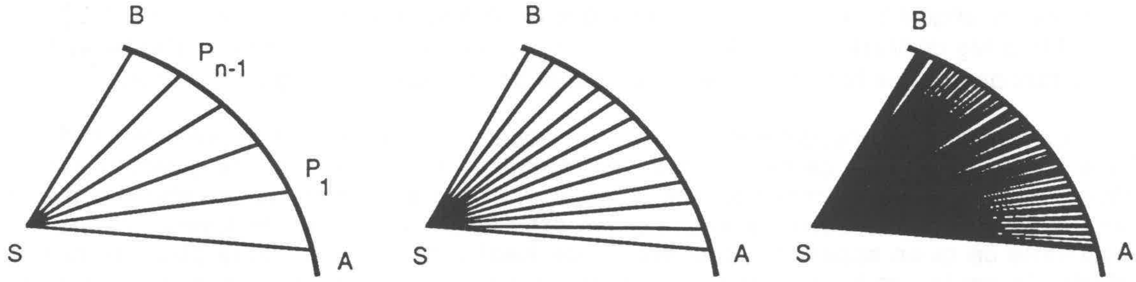
Kepler recherche donc dans les registres de Tycho Brahé des observations de Mars espacées de (ou de multiples de) 687 jours. Il peut même déterminer plus de trois points de l'orbite terrestre et obtenir ainsi une confirmation de sa circularité. De plus, il trouve pour cette orbite une excentricité voisine de 0,018, soit deux fois moins que les estimations antérieures.

2. La marche de la Terre sur son orbite. Kepler a aussi remarqué que, contrairement à ce que croyaient ses devanciers, la Terre (ou le Soleil dans le cas géocentrique) ne parcourt pas son orbite à une vitesse angulaire uniforme autour du centre, de sorte que son mouvement devrait être réglé par un équant.

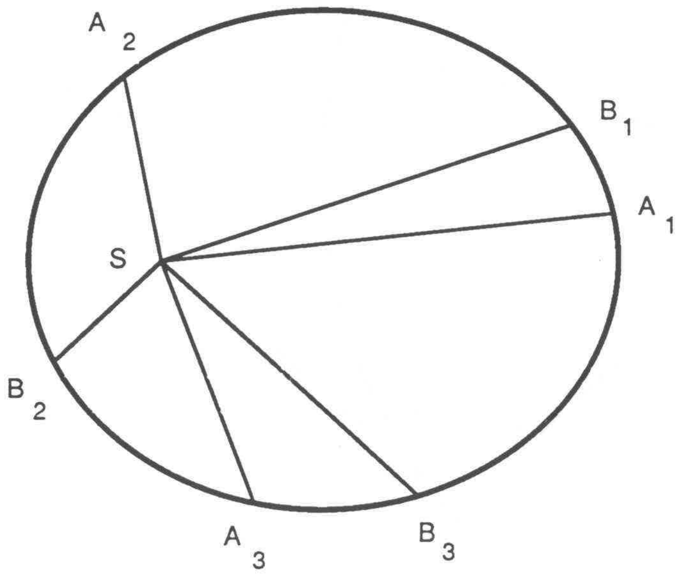
Mais Kepler va aller au-delà de cette constatation en se laissant guider par des considérations physiques, ce qui est une attitude tout à fait nouvelle. Il se montre en effet plus copernicien que Copernic lui-même en pensant que le Soleil joue un rôle actif dans la marche des planètes, et la découverte que le plan de l'orbite de Mars passe par le Soleil le conforte évidemment dans cette opinion.

Plus précisément, Kepler pense que chaque planète est poussée sur son orbite par une force d'origine magnétique, émanant du Soleil et inversement proportionnelle à la distance qui la sépare du Soleil. Comme il croit, par ailleurs, à la proportionnalité de la force motrice d'un corps et de sa vitesse, il en déduit que *la vitesse d'une planète est inversement proportionnelle à sa distance au Soleil.* Disons tout de suite que c'est faux, mais Kepler va quand même en tirer un principe juste (La loi correcte est la suivante : *la vitesse d'une planète en un point donné de son orbite est inversement proportionnelle à la distance du Soleil à la tangente à l'orbite au point considéré*).

Il résulte d'abord de la loi fausse ci-dessus qu'un petit arc P'P" de l'orbite serait parcouru en un temps proportionnel à la longueur SP' ≈ SP". Si maintenant un arc AB de l'orbite est subdivisé en petits arcs par des points P_0=A, P_1, P_2, ... , P_{n-1}, P_n=B, son temps de parcours sera sensiblement proportionnel à la somme SA+SP_1+ ... +SP_{n-1}, avec d'autant plus d'exactitude que le nombre de points de subdivision sera plus grand.



La difficulté est que la somme précédente tend vers l'infini lorsque le nombre de points de subdivision tend lui-même vers l'infini. Mais comme les rayons issus de S finissent alors par remplir tout le secteur SAB, Kepler a l'idée de substituer à la somme des rayons SP, quand P parcourt l'arc AB, l'aire du secteur SAB. Bien sûr, cet expédient ne peut recevoir aucune justification mathématique et Kepler lui-même est conscient de l'audace de son procédé. Il n'empêche qu'il obtient ainsi une loi dont il constate la validité dans le cas du mouvement de la Terre et dont il vérifiera plus tard qu'elle convient à toutes les planètes.



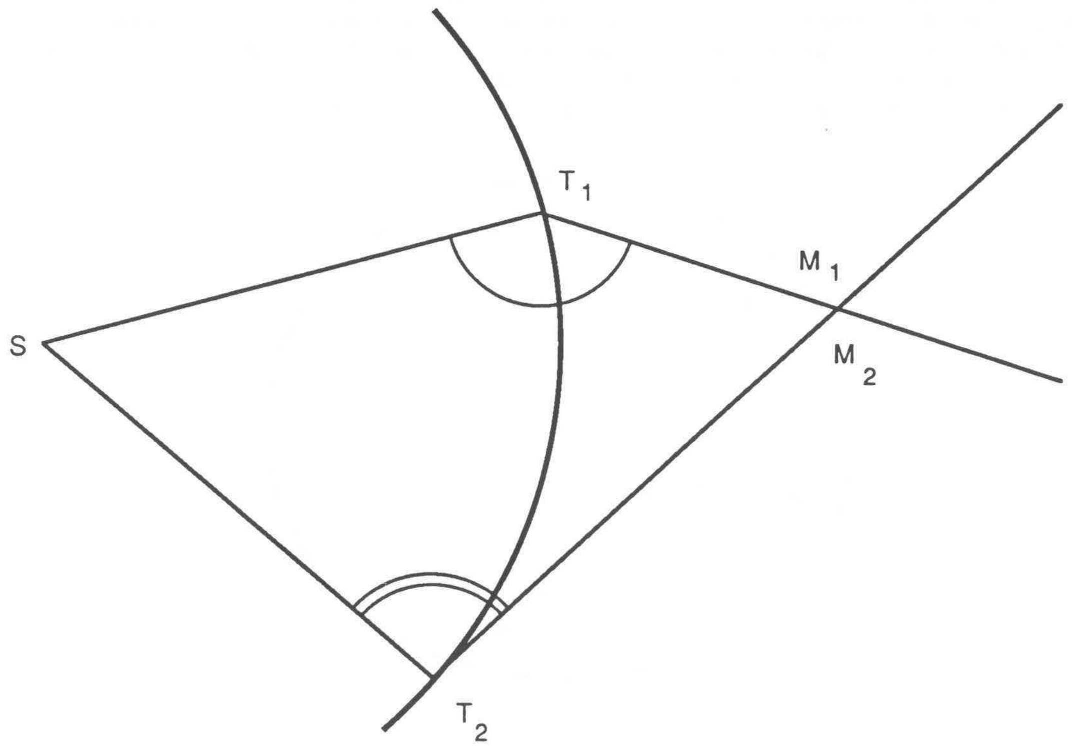
Connue aujourd'hui sous le nom de **loi des aires** ou **deuxième loi de Kepler**, cette loi peut s'énoncer ainsi : *chaque planète se déplace de manière qu'un arc donné de son orbite soit parcouru en un temps proportionnel à l'aire balayée par le rayon joignant le Soleil à la planète.* Cette loi est illustrée par la figure ci-après où les trois arcs A_iB_i considérés sont parcourus en des temps égaux.

Signalons que cette loi n'est pas spécifique de la marche des planètes mais est commune à tous les mouvements à accélération centrale.

3. Détermination de l'orbite de Mars. Kepler s'aperçoit d'abord que l'orbite de Mars n'est pas circulaire, les positions de la planète obtenues par triangulation à partir des observations se plaçant systématiquement à l'intérieur du cercle de diamètre aphélie-périhélie (cercle apsidal). L'orbite de Mars est donc un ovale dont Kepler, en 1603, essaie vainement de déterminer la nature. Il essaie même une ellipse mais celle qui approche le mieux l'ovale est d'excentricité trop grande pour avoir un rapport avec la position du Soleil, exigence essentielle pour Kepler.

S'étant occupé entre-temps d'optique, Kepler revient sur le problème de l'orbite de Mars au début de 1605 et entreprend alors de déterminer à nouveau la configuration de cette orbite en s'appuyant sur celle de la Terre qu'il avait précédemment obtenue. Pour cela il recherche encore dans les registres de Tycho Brahé des couples d'observations de Mars espacées de 687 jours ou d'un multiple de cette durée. Pour chacune de deux telles observations on peut connaître les angles $\widehat{ST_1M_1}$ et $\widehat{ST_2M_2}$ ainsi que les positions T_1 et T_2 de la Terre, et comme celles M_1 et M_2 de Mars sont confondues, on en déduit un point de l'orbite de cette planète, et ceci autant de fois que l'on considère un tel couple d'observations (cf. figure suivante).

L'ovale ainsi obtenu, différent de celui sur lequel Kepler avait travaillé précédemment, se place à mi-chemin entre ce dernier et le cercle apsidal. Kepler fera encore quelques essais infructueux pour identifier cette nouvelle orbite, pour s'apercevoir enfin qu'une ellipse convient parfaitement et que le Soleil se trouve placé exactement à l'un de ses foyers. Voilà donc découverte ce qu'on appelle la **première loi de Kepler** dont il reconnaîtra plus tard qu'elle est vérifiée par toutes les planètes : *les orbites des planètes sont des ellipses dont le Soleil occupe l'un des foyers.*



Kepler a été aidé dans sa découverte par deux circonstances favorables :

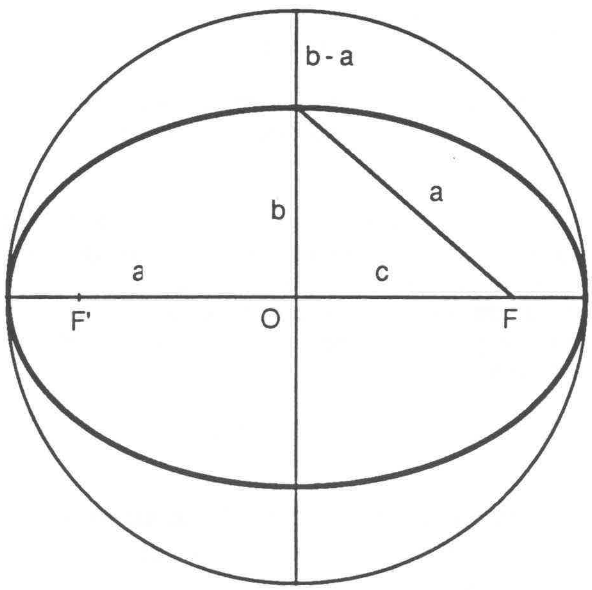
(a) L'excentricité de l'orbite de Mars est relativement importante ($e = 0,093$). Si, au lieu de s'intéresser à Mars, Kepler s'était occupé de Vénus dont l'excentricité est beaucoup plus faible (0,007), le fait que l'orbite soit elliptique lui aurait totalement échappé, de même qu'il n'avait pas vu que l'orbite terrestre est elliptique. Cependant, ce n'était sans doute pas par hasard que Tycho Brahé avait lancé ses élèves sur le problème de Mars.

(b) La précision des mesures de Tycho Brahé, bien que remarquable compte tenu de l'absence de lunette, ne descendait guère au dessous de la minute d'arc, de sorte que les irrégularités de la trajectoire réelle de Mars, dues aux perturbations provoquées par les autres planètes, étaient complètement masquées et que seule apparaissait la forme elliptique de cette orbite.

Notons toutefois qu'en plus des difficultés qu'il a dû surmonter pour finalement triompher, Kepler a encore eu un certain mérite à discerner l'ellipticité de l'orbite de Mars. Lorsqu'ils abordent les lois de Kepler, les ouvrages d'initiation à l'astronomie représentent toujours une orbite planétaire à l'ellipticité très marquée, ceci pour une raison pédagogique évidente de lisibilité de la figure. Cependant, probablement pour éviter de jeter le trouble dans les esprits, ils omettent le plus souvent de signaler que ces orbites sont pratiquement des cercles, comme le montre le tableau suivant qui indique, pour chaque planète, l'écart maximum entre l'orbite et le cercle ayant son grand axe pour diamètre, sur une figure où celui-ci mesurerait 1 mètre.

Planète	Mercure	Vénus	Terre	Mars	Jupiter	Saturne
Écart en mm	10,61	0,01	0,07	2,16	0,58	0,78

La cause en est la formule $\alpha = 1 - \sqrt{1-e^2}$ qui lie l'*aplatissement* $\alpha = \frac{a-b}{a}$ et l'*excentricité* $e = \frac{c}{a}$, et qui, pour les faibles valeurs de e, devient approximativement $\alpha \approx$ ™e^2, de sorte que α est encore beaucoup plus petit que e.



En fait, pour la plupart des planètes, l'ellipticité de la trajectoire se manifeste bien davantage par son excentricité par rapport au Soleil et par les variations de vitesse de la planète qu'on y observe, que par sa forme aplatie.

1609 : publication à Prague de l'***Astronomia nova (L'Astronomie nouvelle)***, ouvrage étonnant où Kepler rapporte minutieusement le détail de ses recherches sur l'orbite de Mars, faisant part au lecteur de ses succès, mais ne lui cachant rien de ses erreurs, de ses déconvenues et de ses souffrances. Après dix-sept siècles d'astronomie circulaire, Kepler ouvre une ère nouvelle, celle de l'**astronomie elliptique**.

Opérons un petit retour en arrière après cet important épisode de l'étude de Mars.

Décembre 1603 (vers le 20) : observation d'une conjonction Jupiter-Saturne.

17 octobre 1604 : apparition d'une supernova à quelques degrés de Jupiter, Saturne et Mars.

1604 : publication de l'***Astronomia pars optica*** où Kepler étudie en particulier la réfraction, mais la formule $i - r = n \, i \sec r$ $(\sec r = 1/\cos r)$ qu'il obtient n'est pas la bonne. Cependant Descartes, qui a découvert la loi correcte $\sin i = n \sin r$, reconnaît avoir beaucoup appris chez Kepler.

Dans cet ouvrage, Kepler étudie aussi la réfraction astronomique.

Dans l'appendice *Ad Vitellionem paralipomena*, il étudie les coniques et invente le terme de «foyer» (focus).

1606 : Kepler publie ses observations de la supernova de 1604 dans *De stella nova*, accompagnées de commentaires astrologiques.

1611 : publication de *Dioptrice*, autre ouvrage d'optique où Kepler étudie les lentilles et les lunettes.

23 mai 1611 : l'empereur Rodolphe abdique. Le 13 juin, son frère Mathias lui succède.

20 janvier 1612 : mort de Rodolphe.

Mi-avril - mi-mai 1612 : Kepler quitte Prague pour Linz tout en conservant le titre de Mathématicien impérial.

1612 : accusé de sympathie envers la doctrine calviniste, Kepler est excommunié par le pasteur de la congrégation luthérienne de Linz.

1615 : *Stereometria doliorum vinariorum* (stéréométrie des tonneaux). Contient des calculs d'aires et de volumes par une méthode originale qui préfigure le calcul infinitésimal de Newton.

1618 : publication de l'***Harmonice mundi (l'Harmonie du monde)***. Kepler y développe sa théorie de l'harmonie du monde dans les domaines de la géométrie, de la musique, de l'astrologie et de l'astronomie. C'est dans cet ouvrage qu'il formule ce qu'on appelle la **troisième loi de Kepler** : *le carré de la révolution sidérale d'une planète est proportionnel au cube du grand axe de son orbite.* Cette découverte de Kepler accentue encore l'ordre géocentrique du monde.

1619 : *De Cometis*, étude astronomique, physique et astrologique sur des comètes observées en 1618.

1617-1621 : ***Epitome astronomiae Copernicanae (Abrégé de l'astronomie copernicienne)***. Il s'agit plutôt d'une introduction à l'astronomie keplérienne, écrite sous la forme de questions-réponses.

Cet ouvrage qui contient des arguments en faveur du mouvement de la Terre, sera placé à l'*Index* dès 1619. A ce propos il faut remarquer que **l'astronomie elliptique de Kepler constitue par elle-même un argument de poids en faveur de l'héliocentrisme**. Dans le cadre de la vieille astronomie circulaire, à base d'excentriques ou de déférents et d'épicycles, il est facile de voir que, regardés dans leurs grandes lignes, les systèmes de Ptolémée, de Copernic et de Tycho Brahé, étaient finalement équivalents. En revanche, l'équivalence entre les représentations géocentrique et héliocentrique est totalement détruite par l'astronomie képlérienne puisque la simplicité des orbites elliptiques obtenues en rapportant les mouvements planétaires au Soleil, ne possède aucune contrepartie similaire lorsque ces mêmes mouvements sont rapportés à la Terre.

On trouve encore dans l'*Epitome*

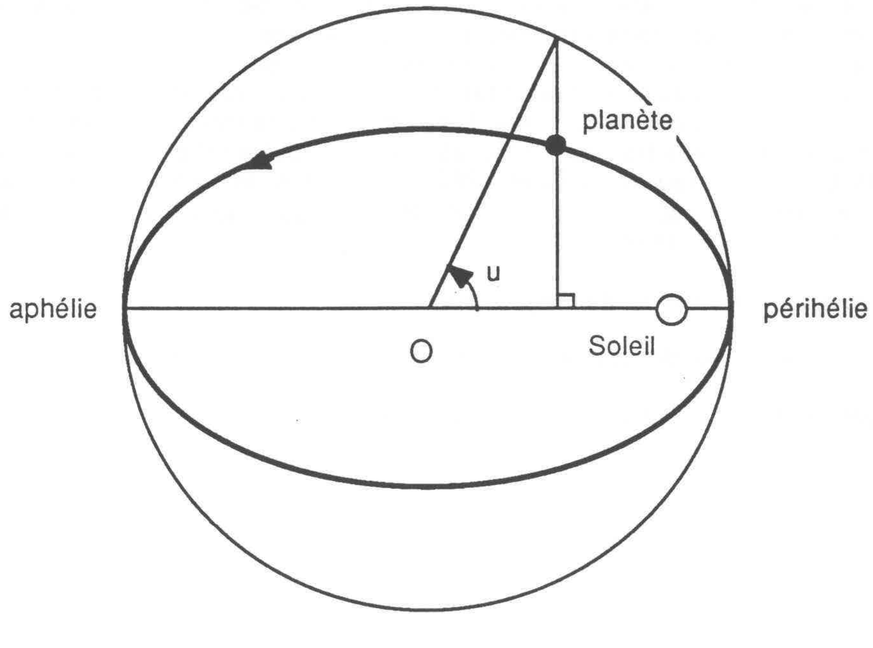
- une formulation explicite de la loi des aires étendue à toutes les planètes ;
- la constatation que la troisième loi s'applique aussi aux satellites de Jupiter ;
- la découverte (souvent attribuée à tort à Tycho Brahé) d'une nouvelle inégalité du mouvement de la Lune, l'**équation annuelle**, inégalité en longitude de période 1 an ;
- la formulation de l'**équation de Kepler**

$$u - e \sin u = \frac{2\pi}{T}(t - t_0)$$

qui, pour le mouvement d'une planète donnée, relie l'*anomalie excentrique* u (cf. figure suivante), en radians, au temps t, et où e est l'excentricité de l'orbite, T la révolution sidérale et t_0 l'époque du passage au périhélie. Le second membre de l'équation est l'*anomalie moyenne* de la planète.

1621 : nouvelle édition du ***Mysterium cosmographicum*** augmenté de nombreuses notes et où l'on a la surprise de constater qu'en dépit de ses brillantes découvertes scientifiques, Kepler est loin de renier ses travaux de 1596. Le génie de Kepler est ainsi fait qu'on ne peut séparer le Kepler rationnel du Kepler mystique.

20 novembre 1626 : Kepler quitte Linz pour Ulm.



1627 : publication à Ulm des ***Tables rudolphines*** que Kepler avait promis à Tycho Brahé de terminer. Elles sont évidemment fondées sur les lois des mouvements planétaires découvertes par Kepler, et il les considérait comme le couronnement de son œuvre astronomique. Ces tables contiennent en particulier :

- des **tables de logarithmes** (déjà publiées en 1625 : *Chilias logarithmorum*). Leur présentation diffère de celles de John Napier ou **Neper** (1550-1617), auteur de la *Mirifici logarithmorum canonis descriptio* (1614), et de celles de Henry **Briggs** (1556-1630) qui introduisit les logarithmes décimaux.
- des **tables astronomiques**, tables perpétuelles pour calculer les positions des planètes, obtenues à l'aide des véritables lois des mouvements découvertes par Kepler.

L'établissement de ces tables a été facilité par l'emploi des logarithmes. Ces tables sont beaucoup plus précises que les tables antérieures. Par exemple, les prédictions des positions de Mars qui, avec les autres tables, pouvaient s'écarter jusqu'à 5° de la position réelle, sont maintenant correctes à 10' près.

- une liste de **coordonnées géographiques** de localités européennes ;
- la liste des **coordonnées des 1000 étoiles** répertoriées par Tycho Brahé.

15 septembre - 9 novembre 1627 : Kepler s'absente d'Ulm pour Francfort.

25 novembre - 29 novembre 1627 : Kepler quitte Ulm pour Ratisbonne.

20 juillet 1628 : Kepler arrive à Sagan (aujourd'hui Zagan en Pologne, entre Berlin et Breslau).

1629 : en calculant les éphémérides de 1631, Kepler s'aperçut qu'il pouvait prédire pour cette année des transits ou **passages de Mercure et de Vénus devant le Soleil**. Il les annonça dans une petite publication, *De raris mirisque anni 1631 phenomenis*. Le transit de Mercure fut observé par Pierre Gassendi (1592-1655) à Paris, le 7 novembre 1631. C'était la première observation de ce genre. Le transit de Vénus eut lieu le 4 décembre 1631 mais ne fut pas visible en Europe. (Kepler prédit aussi un passage de Vénus le 6 juin 1761).

Pour qu'un tel passage soit visible, il faut (a) que la planète (inférieure) soit dans le plan de l'écliptique, donc à l'un des nœuds de son orbite. Actuellement, les planètes inférieures se trouvent à leurs nœuds ascendants et descendants respectivement, vers le 11 novembre et le 9 mai pour Mercure, et vers le 9 décembre et le 8 juin pour Vénus. C'est donc seulement à ces époques de l'année que des transits peuvent être observés, encore faut-il (b) que le planète soit alors en conjonction avec le Soleil.

Le nombre de transits de Mercure est de 13 à 14 par siècle, mais ceux de Vénus sont beaucoup plus rares avec seulement 4 passages tous les 243 ans.

L'observation précise de ces phénomènes en divers points de la Terre permet une estimation de la parallaxe solaire et présentait donc un grand intérêt à une époque où la distance Terre-Soleil était encore mal connue. C'est pour cette raison que les astronomes ont prêté beaucoup d'attention aux transits de Vénus qui se produisirent en 1761 et 1769, ainsi qu'aux suivants qui eurent lieu en 1874 et 1882 (les transits de Vénus se produisent par groupes de deux passages espaces de huit ans). Il n'y en aura aucun au XX^{e} siècle et les prochains se produiront en 2004 et 2012.

8 octobre 1630 : Kepler quitte Sagan pour Leipzig.

2 novembre 1630 : Kepler arrive à Ratisbonne (Regensburg) en Allemagne.

15 novembre 1630 : mort de Kepler à Ratisbonne.

11 - GALILÉE (1564-1642)

(a) Les premières années.

15 février 1564 : naissance à Pise de Galileo Galilei, dit Galilée. Son père, Vincenzio Galilei est compositeur et théoricien de la musique.

1575 : Galilée entre à l'école du monastère de Santa Maria di Vallombrosa en Toscane.

5 septembre 1581 : inscription de Galilée à l'Université de Pise pour étudier la médecine, mais il s'intéresse plutôt aux mathématiques, contre la volonté de son père.

1583 : il est l'élève du mathématicien Ostilio Ricci (1540-1603). D'autre part, c'est en observant le balancement d'un lustre dans la cathédrale de Pise que Galilée aurait découvert l'**isochronisme des oscillations du pendule**, c'est-à-dire que la période des (petites) oscillations ne dépend pas de leur amplitude.

1585 : renonçant aux études de médecine, Galilée quitte l'université de Pise pour Florence où il étudie par lui-même Euclide et Archimède.

1585-1589 : Il donne des leçons de mathématiques à Florence et à Sienne.

1586 : Galilée écrit ***La bilancetta***, court ouvrage où est rapporté le procédé d'Archimède pour mesurer les poids spécifiques, et est décrite une balance hydrostatique améliorée.

1587 : premier voyage à Rome où il rencontre le père Christophorus **Clavius** (1537-1612), mathématicien et astronome jésuite du Collège romain, qui prit une part active à la réforme grégorienne du calendrier.

(b) La mécanique au XVI^{e} siècle.

(b1). La mécanique aristotélicienne.

Cette théorie se caractérise par les points suivants :

1. **Le cosmos est partagé en deux domaines**, sublunaire et supralunaire, régis par des lois physiques différentes.

2. Chaque corps a sa place dans le cosmos, son **lieu naturel.** Par exemple, lieu naturel des corps graves (pesants) est le centre de la Terre, celui des vapeurs est le ciel.

3. On distingue deux sortes de mouvements :

• les **mouvements naturels** par lesquels les corps tendent à rejoindre leur lieu naturel (exemple : la chute des corps). Les mouvements naturels dans le domaine sublunaire sont rectilignes et, plus précisément, verticaux, et ils sont limités dans dans le temps (et dans l'espace). Au contraire, les mouvements naturels dans le domaine supralunaire sont circulaires et éternels. Les «planètes» sont animées de tels mouvements naturels.

• les **mouvements violents** par lesquels les corps sont éloignés de leur lieu naturel (exemple : lancer d'une pierre vers le haut).

4. Le mouvement d'un corps ne peut résulter de la superposition d'un mouvement naturel et d'un mouvement violent. De façon générale, la composition des mouvements n'existe pas. **Une pierre lancée verticalement** n'est animée, dans la partie ascendante de

sa trajectoire, que du seul mouvement violent qui la fait monter, et ceci même **si la Terre est supposée en rotation**. Ce qui permet à Aristote de soutenir que, dans cette hypothèse, le sol se déroberait vers l'est sous la pierre pendant son trajet aérien, de sorte qu'elle **retomberait nettement à l'ouest du lanceur**, contrairement à ce que montre l'expérience.

5. Tout mouvement a une cause qui est une «force» extérieure au corps en mouvement et qui s'y applique directement. **Aucune action à distance n'est admise** ; au contraire, il faut le contact : pression ou traction.

Sur ce dernier point, la théorie est apparemment contredite par l'exemple du jet d'une pierre, ou encore celui de la mise en rotation d'une roue : le mouvement se poursuit après qu'on ait lâché la pierre ou la roue. Aristote levait la difficulté par l'explication suivante : le mouvement du corps se poursuit grâce à la réaction du milieu ambiant, de l'air en l'occurrence.

6. Conséquence : **le mouvement dans le vide est impossible** ; il n'est possible que dans un milieu ambiant matériel où sa vitesse dépendra alors de la plus ou moins grande résistance de ce milieu. Si un mouvement se produisait dans le vide, sa vitesse devrait donc être infinie, ce qui démontre encore l'impossibilité d'un tel mouvement.

(b2). La mécanique médiévale.

L'explication d'Aristote du mouvement des projectiles ou de la roue n'est pas très convaincante, aussi cette partie de la physique aristotélicienne a-t-elle été contestée très tôt au Moyen Age. Une nouvelle théorie introduite au VI^e^ siècle par Jean Philopon (v. 490 - v. 566) s'est développée au XIV^e^ siècle sous l'influence de Jean Buridan (v. 1295 - v. 1358 ?) qui fut recteur de l'université de Paris.

Cette **physique parisienne**, ou ***théorie de l'impetus***, est fondée sur le principe suivant : avant qu'elle n'ait lâché le projectile qu'elle lance, la main du lanceur communique à ce projectile un certain *impetus* par lequel il acquiert la faculté de continuer à se mouvoir selon le mouvement imprimé par la main, que ce soit en ligne droite ou circulairement. C'est donc grâce à cet impetus que le projectile peut se mouvoir après avoir été lâché par la main du lanceur. Seulement cet *impetus* s'épuise peu à peu, spontanément selon certains, sous l'action d'influences extérieures comme la résistance de l'air selon d'autres, et lorsqu'il a disparu, le projectile soumis à la seule gravité chute verticalement d'un mouvement naturel. Une explication analogue vaut dans le cas de la roue mise en rotation sur son axe, et elle s'applique aux sphères célestes qui tournent sans rencontrer de résistance, et donc éternellement, après leur lancement initial par le Créateur.

Des études récentes ont montré que les idées communément admises dans le public au sujet de la mécanique, sont beaucoup plus proches de la théorie de l'*impetus* que de la mécanique de Galilée et Newton. Ce qui montre, en retour, que la théorie de l'*impetus* est née de l'intuition que l'on peut avoir des lois du mouvement. Mais dans ce domaine l'intuition est parfois trompeuse. Ainsi beaucoup de gens croient qu'une boule lancée d'un mouvement circulaire à la surface d'une table horizontale, aura ensuite une trajectoire incurvée, ce qui correspond tout à fait à la notion fausse d'*impetus circulaire*.

On peut pourtant reconnaître dans la théorie de l'impetus comme une préfiguration de la loi d'*inertie*. Quant à l'*impetus* lui-même, il s'apparente à la *quantité de mouvement* ou *impulsion* de la mécanique classique, encore qu'il soit la cause du mouvement et qu'il ait un caractère absolu, ce qui n'est pas le cas de la notion classique.

(c) Pise.

Juillet 1589 : Galilée obtient la chaire de mathématiques de l'Université de Pise. Très vite, il s'oppose à la théorie aristotélicienne et s'intéresse à la physique de l'*impetus*. C'est à cette époque que la tradition place des expériences sur la chute des corps que Galilée aurait réalisées du haut de la tour penchée.

1590 : fin de la rédaction (commencée en 1585) du ***De motu***, traité du mouvement contre la physique aristotélicienne. Galilée supprime la distinction entre mouvements naturels et mouvements violents. Il traite de l'équilibre sur des plans inclinés et aussi de la chute des corps. A ce sujet il nie l'accélération du mouvement de la chute, car celui-ci se produisant sous l'effet d'une force constante (le poids) la vitesse ne peut être que constante.

En fait, Galilée reconnaît, comme tout le monde, une accélération au début du mouvement, mais quand le corps atteint sa vitesse propre proportionnelle à son poids spécifique, la vitesse de chute reste constante. Il va de même jusqu'à affirmer que les corps légers tombent au départ plus vite que les corps lourds qui les rattrapent ensuite, ce dont, dit-il, on peut se convaincre facilement par l'expérience(!). De façon générale, la question de savoir si Galilée a réellement fait les expériences qu'il décrit est controversée.

En revanche, Galilée nie un phénomène communément admis à l'époque, à savoir que le jet d'un projectile commence par une phase d'accélération. On affirmait, par exemple, qu'un canon était beaucoup plus destructeur à une certaine distance qu'à bout portant.

Cependant, Galilée se rend compte que la théorie de l'*impetus* est dans l'impasse car elle n'est pas quantitative et n'est donc pas susceptible d'un traitement mathématique. Aussi s'achemine-t-il vers une physique archimédienne, une physique géométrisée, idéalisée. Il s'agit plus d'une description des mouvements que d'une analyse de leur cause, plus de cinématique que de dynamique. Cette idée de donner d'un monde abstrait une description mathématique est une idée platonicienne et s'oppose radicalement aux habitudes de pensée des péripatéticiens. Elle amène Galilée à tout reprendre par lui-même, mais aussi à négliger les travaux de Tycho Brahé sur les comètes ainsi que les découvertes capitales de Kepler sur les mouvements des planètes.

1591 : Galilée se brouille avec l'université de Pise.

(d) Padoue.

Septembre 1592 : Galilée obtient la chaire de mathématiques à l'université de Padoue, vacante depuis la mort de Giuseppe Moletti (1531-1588). Comme à Pise, il y enseigne en particulier l'astronomie de Ptolémée.

1593 : Galilée écrit *La mecanniche,* traité de mécanique sur les leviers, poulies et treuils qui fut traduit en français par le Père Marin Mersenne (1588-1648) en 1634.

1595 : Galilée élabore une théorie des marées basée sur le double mouvement de la Terre.

Mai 1597 : dans une lettre à Jacopo Mazzoni (1548-1598), un ami et collègue de Pise, Galilée défend le système de Copernic.

Août 1597 : Galilée reçoit une copie du *Mysterium cosmographicum.* Dans une lettre adressée à Kepler à cette occasion, Galilée réaffirme ses convictions coperniciennes. Il recevra de Kepler une réponse enthousiaste, mais les relations entre ces deux grands coperniciens tournèrent court. Galilée, savant moderne, positif, a certainement été déconcerté par les considérations mystiques d'où Kepler prétend déduire des vérités sur la constitution du monde. Ce type de spéculations est totalement étranger à Galilée auprès duquel Kepler s'est trouvé définitivement discrédité, au point que le savant italien a négligé plus tard de s'intéresser aux découvertes astronomiques majeures de Kepler. Pourtant, comme nous l'avons vu plus haut, elles constituaient des arguments de poids en faveur de l'héliocentrisme.

29 novembre 1602 : lettre de Galilée à Guidobaldo del Monte (1545-1607) sur l'**isochronisme des oscillations du pendule**.

16 octobre 1604 : dans une lettre à Paolo Sarpi (1552-1623), Galilée énonce la **loi de la chute des corps** : *le corps étant lâché en chute libre sans vitesse initiale, l'espace parcouru est proportionnel au carré du temps* ($x = a\,t^2$) ; et aussi la conséquence suivante ou **loi des nombres impairs** : *dans la chute libre sans vitesse initiale, la suite des espaces franchis pendant des durées égales successives à partir de l'instant initial, est proportionnelle à la suite des nombres impairs* (car $a\,[(k+1)\,\tau]^2 - a\,(k\tau)^2 = a\tau^2\,(2k+1)$).

Mais Galilée ne se contente pas d'énoncer ces lois parfaitement correctes, il veut les déduire d'un «principe» qu'il tient pour «évident et naturel» : *à chaque instant, la vitesse du corps en chute libre est proportionnelle à l'espace parcouru depuis le départ.* Or ce principe est faux. Pour un énoncé correct, il faut remplacer «l'espace parcouru» par «le temps écoulé». D'autres (Léonard de Vinci, et plus tard Descartes) ont commis ou commettront la même erreur que Galilée. La difficulté provenait de ce qu'il n'était pas simple, à l'époque, d'appréhender la notion de vitesse instantanée. Galilée corrigera plus tard son erreur.

24 décembre 1604 : Galilée s'intéresse à la supernova déjà observée par Kepler. Des discussions s'élèvent à propos du dogme aristotélicien de l'immutabilité du ciel, auxquelles Galilée prend une part active.

Juin 1606 : publication de *Le operazione del compasso geometrico e militare (Les opérations du compas géométrique et militaire)* sur l'utilisation du *compas de proportion*, sorte d'ancêtre de la règle à calcul que Galilée avait inventé ou, du moins, amélioré à partir de 1597, et en assurait la fabrication. En 1604 Simon Mayr et Baldassare Capra (v. 1580-1626) avaient accusé Galilée de plagiat, mais celui-ci sortit vainqueur de cette polémique, l'accusation se retournant même contre Capra qui fut condamné en 1607.

1608 : Galilée pense à un nouveau traité de mécanique incluant chute des corps, pendule, plans inclinés. Il semble que ce soit à cette époque qu'il redressa l'erreur mentionnée plus haut.

(e) La lunette astronomique.

Octobre 1608 : un opticien hollandais présente au comte Maurice de Nassau un appareil destiné à rapprocher les objets lointains. Moins d'un mois plus tard la nouvelle parvient à Padoue mais accueillie avec scepticisme. Un ancien élève de Galilée vivant à Paris est chargé de vérifier l'information.

L'invention de la lunette est aujourd'hui attribuée au Hollandais Hans Lipperhey ou Lippershey.

Printemps 1609 : de petites lunettes d'approche grossissant 3 à 4 fois sont vendues à Paris.

Mai 1609 : confirmation de l'authenticité de l'appareil et de ses performances, même si les qualités optiques de ces lunettes hollandaises sont très médiocres.

Juillet 1609 : un étranger apporte une lunette hollandaise à Venise dans le but de conclure un marché avec le gouvernement . Galilée ne parvient pas à rencontrer l'étranger et entreprend alors la construction de sa propre lunette. Dans ces conditions, un ami de Galilée conseille au gouvernement de Venise de différer la conclusion du marché.

21 août 1609 : Galilée fait une démonstration des performances de sa lunette, grossissant 8 à 9 fois (trois fois plus que l'appareil hollandais), depuis le sommet du campanile de Saint-Marc.

24 août 1609 : en séance publique, Galilée offre une lunette au Doge de Venise.

L'intérêt de l'invention pour la marine lui vaut d'être titulaire à vie de la chaire de mathématiques à l'université de Padoue (qui dépend de la République de Venise), avec un salaire annuel de mille florins.

Novembre 1609 : Galilée obtient un grossissement de 20.

30 novembre ou 1er décembre 1609 : début des **observations astronomiques** de Galilée.

Galilée dispose d'une lunette grossissant 30 fois, ce qui représente pratiquement le maximum pour ce type de lunette avec objectif plan convexe et oculaire plan concave.

Observation de la Lune. Cependant, Galilée n'est pas le premier à faire une observation optique du ciel. Un Hollandais a déjà noté en novembre 1608 qu'il perçoit dans une lunette des étoiles invisibles à l'œil nu, et en septembre 1609 l'Anglais Thomas Harriot (1560-1621) exécute le premier dessin de la Lune observée dans une lunette grossissant 6 fois.

Décembre 1609 - janvier 1610 : premières observations de Galilée :

• **découverte du relief lunaire** ; ainsi la Lune n'est pas un astre lisse, semblable à un miroir, comme le prétendait Aristote, mais elle présente des montagnes, des vallées, et est finalement un astre semblable à la Terre. Celle-ci peut donc, aussi bien que la Lune, circuler dans l'espace. Galilée complète cette pertinente argumentation par l'interprétation de la **lumière cendrée** de la Lune comme étant l'effet d'un «clair de Terre». Cette démonstration d'une réciprocité entre la Terre et la Lune rompt la distinction fondamentale que faisait la doctrine aristotélicienne entre les domaines sublunaire et supralunaire (rappelons qu'à ce dernier appartiennent tous les astres, y compris la Lune).

• **découverte d'une multitude d'étoiles indécelables à l'œil nu**. Plus de quarante étoiles deviennent visibles parmi les Pléiades. De plus, les étoiles apparaissent comme des sources lumineuses ponctuelles, ou du moins d'un diamètre apparent beaucoup moindre que celui que leur assignait Tycho Brahé, ce qui permettait de reculer considérablement leur position dans l'espace.

• **résolution de la Voie Lactée en d'innombrables étoiles**, contrairement à l'interprétation d'Aristote.

7 janvier 1610 : Galilée aperçoit 3 astres au voisinage de Jupiter :

Est • • O • Ouest

11 janvier 1610 : il n'en aperçoit plus que 2 :

• • O

13 janvier 1610 : il en voit 4 :

• O•••

Galilée acquiert la conviction qu'il s'agit de **satellites de Jupiter**, c'est à dire d'astres gravitant autour de cette planète. Il les baptise planètes de Médicis (ou planètes médicées ou médicéennes) en l'honneur du Grand-Duc de Toscane Cosme II de Médicis (et de ses trois frères) auprès duquel, depuis quelque temps déjà, Galilée espère être engagé. Quatre ans plus tard, l'astronome allemand Simon Mayr, dit Marius (1573-1624) donnait à ces quatre satellites «galiléens» - qui sont de loin les plus gros des seize satellites de Jupiter connus aujourd'hui - les noms qu'ils portent encore, à savoir, en s'éloignant de la planète :

Io, Europe, Ganymède, Callisto.

On est donc en présence d'un système solaire en réduction où, comme dans le système de Copernic, la période de révolution des astres est fonction décroissante dans leur éloignement de l'astre central.

Cette découverte est importante pour le débat sur le système du monde. D'abord, on ne peut plus soutenir que tous les astres gravitent directement autour de la Terre. Ensuite, la Terre n'est plus la seule planète du système de Copernic à posséder un satellite. Enfin, la Lune n'est plus un obstacle à la circulation de la Terre autour du Soleil puisque Jupiter, qui se déplace dans le ciel, se fait accompagner par quatre lunes, apparemment sans les perdre. Ce sont donc autant d'objections contre la théorie copernicienne qui sont anéanties par cette découverte.

Toujours au sujet de la Lune, Galilée découvre la **libration**, et aussi que la Lune présente toujours la même face à la Terre. L'explication est que la période de rotation de la Lune sur elle-même est égale à sa révolution sidérale autour de la Terre. Mais alors que le premier mouvement est uniforme, le second ne l'est pas. Il en résulte une oscillation apparente de la Lune autour de son centre, appelée *libration*, et qui est d'amplitude ± 8° en longitude et ± 6°,8 en latitude, à laquelle il faut ajouter la *libration diurne* ne dépassant pas 1° et qui est due au déplacement de l'observateur du fait de la rotation de la Terre (effet de parallaxe). Galilée pensait que la libration était seulement due à la parallaxe. La libration fait que, de la Terre, on peut voir environ 6/10 de la surface de la Lune.

12 mars 1610 : Galilée publie à Venise ses observations dans le ***Sidereus nuncius (le messager des étoiles)***, dont le succès considérable justifie une seconde édition la même année à Francfort. Galilée y déclare que la Terre est un astre en mouvement.

Cependant, **la réalité des objets perçus à travers la lunette est mise en doute**. Certains vont même jusqu'à prétendre que les Anciens possédaient des lunettes astronomiques (meilleures), aussi comment auraient-ils pu ne pas observer ce que Galilée déclare voir ? Au-delà d'une certaine mauvaise foi de la part de tenants de la tradition aristotélicienne, il y a que la lunette pose un problème nouveau.

C'est en effet la première fois que l'homme dispose d'un appareil amplificateur des sens qui a l'ambition de rendre perceptibles des objets indécelables à l'œil nu. Mais comment ne pas se méfier de cette lunette qui donne déjà des objets visibles à l'œil nu des images fictives, puisque plus grandes que la taille apparente de l'objet, donc trompeuses. Ajoutons à cela que les lunettes de Galilée, même si elles réalisent un progrès considérable par rapport aux premières lunettes hollandaises, sont encore affectées d'aberrations chromatiques et géométriques non négligeables. C'est ainsi que la lunette utilisée par Galilée lors d'une démonstration effectuée à Bologne en avril 1610, avait le défaut de dédoubler certaines étoiles, et la démonstration, il est vrai en milieu hostile, tourna au fiasco. Mais il y eut aussi des succès.

(f) Florence.

10 juillet 1610 : Galilée est nommé «Premier mathématicien de l'université de Pise, et Philosophe du Grand-Duc Sérénissime».

1er-12 septembre 1610 : Galilée quitte Padoue pour Florence.

25 juillet 1610 : Galilée découvre que Saturne semble flanqué de deux satellites accolés à la planète. Il ne disposera jamais d'un instrument assez performant pour déceler qu'il s'agit d'anneaux.

Juillet-décembre 1610 : observation des **taches du Soleil**. Galilée, qui interprète ces taches comme appartenant réellement au Soleil (contrairement à la tradition aristotélicienne qui enseignait que les astres étaient parfaits, donc immaculés), découvre que celui-ci est animé d'une rotation axiale (période de 25 j à l'équateur, 27,5 j aux hautes latitudes), à rapprocher de la rotation axiale de la Terre voulue par les coperniciens.

30 août 1610 : Kepler confirme l'existence des satellites de Jupiter.

Octobre-décembre 1610 : observation de Vénus. Galilée découvre les **phases de Vénus**, avec un système complet de configurations comme pour la Lune. Cette observation est compatible aussi bien avec le système de Tycho Brahé qu'avec celui de Copernic, mais contredit celui de Ptolémée. En fait, elle prouve que Vénus tourne autour du Soleil en restant plus proche de ce dernier que la Terre. Dès ce moment, les anticoperniciens se sont déclarés favorables au système de Tycho Brahé.

Décembre 1610 : le Père Christophorus Clavius (1537-1612) confirme, dans une lettre à Galilée, la réalité des observations de ce dernier.

Février-mars 1611 : Ludovico delle Colombe (1565- ?) publie un pamphlet *Contro il movimento della Terra.*

24 avril 1611 : sur une requête du cardinal Robert Bellarmin (1542-1621), qui avait joué un rôle de premier plan dans le procès de Giordano Bruno, les Jésuites du Collège romain confirment point par point les observations de Galilée et reçoivent celui-ci le mois suivant.

25 avril 1611 : **Galilée devient le sixième membre de l'Accademia dei Lincei** (Académie des Lynx), société scientifique fondée en 1603. C'est le triomphe de Galilée.

Janvier 1612 : publication à Augsbourg de *Tres epistolae de maculis solaribus (Trois lettres sur les taches du Soleil)* par le Père jésuite Christoph Scheiner (1573-1650). C'est le début d'une polémique avec Galilée, tant sur la priorité de l'observation des taches à la lunette que sur leur interprétation.

Mai-juin 1612 : à la suite d'une polémique au sujet des corps flottants, où il soutient le point de vue d'Archimède contre celui d'Aristote, Galilée publie à Florence un petit traité : *Discorso intorno alle cose che stanno in su l'acqua ... (Sur les choses qui sont sur l'eau ...)*, violente attaque contre la physique aristotélicienne.

Septembre 1612 : le Grand-Duc de Toscane propose à l'Espagne une méthode de détermination des longitudes en mer imaginée par Galilée et fondée sur l'observation des éclipses des satellites de Jupiter.

28 décembre 1612 - 28 janvier 1613 : Galilée observe les Satellites de Jupiter et Neptune se trouve dans le champ de sa lunette. Mais il ne put l'observer assez longtemps pour conclure que cette «étoile» était une planète, bien qu'il lui ait semblé qu'elle s'était déplacée par rapport aux étoiles voisines.

22 mars 1613 : en réponse aux attaques du P. Scheiner (les *Trois lettres* de janvier 1612 avaient été suivies d'un autre opuscule en septembre), Galilée publie à Rome son *Istoria e dimostrazioni intorno alle macchie solari (Histoire et démonstrations relatives aux taches du Soleil)*. Galilée y détruit la théorie de Scheiner selon laquelle les taches seraient de petites planètes, théorie qui préservait le Soleil de toute souillure et le maintenait immuable.

(g) Le procès de 1616.

Novembre-décembre 1613 : le Père Benedetto Castelli (1578-1643), professeur à Pise, élève et ami de Galilée, écrit à ce dernier pour lui faire part des premières objections théologiques émises contre le système de Copernic. Il s'agit de plusieurs passages de la Bible qui semblent en contradiction avec le mouvement de la Terre.

21 décembre 1613 : dans une **lettre à Benedetto Castelli** recopiée à plusieurs exemplaires, Galilée, sûr de lui, formule clairement sa position vis à vis des Écritures.

La difficulté provenait de ce que le Concile de Trente (1545 - 1563) venait d'interdire l'interprétation des Écritures chaque fois que le texte a un sens clair. Galilée soutient l'idée que la Bible est écrite dans un langage simple, quotidien, et n'a rien d'un traité d'astronomie ; de même que nous ne prétendons pas énoncer une vérité cosmologique lorsque nous disons «le soleil se lève». Galilée réclame la séparation des domaines scientifiques et théologiques.

Novembre 1614 : Galilée parle d'un **microscope** qu'il a inventé.

20 décembre 1614 : le Père dominicain Tommaso Caccini attaque Galilée en chaire en l'église Santa Maria Novella de Florence.

7 février 1615 : une copie de la lettre de Galilée à Benedetto Castelli en envoyée à la Congrégation du Saint-Office par le Père dominicain Niccolo Lorini (1544- après 1617) de Florence.

1615 : Dans la **Lettre à Christine de Lorraine**, Grande-Duchesse de Toscane, Galilée développe les idées émises dans la lettre à Castelli et déclare nettement que les Écritures et la Science statuent dans des domaines distincts.

13 novembre 1615 : Galilée est dénoncé devant l'Inquisition de Florence pour son ouvrage sur les tâches du Soleil.

12 décembre 1615 : Galilée arrive à Rome pour se justifier auprès des autorités et persuadé qu'il finira par convaincre.

Dans l'immédiat, aucune sanction n'est prise à l'encontre de Galilée, mais le Pape Paul V charge une commission du Saint-Office de trancher théolo-giquement sur la question du mouvement de la Terre. Galilée, qui passe son temps à défendre brillamment ses opinions dans des débats contradictoires, ne peut rencontrer les autorités du Saint-Office.

Janvier 1616 : Galilée rédige le *Discorso del flusso e reflusso (Discours sur le flux et le reflux)*, théorie des marées basée sur le double mouvement de la Terre.

24 février 1616 : le Saint-Office propose une censure au sujet du mouvement de la Terre.

25 février 1616 : notification est faite, à une assemblée de théologiens et par l'Inquisition suprême, de la censure ci-dessus.

26 février 1616 : Galilée, convoqué par le Cardinal Bellarmin, est enjoint de ne plus enseigner ni soutenir le mouvement de la Terre, que ce soit par écrit ou oralement.

5 mars 1616 : mise à l'*Index* du *De revolutionibus* de Copernic jusqu'à ce qu'il soit «corrigé».

26 mai 1616 : Galilée, qui est toujours à Rome bien que le Grand-Duc l'exhorte à rentrer à Florence, obtient du Cardinal Bellarmin un certificat de non abjuration et un certificat semblable du Cardinal del Monte destiné au Grand-Duc.

4 juin 1616 : Galilée rentre à Florence.

(h) Le *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde.*

Novembre 1618 : trois comètes apparaissent successivement qui suscitent de vives polémiques. Un Jésuite romain, le Père Orazio Grassi (v. 1590-1654), présente à ce sujet une *Disputatio astronomica* qui sera publiée en mars 1619 et où il reconnaît la nature céleste des comètes.

Juin 1619 : dans un *Discorso delle Comete (Discours sur les comètes)*, Mario Guiducci (1585-1646), de l'Académie de Florence, réfute la position du Jésuite dans un texte pratiquement dicté par Galilée.

17 octobre 1619 : Grassi riposte en attaquant directement Galilée sous le pseudonyme de Lotario Sarsi, dans la *Libra astronomica ac philosophica*.

Les Jésuites, hostiles à Galilée depuis la mort de Clavius (1612), se font forts de jeter bas le système de Copernic. Les amis de Galilée, tout en l'incitant à la prudence, le pressent de donner son opinion sur les comètes.

1621 : mort du pape Paul V et du cardinal Bellarmin.

20 octobre 1623 : Galilée publie à Rome *Il Saggiatore (L'Essayeur)* sous l'égide de l'Académie des Lynx. Ce livre est dédié au cardinal Maffeo Barberini (1568-1644) qui avait soutenu Galilée dans la controverse au sujet des corps flottants et qui vient juste de devenir Pape sous le nom d'Urbain VIII, succédant à Grégoire XV.

Dans ce livre dirigé contre le pseudo-Sarsi, Galilée évite adroitement de soulever la question du mouvement de la Terre et se place sur le terrain général de la démarche scientifique en astronomie. C'est pour Galilée l'occasion de développer une argumentation judicieuse en matière de méthodologie scientifique. Mais il est surprenant que le prétexte en soit la réfutation de la thèse «planétaire» de Tycho Brahé au sujet des comètes, reprise par Grassi, tandis que Galilée soutient plutôt une thèse «atmosphérique» semblable à celle d'Aristote !

29 avril 1624 : Galilée arrive a Rome où il restera deux mois et sera reçu de nombreuses fois par le Pape. Il obtient la permission d'écrire un livre où les systèmes de Copernic et de Ptolémée seraient équitablement opposés.

Mais Urbain VIII refuse de revenir sur la décision de 1616 bien qu'il regrette qu'elle ait été prise.

Janvier 1630 : le ***Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo (Dialogue sur les deux grands systèmes du monde)*** est achevé. De nombreuses tractations précèdent le permis d'imprimer qui est finalement obtenu en Juillet 1631 dans des conditions assez confuses.

Février 1632 : publication à Florence du ***Dialogue***. Introduit par une préface où Galilée soutient ostensiblement l'édit de 1616, le livre, comme son nom l'annonce, a la forme d'un dialogue, à l'imitation de Platon, entre trois interlocuteurs :

- l'aristotélicien **Simplicio**, personnage purement fictif mais ainsi nommé par référence à Simplicius (v. 500- après 533), commentateur d'Aristote,
- le porte parole de Galilée **Salviati**, en souvenir du Florentin Filippo Salviati (1582-1614), ami de Galilée,
- un homme curieux et d'esprit ouvert, posant des questions pertinentes et le plus souvent convaincu par Salviati, **Sagredo**, en hommage au Vénitien Giovanfrancesco Sagredo (1571-1620), autre ami de Galilée.

Il s'agit d'une œuvre à la fois polémique, scientifique et pédagogique.

Dans ce livre, Galilée est censé discuter équitablement des mérites comparés des systèmes de Ptolémée et de Copernic (Galilée n'a aucune considération pour le système bâtard de Tycho Brahé). Cependant, le lecteur s'aperçoit très vite que la lutte est très inégale entre l'aristotélicien Simplicio et le copernicien Salviati souvent aidé par Sagredo. En fait, le *Dialogue* est d'abord une entreprise de démolition de la physique aristotélicienne, tous les arguments avancés par Simplicio étant systématiquement mis en pièces. Mais en même temps que s'accomplit cette destruction, on assiste tout simplement à l'édification des bases de la mécanique classique.

Galilée entend démontrer que toutes les objections opposées à la rotation axiale de la Terre par les anticoperniciens, sont irrecevables. Ces objections consistent à soutenir que telle expérience balistique bien connue (comme le jet vertical d'une pierre) se déroulerait tout autrement si la Terre tournait. Mais Galilée, à la suite de Giordano Bruno, va développer une argumentation visant à prouver que les phénomènes balistique à la surface de la Terre sont indifférents à l'immobilité ou à la rotation axiale de celle-ci. Cette conclusion est fausse dans le détail (car il y aurait quand même quelques petites différences, comme Galilée s'en est d'ailleurs aperçu lui-même), mais elle est vraie en première approximation, surtout comparée aux énormes écarts que prévoyaient les traditionalistes dans le cas d'une Terre en rotation. Essentiellement se dégage des longues et patientes démonstrations de Galilée ce qu'on a appelé depuis le **principe galiléen de relativité** qui, en langage moderne, affirme que les phénomènes mécaniques se déroulent de la même façon par rapport à deux *référentiels inertiels* mutuellement en translation rectiligne uniforme. Ces référentiels inertiels, dits encore *galiléens*, apparaissent ainsi comme des référentiels privilégiés et joueront plus tard un rôle théorique primordial en la mécanique classique.

Galilée défend aussi le système copernicien dans son ensemble, et par conséquent la révolution annuelle de la Terre autour du Soleil, mais il est moins heureux en insistant sur sa théorie des marées qu'il a fondée sur le double mouvement de la Terre et en laquelle il s'obstine à voir une preuve de ce mouvement. Car non seulement sa théorie est fausse, mais elle refuse à la Lune toute influence directe sur le phénomène des marées, contrairement à ce que l'observation a montré depuis l'Antiquité.

Écrit en italien pour toucher un public plus large, le *Dialogue* sera traduit en latin en 1635 (Hollande), 1641 (France) et 1663 (Angleterre).

(i) Le second procès

Cependant, le *Dialogue* de Galilée n'est pas jugé conforme au décret de 1616 contre la doctrine copernicienne. Les autorités s'en émeuvent et se disposent à le frapper d'interdiction. Le pape devient hostile à Galilée par lequel il estime avoir été trompé. De plus, Urbain VIII avait déjà formulé des réserves au sujet des marées dont Galilée prétendait qu'elles résultaient du mouvement de la Terre, à quoi le pape avait objecté que Dieu pouvait produire les marées de bien d'autres façons. Or, dans le *Dialogue*, cette objection est placée dans la bouche de Simplicio, personnage ridiculisé par Galilée. Le pape en aurait été vivement irrité.

Le tribunal du Saint-Office est saisi de l'affaire.

Octobre 1632 : la vente du *Dialogue* est suspendue et Galilée est tenu de se présenter devant l'Inquisition de Rome. Galilée est malade. Il retarde son départ pour Rome mais le pape reste inébranlable. Le Grand-Duc, qui ne peut plus lui éviter le voyage, lui conseille de partir.

13 février 1633 : Galilée arrive à Rome.

12 avril 1633 : *1^er^ interrogatoire* devant le tribunal du Saint-Office. Galilée prétend avoir combattu le système de Copernic dans le *Dialogue* , ce qui est faux.

30 avril 1633 : *2ème interrogatoire :* Galilée recule.

10 mai 1633 : *3ème interrogatoire :* Galilée admet qu'il n'avait retenu que le certificat du Cardinal Bellarmin de mai 1616 (certificat qui embarrasse les juges) et perdu de vue les recommandations du 26 février 1616. L'Inquisition a tiré des archives un document selon lequel une injonction officielle a été faite à Galilée en 1616, celui-ci ayant promis de ne plus défendre ou enseigner la thèse de Copernic. Mais le document, non signé par Galilée, est irrégulier. Certains le soupçonnent même, aujourd'hui, d'être un faux.

16 juin 1633 : enregistrement de la condamnation de Galilée au livre des Décrets de l'Inquisition.

21 juin 1633 : *dernier interrogatoire.*

22 juin 1633 : sentence, et abjuration de Galilée.

Le *Dialogue* est placé à l'*Index*. Interdiction est faite d'imprimer des écrits de Galilée, passés ou à venir. Galilée est mis en résidence surveillée. Il est d'abord hébergé à Sienne par l'Archevêque Ascanio Piccolomini (? -1671) qui le traite trop bien.

1er décembre 1633 : Galilée est assigné à résidence dans sa villa d'Arcetri, sur une colline dominant Florence. Il y arrive à la fin de l'année.

(j) Les dernières années.

1637 : Galilée énonce la **loi des (petites) oscillations du pendule** : *le carré de la période du pendule est proportionnel à la longueur du fil.*

Juillet 1638 : Publication à Leyde des ***Discorsi e dimostrazioni mathematiche, intorno a due nuove scienze (Discours et démonstrations mathématiques concernant deux sciences nouvelles)***, à une époque où Galilée est devenu aveugle. Les deux «sciences nouvelles» sont la résistance des matériaux et la cinématique. Cet ouvrage ne fut traduit en latin qu'en 1700, alors qu'il était dépassé par les travaux de Newton. Il y est traité en particulier des mouvements uniforme et uniformément accéléré, des trajectoires paraboliques, de la constitution de la matière, de la pesanteur de l'air, de la vitesse du son, de la vitesse de la lumière, de l'*isochronisme* des petites oscillations du pendule et de la loi des oscillations mentionnée ci-dessus.

1639 : recommandé par le Grand-Duc, Vincenzio Viviani (1622-1703) devient l'assistant de Galilée.

10 octobre 1641 : Evangelista Torricelli (1608-1647) est engagé par Galilée.

Galilée conçoit une **horloge régulée par un pendule** (Ce projet sera mené à bien par Huygens en 1657).

8 janvier 1642 : mort de Galilée à Arcetri.

(k) Les suites de l'affaire Galilée.

1. Le Grand-Duc se vit interdire l'érection d'une sépulture à Galilée, ce qui aurait pu être interprété comme un désaveu du Saint-Office. Galilée fut enterré à l'église Santa Croce de Florence et ce n'est qu'en 1734 qu'un monument funéraire put être érigé conformément aux vœux de Vincenzio Viviani.

2. En 1748, après l'expédition française au Pérou destinée à mesurer un arc de méridien, un officier espagnol, amené à évoquer le mouvement de la Terre dans son rapport, prend bien soin de le présenter comme une hypothèse pouvant être fausse. A cette époque il craignait donc encore l'Inquisition espagnole.

3. Par une série de mesures (1757,1822), l'Église revient progressivement sur l'interdiction générale de publier des œuvres soutenant les thèses coperniciennes ainsi que sur l'interdiction frappant les œuvres de Copernic et de Galilée qui furent finalement retirées de l'*Index* en 1846.

4. Après de longues hésitations, l'Église (Pie XI) décida la béatification du cardinal Robert Bellarmin (1924), puis sa canonisation (1930), pour le déclarer enfin «docteur de l'Église» (1931).

5. 10 novembre 1979 : Jean-Paul II exprime le souhait qu'une commission se penche sur le cas Galilée.

3 juillet 1981 : création d'une Commission pontificale d'étude de la controverse ptoléméo-copernicienne aux XVI^{e} et XVII^{e} siècles.

31 octobre 1992 : dans un discours prononcé en clôture des travaux de la Commission, Jean-Paul II réaffirme la «légitime autonomie de la science» mais n'annonce aucune annulation de la sentence de 1633. D'ailleurs l'Église considère que le débat qui opposa l'Église et la science sur la question cosmologique fut clos lorsque l'imprimatur fut accordé en 1822 au chanoine Settele qui désirait publier un ouvrage d'astronomie (qui ne pouvait être que copernicien à l'époque). Malgré ce que les médias ont annoncé avec insistance à ce sujet, c'est donc sur une pseudo-réhabilitation de Galilée qu'ont débouché les travaux de la Commission pontificale.

(l) Galilée et la mécanique.

Galilée peut être à juste titre considéré comme l'initiateur de la mécanique classique. On a beaucoup débattu la question de savoir s'il s'est aidé de l'expérience ou si ses résultats sont davantage le fruit d'une réflexion abstraite, mais on sait aujourd'hui que sa démarche participe à la fois des deux types d'approche.

L'un des traits marquants du génie de Galilée est son aptitude, devant un phénomène donné, à en séparer la partie essentielle des perturbations secondaires, et à dégager ainsi la loi physique simple qui régirait le phénomène dans des conditions idéales. C'est ainsi qu'il a trouvé la loi de la chute des corps dans le vide, sans se laisser troubler par les complications liées à la résistance de l'air. Ce même effort a engagé naturellement Galilée dans la voie de la cinématique.

Mais cet effort d'abstraction a des limites, et Galilée ne s'est jamais totalement dégagé du contexte du champ de la pesanteur. Sa mécanique reste essentiellement une mécanique terrestre, ce qui ne lui a pas permis d'énoncer le *principe d'inertie* en toute généralité, même s'il s'en est souvent approché. Le mérite en est revenu à **René Descartes** (1596-1650) dans ses *Principes de la Philosophie* (Amsterdam 1644). En fait, ce principe figure déjà dans *Traité du Monde*, ouvrage que Descartes a renoncé à publier à la suite de la condamnation de Galilée, et où la théorie de Copernic est adoptée comme allant de soi. Le *Traité du Monde* ne sera publié qu'en 1664.

Dans les *Principes*, Descartes énonce en particulier les deux lois de la nature suivantes :

- 1ère loi, ou loi de conservation du mouvement ou du repos,
- 2ème loi, ou loi du mouvement naturel en ligne droite.

Mais pour expliquer le mouvement des planètes, Descartes est dans l'impasse avec sa **théorie des tourbillons**, non quantifiable et, de plus, insoutenable. C'est que, au contraire de Newton, Descartes n'acceptait pas une théorie qui n'explique pas directement le mouvement. Il refusait l'idée d'action à distance et, qui plus est, dans le vide. Pour Descartes, le vide n'existe pas. Un corps dans le vide n'a pas de gravité.

12 - L'ASTRONOMIE D'OBSERVATION AU XVIIe SIÈCLE

En dehors des importantes observations de Galilée, le XVII^{e} siècle est, dans ce domaine, marqué par les dates suivantes :

1611 : Nicolas Peiresc (1580-1637) découvre la **nébuleuse d'Orion**.
Simon Mayr (Marius) (1573-1624) (re)découvre la nébuleuse d'Andromède.

1631 : Pierre Gassendi (1592-1655) observe un passage de Mercure devant le Soleil.

1639 : Jeremiah Horrocks (1618-1641) observe le passage de Vénus devant le Soleil.

1640 : Niccolo Zucchi observe des taches sur Mars et des bandes sur Jupiter.

1652 : Ismaël Boulliau (1605-1694) mesure la **période de la variation d'éclat de Mira Ceti**, étoile de la constellation de la Baleine (333 jours).

1655 : Christiaan Huygens (1629-1695) découvre **Titan**, le plus gros satellite de Saturne.

1656 : Huygens découvre l'**anneau de Saturne**.

1666 : Jean-Dominique Cassini (1625-1712) estime à 24h40m la période de **rotation de Mars** (en réalité 24h37m23s).

1667 : fondation de l'**Observatoire de Paris** par Louis XIV, achevé en 1672. Premier directeur de fait : J.-D. Cassini.

1671 : J.-D. Cassini découvre **Japet**, satellite de Saturne.

1672 : J.-D. Cassini découvre **Rhéa**, satellite de Saturne.

1675 : J.-D. Cassini découvre la **séparation de l'anneau de Saturne** (division de Cassini).

1675 : fondation de l'**Observatoire de Greenwich** par Charles II.

1676 : en comparant les observations des éclipses des satellites de Jupiter aux tables dressées par J.-D. Cassini, Olaüs Römer (1644-1710), astronome danois travaillant à l'Observatoire de Paris, découvre la **finitude de la vitesse de la lumière**.

1679 : fondation par Jean Picard (1620-1682) de la *Connaissance des Temps ou des mouvements célestes*, publication annuelle d'éphémérides et de diverses données astronomiques.

1682 : Edmond Halley (1656-1742) observe en septembre une comète dont il reconnut la périodicité en l'identifiant à des comètes observées antérieurement, particulièrement en 1607 et 1531. Il prédit son retour pour la fin de l'année 1758 où elle fut effectivement observée. Il s'agit, bien sûr, de la célèbre **comète de Halley**.

1684 : J.-D. Cassini découvre **Téthys** et **Dioné**, satellites de Saturne.

13 - ISAAC NEWTON (1642-1727)

25 décembre 1642 : naissance d'Isaac Newton à Woolsthorpe, dans le Lincolnshire.

Cette date est relative au calendrier julien qui ne fut officiellement abandonné par les Anglais (peu empressés d'appliquer une réforme papiste) qu'en 1752, soit 170 ans après l'introduction du nouveau calendrier par le pape Grégoire XIII. Dans le calendrier grégorien, Newton est né «10 jours plus tard», le 4 janvier 1643. Ceci explique que les dictionnaires ou index ne s'accordent pas tous sur la naissance de Newton qui est située tantôt en 1642, tantôt en 1643.

1660 : Newton entre à l'université de Cambridge (Trinity College). Il y suit les cours du mathématicien Isaac Barrow (1630-1677).

1664 : Newton connaît la *Géométrie* de Descartes.

Janvier 1665 : il obtient le titre de Bachelier es arts.

Juin 1665 : l'université de Cambridge est fermée à cause d'une épidémie de peste.

Newton passe alors 18 mois à Woolsthorpe, pendant lesquels il jette les fondements de son œuvre en mathématiques (utilisation des séries infinies pour l'analyse des courbes, calcul des fluxions), en optique (décomposition de la lumière par le prisme) et mécanique céleste.

Cependant, il va au moins une fois à Cambridge entre mars et juin 1666 et certains de ses travaux ont pu être accomplis à l'occasion d'un tel séjour.

C'est pendant cette période féconde à laquelle on se réfère sous le nom d'**«années admirables»** que se situe l'épisode de la **chute de la pomme** (rapportée par Newton lui-même) à Boothby ou à Woolsthorpe. Newton se pose alors la question de savoir si la pesanteur et le mouvement de la Lune autour de la Terre sont susceptibles d'une même explication. Mais Newton ne peut à ce moment vérifier son hypothèse, faute de la connaissance d'une valeur sûre du rayon terrestre, et aussi pour une autre raison que nous évoquerons plus loin. Par ailleurs, Newton a prétendu avoir trouvé dès cette époque la loi de variation de l'attraction des planètes par le Soleil en raison inverse du carré de la distance, mais rien n'est moins sûr.

Voyons comment cette loi peut être obtenue dans un cadre moderne.

Assimilons les planètes à des corps se déplaçant d'un mouvement circulaire uniforme autour du Soleil pour centre.

Soit ω la vitesse angulaire (constante positive) de la planète P (en radians par unité de temps) et soit r la distance de P au Soleil O.

Position de la planète : $\overrightarrow{OP} = r\vec{u}$, $\quad \vec{u} = \cos\omega t\,\vec{i} + \sin\omega\,\vec{j}$

Vitesse de la planète : $\vec{V} = \dfrac{\overrightarrow{OP}}{dt} = r\dfrac{d\vec{u}}{dt}$

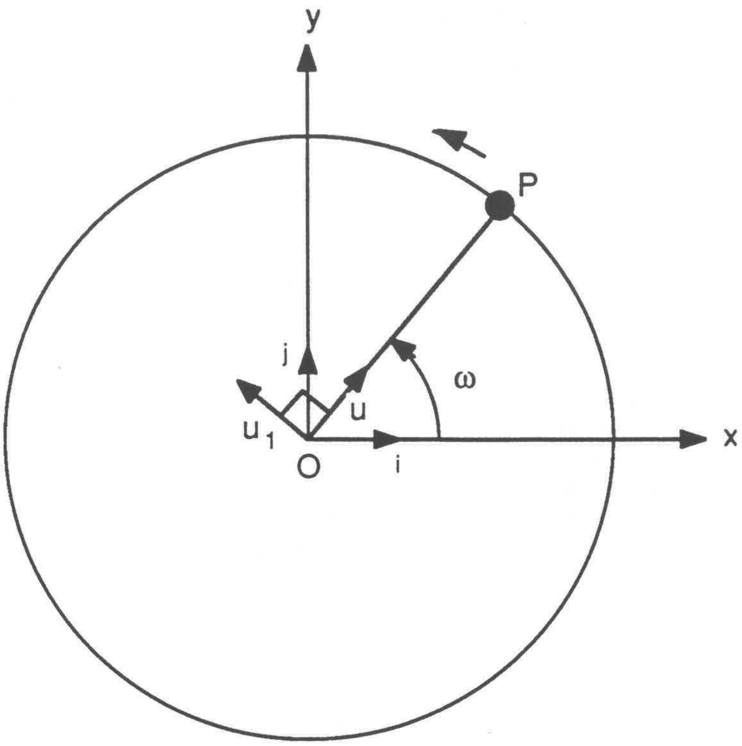
$$\frac{d\vec{u}}{dt} = -\,\omega \sin\omega t\,\vec{i} + \omega \cos\omega t\,\vec{j} = \omega\,\vec{u_1}$$

d'où

$$\vec{V} = r\,\omega\,\vec{u_1} \quad \text{et} \quad \|\vec{V}\| = r\,\omega$$

Accélération de la planète : $\vec{\Gamma} = \dfrac{d\,\vec{V}}{dt} = r\,\omega\dfrac{d\vec{u_1}}{dt} = -\,r\,\omega^2\vec{u} = -\dfrac{\|\vec{V}\|^2}{r}\vec{u}$,

$\|\vec{\Gamma}\| = r\,\omega^2.$



Cette accélération correspond à une force d'attraction exercée par le Soleil sur la planète, donc à une *force centripète* responsable de la trajectoire circulaire de la planète qui, en l'absence de cette force (et d'autres), aurait une trajectoire rectiligne.

Newton aurait déjà eu, à cette époque, l'idée de concevoir le mouvement circulaire en terme de *force centrifuge*, concept introduit par Huygens dans son étude du mouvement circulaire publiée en 1673 dans son *Horologium oscillatorium*. Pourtant, Newton continuera encore pendant des années à s'exprimer en terme de force centrifuge.

Si T est la révolution sidérale de la planète, on a :

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad \text{, d'où } \|\vec{\Gamma}\| = r\frac{4\pi^2}{T^2}.$$

Si maintenant on utilise la 3e loi de Kepler selon laquelle $\frac{T^2}{r^3}$ = K (constante), il vient :

$$\|\vec{\Gamma}\| = \frac{4\pi^2}{K}\frac{1}{r^2}.$$

29 octobre 1669 : Newton est nommé Professeur de mathématiques à l'Université de Cambridge, succédant à Isaac Barrow qui a peut-être démissionné pour laisser la place à Newton.

Janvier 1671 : Newton est élu à la Royal Society (Société royale des Sciences de Londres, équivalent britannique de notre Académie des Sciences) après avoir présenté un remarquable **télescope** (appareil comportant un miroir, ce qui le distingue des lunettes composées exclusivement de lentilles).

1672 : travaux sur la **théorie des couleurs**.

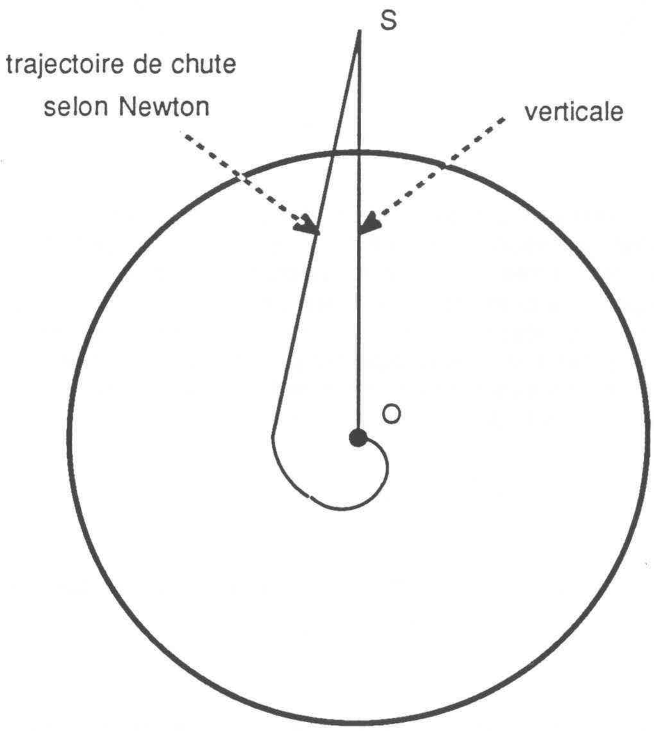
Après les mesures du méridien faites par Jean Picard (1620-1682) et dont les résultats sont publiés en 1671, Newton, disposant d'une valeur correcte du rayon de la Terre, aurait reconnu le bien fondé de son hypothèse au sujet de la Lune et de la pesanteur.

1674 : Robert Hooke (1635-1703) publie *An Attempt to prove the motion of the Earth by Observation (Une tentative de prouver le mouvement de la Terre par l'observation)*: La raison de ce titre est que Hooke croit, à tort, avoir décelé un effet de parallaxe pour l'étoile γ de la constellation de Dragon. Mais ce qui est remarquable est qu'il expose dans ce texte, qui aurait été rédigé dès 1670, un système du monde semblable à celui conçu (mais non divulgué) par Newton, où les mouvements des astres sont régis par une attraction universelle. Mais il ignore la loi en $1/r^2$.

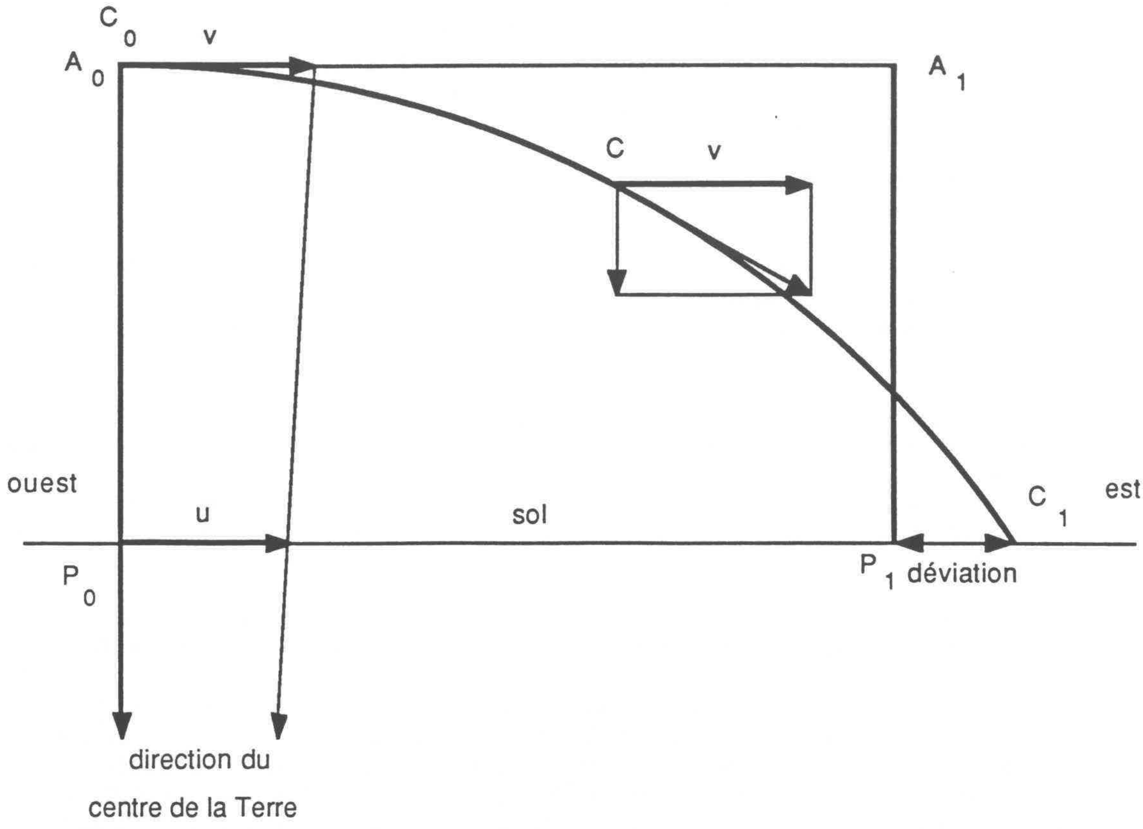
1679 : sans doute en combinant les résultats de Huygens et la 3e loi de Kepler (voir plus haut), Hooke trouve la loi en $1/r^2$.

24 novembre 1679 : après une brouille en 1672 au sujet d'une question d'optique, et une tentative avortée de réconciliation en 1676, Hooke, devenu secrétaire de la Royal Society, réitère à Newton sa demande d'échanges scientifiques.

28 novembre 1679 : réponse favorable de Newton à Hooke. En même temps il propose à Hooke une expérience destinée à mettre en évidence le mouvement diurne de la Terre. Selon Newton, à cause de ce mouvement, un corps lâché en chute libre ne descendrait pas le long de la verticale mais légèrement à l'est de celle-ci. Il imaginait même ce que serait la trajectoire à l'intérieur de la Terre si le corps pouvait la pénétrer sans rencontrer de résistance, et il prévoyait une trajectoire en spirale se terminant au centre de la Terre (figure ci-dessous).



Newton donne l'explication suivante de la **déviation de la chute libre vers l'est**. Il faut pour cela imaginer que le corps est lâché, par exemple, depuis le sommet d'une tour, et s'intéresser au mouvement «absolu» du corps, c'est-à-dire, non pas relativement au sol, mais relativement à un repère «fixe» (défini par le centre de la Terre et des directions d'étoiles) par rapport auquel est définie la rotation axiale de la Terre. Cela étant, comme le sommet S de la tour est plus éloigné de l'axe de la Terre que son pied P, la vitesse linéaire v que lui confère la rotation de la Terre, et qui sera la vitesse initiale (horizontale) du corps lâché en chute libre, est supérieure à la vitesse linéaire u du pied de la tour. Comme, pendant la chute, le corps va conserver la vitesse horizontale v que lui a conféré le sommet de la tour (dont il était solidaire avant d'être lâché), il va donc parcourir plus de chemin vers l'est que le pied de la tour qui se déplace moins vite. Le corps atteindra donc le sol en C_1, à l'est du pied de la tour qui sera seulement parvenu en P_1. Cette explication est qualitativement acceptable pour une première approche du problème mais, exploitée quantitativement, elle conduit à surestimer de moitié la déviation réelle.



Par le raisonnement simple de Newton exposé ci-dessus, on obtient facilement que la différence de vitesse entre le sommet de le tour, supposée de hauteur h, et son pied, est $h\,\omega\cos\varphi$, si φ est la latitude du lieu de l'expérience et ω la vitesse angulaire de la rotation de la Terre. Il en résulte la déviation vers l'est $t\,h\,\omega\cos\varphi$, si t est la durée de la chute, soit encore

$$\sqrt{\frac{2}{g}}\,\omega\,h^{3/2}\cos\varphi$$

si l'on néglige la résistance de l'air (qui ne réduit que très peu la déviation) et si g est l'accélération de la pesanteur. Mais si le raisonnement de Newton inclut l'approximation que le champ de la pesanteur est uniforme ce qui, *a posteriori*, se révèle légitime, en revanche il ne prend pas en compte de façon correcte le changement de direction de la verticale provoqué par la rotation de la Terre. D'après ce que nous avons dit, la déviation réelle, toujours en faisant abstraction de la résistance de l'air, est en effet égale à

$$\frac{2}{3}\sqrt{\frac{2}{g}}\,\omega\,h^{3/2}\cos\varphi.$$

Ainsi, pour une hauteur de chute de 30 mètres en un lieu de latitude 45°, cette déviation vers l'est est d'environ 2,5 millimètres.

La chute du corps à l'est de la verticale est assurément une nouveauté, mais des trajectoires spirales aboutissant au centre de la Terre avaient déjà été envisagées. En effet, Newton n'était pas le premier à spéculer sur la trajectoire de la chute libre supposée se poursuivre sans rencontrer de résistance à l'intérieur de la Terre, et dans le cas où celle-ci tournerait ; et toutes les solutions proposées, notamment par Fermat, Mersenne et Galilée, avaient été des spirales atteignant le centre de la Terre (Plus particulièrement, Galilée avait indiqué une trajectoire semi-circulaire). Certaines idées aristotéliciennes - le centre de la Terre est le lieu naturel des corps graves - imprégnaient encore les esprits.

Il faut toutefois observer que, contrairement aux trajectoires ci-dessus qui sont toutes «absolues», la trajectoire spirale de Newton est une trajectoire «apparente», c'est-à-dire telle que la perçoit un observateur au sol, et donc destinée à se substituer à la trajectoire apparente verticale à laquelle tout le monde croyait jusqu'alors.

En réalité, d'après la seconde formule ci-dessus, la trajectoire apparente de la chute libre est un arc de cubique. On peut noter qu'à l'équateur, la tangente à cette trajectoire au point d'impact au sol s'écarte de la verticale d'un angle sensiblement égal à l'angle ωt dont a tourné la Terre pendant la durée t de la chute.

9 décembre 1679 : réponse de Hooke à Newton. Il exprime son désaccord avec Newton sur deux points :

1°. Au lieu de la trajectoire spirale, Hooke prévoit une trajectoire «elliptoïde» entourant le centre de la Terre. Ce qui appelle deux remarques :

(a) Nous en reparlerons plus bas, mais disons tout de suite que la trajectoire aérienne «absolue» du corps en chute libre est théoriquement un arc d'ellipse, de sorte que Hooke, avec son «elliptoïde», est sur le chemin de la vérité.

(b) C'est la première fois qu'est proposée une trajectoire de chute libre n'aboutissant pas au centre de la Terre, mais le contournant, ce qui est, en effet, conforme à la solution théorique correcte.

Hooke a donc corrigé la solution de Newton sur un point essentiel, mais il ne s'est pas rendu compte qu'il envisageait une trajectoire «absolue» quand celle de Newton était «apparente».

2°. Selon Hooke, la chute libre devrait être déviée non seulement vers l'est, mais aussi vers le sud (dans l'hémisphère nord). Cette conclusion fausse résulte à la fois d'une intuition remarquable et d'une erreur.

(a) Comme ses devanciers à propos de ce problème, Newton avait implicitement envisagé le cas relativement simple de la chute libre à l'équateur. Hooke, lui, se place en un point de latitude moyenne (Londres) et considère avec raison que la chute (absolue) s'opérera dans le plan déterminé par le centre de la Terre et le vecteur vitesse initial du corps. Ce dernier va donc chuter en un point du grand cercle intersection du plan ci-dessus avec la surface de la Terre, tandis que le pied de la verticale se déplace sur un parallèle, au nord du grand cercle que l'on vient d'évoquer. Ainsi s'explique la composante méridionale de la déviation.

(b) Mais l'erreur de Hooke est de croire que la verticale passe par le centre de la Terre. Car la seule verticale ayant une signification physique, celle par rapport à laquelle on peut envisager de mettre expérimentalement en évidence la déviation de la chute libre, est celle définie par le fil à plomb. Or il se trouve que la force centrifuge développée par la rotation de la Terre écarte celui-ci vers le sud (dans l'hémisphère nord et par rapport à la droite définie par le point d'attache et le centre de la Terre), et d'une manière qui compense exactement la déviation de la chute libre vers le sud prévue par Hooke selon le raisonnement précédent.

Il n'y a donc pas de déviation vers le sud.

13 décembre 1679 : réponse de Newton à Hooke. Newton est d'accord quant à la déviation de la chute vers le sud-est. Mais, curieusement, Newton se place dans l'hypothèse où le corps est soumis à une force d'attraction constante !

6 janvier 1680 : réponse de Hooke à Newton. Il relève l'erreur de Newton et déclare : «mais moi je suppose que l'attraction est toujours inversement proportionnelle au carré de la distance au centre». Newton ne répond pas.

17 janvier 1680 : lettre de Hooke à Newton. Hooke pose le problème de savoir quelle serait la trajectoire d'un corps soumis à une attraction centrale inversement proportionnelle au carré de la distance au centre.

On devine combien est important le rôle joué par cette correspondance Hooke-Newton dans l'élaboration de la pensée newtonienne. A cette époque, la clairvoyance est évidemment du côté de Hooke, et Newton aura du mal à faire croire que Hooke n'est pour rien dans la découverte de la loi d'attraction en $1/r^2$. Mais Hooke n'avait ni le génie, ni les moyens mathématiques de Newton, et on sait que ce dernier s'est largement rattrapé par la suite.

1680 : Newton calcule que, vis à vis de l'attraction proportionnelle à la masse et inversement proportionnelle au carré de la distance, une boule dont la densité présente une symétrie sphérique (c'est-à-dire ne dépendant que de la distance au centre, ce qui est sensiblement le cas des planètes), se comporte comme si toute sa masse était concentrée en son centre. Ce résultat remarquable va permettre à Newton de comparer le mouvement de la Lune à la chute des corps, moyennant toutefois une estimation correcte du rayon terrestre.

En effet, grâce à cette propriété qui a longtemps fait défaut à Newton, l'attraction de la Terre doit s'exercer de la même façon vis à vis de la Lune que vis à vis de la pierre à proximité de sa surface, à savoir comme si toute la masse de la Terre était concentrée en son centre. S'agissant de l'attraction exercée sur la Lune, on pouvait bien supposer qu'il en était ainsi, à cause des dimensions modestes de la Terre (et de la Lune) par rapport à la distance Terre-Lune. Mais rien n'était moins évident lorsque l'attraction intéressait un corps situé au voisinage de la Terre, et que cette attraction devait d'abord être regardée comme la résultante d'attractions «élémentaires» entre les «masses ponctuelles» composant les deux corps en présence.

Alors, si l'accélération de la Lune, à la distance d du centre de la Terre, a pour intensité Γ, l'accélération g de la pesanteur, à la distance R du même centre (R = rayon de la Terre), doit être égale à $(d/R)^2\,\Gamma$, ceci à cause de la loi en $1/r^2$. Si ω est la vitesse angulaire de la Lune sur sa trajectoire supposée circulaire et T sa révolution sidérale, on doit donc avoir

$$g = \frac{d^2}{R^2}\, d\,\omega^2 = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \left(\frac{d}{R}\right)^3 R.$$

En ce qui concerne les distances, on voit que la dernière expression fait intervenir le rapport d/R connu depuis longtemps pour être environ égal à 60, mais aussi le rayon de la Terre et, comme il a été signalé plus haut, ce n'est qu'après les travaux de Picard que Newton disposera d'une valeur fiable de R. Le calcul numérique avec $d/R \approx 60$, $R \approx 637.\,10^4$ m et $T \approx 27{,}322$ jours donne

$$g \approx \left(\frac{2\pi}{27{,}322 \times 24 \times 3600}\right)^2 \times 60^3 \times 637.\,10^4 \approx 9{,}75 \text{ m s}^{-2},$$

valeur proche de l'accélération correcte 9,81 m s^{-2}, et satisfaisante compte tenu des approximations effectuées.

Avant 1684 : Newton résout le problème posé par Hooke dans sa lettre du 17 janvier 1680 en montrant qu'une ellipse convient. De cette façon, la loi de l'attraction universelle et les lois de Kepler se confirment mutuellement.

Remarquons aussi qu'à cause du résultat de 1680, il existe une analogie parfaite entre le mouvement des planètes et celui du corps en chute libre : les deux mouvements obéissent aux lois de Kepler. En particulier, la trajectoire «absolue» d'un corps en chute libre est un arc d'une ellipse dont le centre de la Terre occupe l'un des foyers. Lâcher un corps en chute libre c'est en effet lancer un satellite, mais avec une vitesse initiale, dirigée horizontalement, qui ne possède pas une intensité suffisante pour lui permettre de contourner la Terre et donc d'éviter la rencontre avec le sol.

Août 1684 : Halley rend visite à Newton qui lui révèle sa découverte. Halley le presse de la publier. Mais Newton ne retrouve pas ses calculs.

Novembre 1684 : nouvelle visite de Halley à qui Newton montre ses travaux. Encouragé, il écrit un petit article *De motu corporum (Sur le mouvement des corps)* en deux parties.

10 décembre 1684 : Halley fait part du *De motu* à la Royal Society.

1686-1687 : Newton rédige et publie, avec l'aide de Halley, son œuvre capitale ***Philosophiae naturalis principia mathematica (Principes mathématiques de la philosophie naturelle)*** en 3 livres précédés de définitions et axiomes, tirée à 250 exemplaires. En voici le contenu :

• **Définitions et axiomes** : notions de masse, de temps, d'espace, de lieu, de mouvement. Énoncé des **trois principes élémentaires de la dynamique** :

1. En dehors de toute force agissant sur lui, tout corps persévère dans l'état de de repos ou de mouvement rectiligne uniforme où il se trouve (principe d'inertie).

2. Le changement de mouvement (= accélération) est proportionnel à l'intensité de la force agissant sur le corps et de même direction qu'elle, et inversement proportionnel à la masse du corps (◊F = m ◊Ì).

3. A toute action s'oppose une réaction égale et de sens contraire.

• **Livre I** : correspond à la 1$^{\text{ère}}$ partie de *De motu* .

Démonstration de l'équivalence entre le mouvement à accélération centrale et le mouvement régi par la loi des aires.

Démonstration de l'équivalence entre la trajectoire conique d'un mouvement à accélération centrale et le fait que l'accélération est inversement proportionnelle au carré de la distance.

Amélioration de la troisième loi de Kepler.

Considération de plusieurs corps s'attirant mutuellement.

Démonstration de l'équivalence entre l'action attractive d'une boule dont la densité présente une symétrie sphérique et d'un corps ponctuel de même masse disposée en son centre.

• **Livre II** : traite du mouvement dans un milieu résistant et contient des résultats d'hydrodynamique.

• **Livre III** intitulé *Le système du monde* : version détaillée de la 2$^{\text{ème}}$ partie du *De motu*.

Identité entre la force causant les mouvements célestes et les marées et celle responsable de la gravité.

Énoncé de la **loi de la gravitation universelle** : $F = k\dfrac{m\,m'}{r^2}$

(où $k = 6{,}672.10^{-11}$ $m^3\ kg^{-1}\ s^{-2}$).

Mouvement des planètes et satellites, mouvement de la Lune, mouvement des comètes.

Aplatissement de la Terre.

Précession des équinoxes.

Énoncé de règles de raisonnement comme :

1. Ne pas considérer plus de causes qu'il n'est nécessaire.
2. Les mêmes causes produisent les mêmes effets.

Remarques.

1. Newton a toujours refusé de reconnaître la contribution de Hooke qui lui avait peut-être suggéré la loi d'attraction en $1/r^2$, sous le prétexte que Hooke, renouvelant l'erreur de Kepler, en déduisait que la vitesse de la planète était inversement proportionnelle à sa distance au Soleil.

2. Newton a révélé la justesse et l'importance des lois de Kepler, et notamment de la loi des aires que les astronomes n'utilisaient toujours pas. Quant à la version améliorée de la 3$^{\text{e}}$ loi, elle est précieuse pour déterminer la masse des planètes possédant au moins un satellite.

1696 : Newton obtient le poste de Maître de la Monnaie.

30 novembre 1703 : Newton succède à Hooke comme secrétaire de la Royal Society.

1704 : Newton publie son *Opticks* .

1713 : 2$^{\text{e}}$ édition des *Principia* avec quelques modifications (750 exemplaires).

1717 : 2$^{\text{e}}$ édition de l'*Opticks*.

1726 : 3$^{\text{e}}$ édition des *Principia*.

20 mars 1727 : Mort de Newton à Londres.

1729 : Traduction anglaise des *Principia* par Motte.

14 - L'ASTRONOMIE THÉORIQUE ET D'OBSERVATION APRÈS NEWTON

14.1. L'ACCEPTATION DE LA MÉCANIQUE NEWTONIENNE SUR LE CONTINENT.

La théorie newtonienne de la gravitation présentait l'inconvénient d'être fondée sur un concept d'attraction à distance, propriété de la nature pour laquelle Newton ne proposait aucune explication. De plus, cette théorie s'opposait radicalement à la conception cartésienne. Il ne lui fut donc pas facile de s'imposer sur le continent où elle fut d'abord très mal accueillie, et où se développèrent de violentes polémiques. Elle trouva cependant un ardent défenseur en la personne de Voltaire.

1727 : Voltaire assiste aux funérailles de Newton.

1732 : une étude de Daniel Bernoulli (1700-1782) sur le problème des deux corps est couronnée par l'Académie des Sciences de Paris.

1735-1744 : deux expéditions scientifiques, l'une au Pérou (Bouguer, La Condamine), l'autre en Laponie (Maupertuis, Clairaut), permirent, par des mesures d'arcs de méridien, d'établir que la Terre est légèrement aplatie aux pôles, alors que les cartésiens prévoyaient au contraire un allongement selon l'axe polaire.

1738 : Voltaire publie les *Éléments de la philosophie de Newton.*

1752 : Alexis Clairaut (1713-1765) publie sa *Théorie de la lune déduite du seul principe de l'attraction réciproquement proportionnelle aux quarrés des distances* .

1754-1756 : Jean d'Alembert (1717-1783) publie ses *Recherches sur différens points importans du système du monde*, en trois volumes.

1756 : Clairaut donne ses *Tables de la lune, calculées suivant la théorie de la gravitation universelle* .

Publication de la traduction française des *Principia* de Newton réalisée par la Marquise du Châtelet (1706-1749).

1759 : retour de la comète de Halley de façon à peu près conforme aux prévisions.

Après le passage de 1682, et ayant identifié cette comète avec celles observées en 1607 et 1531, Halley avait prévu son retour pour la fin de 1758. Mais des irrégularités dans la période de la comète avaient été attribuées par Halley à l'action perturbatrice de Jupiter et Saturne. Clairaut entreprit la théorie de ce problème nouveau consistant à calculer la date du retour de la comète au périhélie, compte tenu de l'effet retardateur des perturbations ci-dessus. Pour les calculs, Clairaut fut aidé par Joseph-Jérôme Lalande (1732-1807) et Madame Nicole-Reine Lepaute et, dans un mémoire lu à l'Académie le 14 novembre 1758, il prédit le retour au périhélie pour la mi-avril, soit avec 618 jours de retard par rapport à la révolution précédente, avec une erreur possible d'un mois. La comète se présenta en effet à son périhélie un mois plus tôt que prévu, ce qui n'empêchait pas la performance de Clairaut d'être remarquable. De plus, ce succès assurait la victoire définitive de la théorie de Newton sur celle de Descartes.

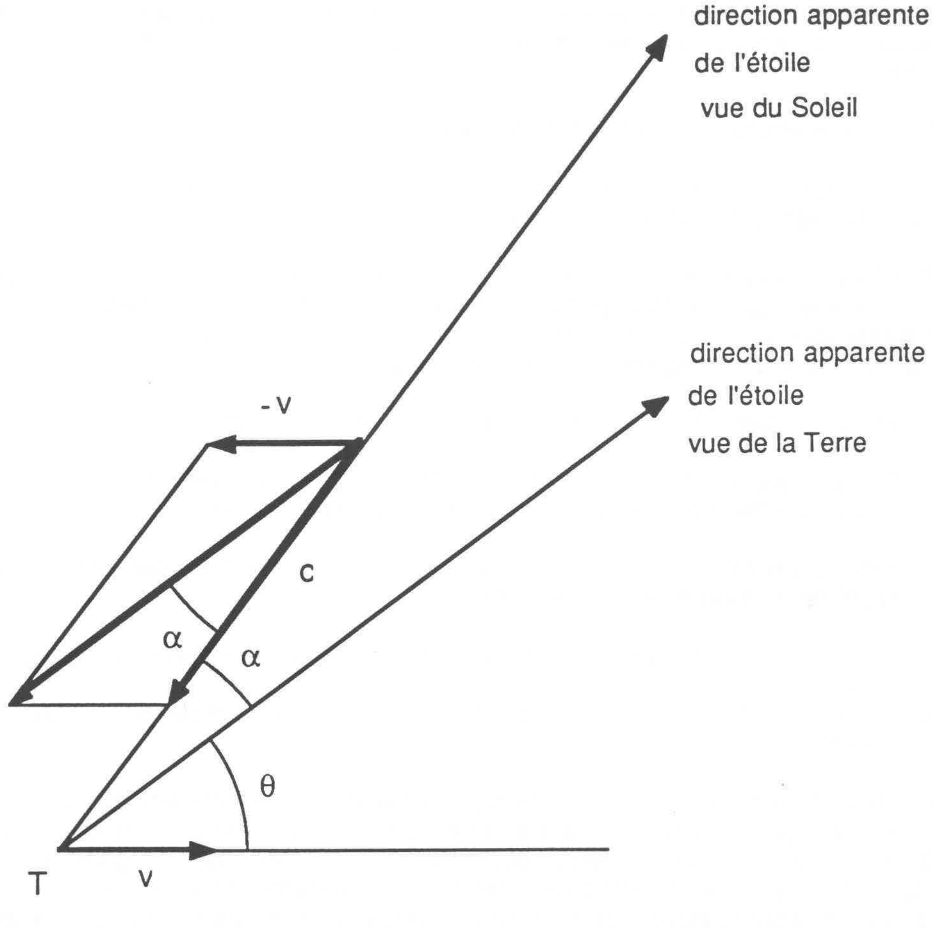
14.2. L'ASTRONOMIE D'OBSERVATION.

En 1669, Hooke avait cru déceler une parallaxe annuelle d'environ 30" pour l'étoile γ du Dragon. Le premier astronome royal de l'observatoire de Greenwich, John Flamsteed (1646-1719), crut faire une semblable découverte pour l'Étoile Polaire en 1675. Cependant, il fut reconnu que le déplacement apparent observé par Flamsteed n'était pas conforme à ce qu'on attendait d'un effet de parallaxe.

1725-1726 : James Bradley (1693-1762) fait la même observation que Flamsteed, mais sur l'étoile γ du Dragon.

1729 : Bradley publie sa découverte et son interprétation de l'**aberration annuelle des fixes**.

Abstraction faite de tout effet de parallaxe (c'est-à-dire en faisant la supposition géométrique d'un éloignement infini de l'étoile), la direction dans laquelle une étoile est vue depuis la Terre ne coïncide pas avec celle dans laquelle elle serait vue depuis le Soleil, et varie au cours d'une année. Bradley explique ce phénomène par la composition de la vitesse de la lumière provenant de l'étoile avec la vitesse de la Terre sur son orbite.



On voit que, par rapport à la direction dans laquelle l'étoile serait vue depuis le Soleil, et dans le plan défini par cette direction, la Terre et sa vitesse orbitale vectorielle, la direction de visée de l'étoile par l'observateur terrestre est déplacée, dans le sens de la vitesse orbitale, de l'*angle d'aberration*

$$\alpha \approx \sin\alpha = (v/c) \sin\theta,$$

où c est la vitesse de la lumière. Cette formule fait intervenir la *constante d'aberration annuelle*

$$k = v/c \approx 9{,}94.\ 10^{-5} \text{ radian} \approx 20'',5$$

qui est la valeur maximum de l'angle α, ce dernier variant, pour une étoile donnée, avec l'angle θ qui dépend de la position de la Terre sur son orbite. Il en résulte que la position apparente de l'étoile décrit, au cours de l'année, une petite ellipse dont le grand axe, parallèle au plan de l'écliptique, a pour demi-longueur angulaire 20",5 (la même pour toutes les étoiles), tandis que la demi-longueur du petit axe est k sinb où b est la latitude de l'étoile (inclinaison de la direction de l'étoile sur le plan de l'écliptique).

L'aberration annuelle des fixes est la première manifestation observée du mouvement orbital de la Terre autour du Soleil.

1727-1737 : Bradley découvre la **nutation**, due à un mouvement de l'axe terrestre de période 18 ans 7 mois, qui s'ajoute au mouvement conique de précession.

Novembre 1750 - juin 1754 : Voyage au cap de Bonne-Espérance de Nicolas-Louis de Lacaille (1713-1762). Il relève les positions d'environ 10000 étoiles et donne à beaucoup de constellations australes les noms qu'elles portent aujourd'hui.

1761 et 1769 : **observations des passages de Vénus** devant le Soleil, dont le but était d'estimer la parallaxe solaire. Après les observations de 1761 on conclut à une parallaxe moyenne du Soleil d'environ 9",15. Le réexamen, au XIX^{e} siècle, de l'ensemble des résultats de 1761 et 1769 permit d'abaisser cette estimation à 8",83, valeur peu éloignée de celle admis aujourd'hui : 8", 794.

Signalons à ce sujet les «non-observations» du malheureux astronome Le Gentil que l'Académie des Sciences avait dépêché à Pondichéry pour observer le passage de 1761, mais qui trouva la ville occupée par les Anglais et ne put y débarquer ses instruments. Ne voulant pas s'être déplacé pour rien, il décida de voyager dans la région et d'y attendre le passage de 1769. Il revint donc à cette date à Pondichéry, mais l'observation échoua encore, cette fois à cause d'un nuage isolé qui masqua malencontreusement le Soleil au moment crucial. Il rentra alors en France pour apprendre qu'on le tenait pour mort, qu'on lui avait nommé un successeur à l'Académie des Sciences et que sa famille s'était partagé ses biens !

1781 : William Herschel (1738-1822) découvre la planète **Uranus** (cf. §14.4 (a) ci-dessous).

1789 : Herschel découvre **Mimas** et **Encelade**, satellites de Saturne.

1801 : Giuseppe Piazzi (1746-1826) découvre la première petite planète, **Cérès** (cf. §14.4 (b) ci-dessous).

1838 : par des observations minutieuses, étalées sur dix-huit mois, de l'étoile 61 du Cygne, Friedrich Wilhelm Bessel (1784-1846) décèle la **première parallaxe stellaire**. Il estime la parallaxe de cette étoile à 0",314 (valeur moderne : 0",292).

1848 : l'astronome américain William Cranch Bond (1789-1859) découvre **Hypérion**, satellite de Saturne.

14.3. MÉCANIQUE ET ROTATION DE LA TERRE.

(a) Aristote et Galilée.

Le problème de la rotation axiale diurne de la Terre est particulièrement délicat. Que la Terre et le ciel soient en rotation l'un par rapport à l'autre est une évidence quotidienne. Mais ce mouvement relatif est-il dû, en réalité, à une rotation d'est en ouest du ciel autour d'une Terre fixe, comme le soutiennent les aristotéliciens, ou, au contraire, provient-il d'une rotation d'ouest en est de la Terre sous un ciel immobile, comme le veulent les coperniciens ? Voilà une question qui n'est pas facile à trancher, si toutefois elle a un sens (cf. §(e) ci-dessous). Toujours est-il que les hommes ont demandé à la mécanique d'étayer leur conviction sur cette question. C'est en effet à la mécanique qu'Aristote fait appel pour conclure à la fixité de la Terre au moyen de l'argument de la pierre lancée verticalement (cf. §11 (b1)).

C'est encore la mécanique qui est invoquée par Galilée, mais cette fois pour dénier toute valeur à l'argument d'Aristote et aux arguments similaires (cf. §11 (h)). Bien sûr, il ne s'agit pas de la même mécanique : celle d'Aristote était fausse alors que Galilée fondait la mécanique moderne qui sera développée par Newton. La conclusion de Galilée, par application de son principe de relativité, est que tous les phénomènes balistiques, ou de mécanique en général, à la surface de la Terre sont strictement indifférents à son immobilité ou à sa rotation. Cette dernière est donc possible, contrairement à ce que pensaient les aristotéliciens. Cela dit, non seulement Galilée ne démontre pas la rotation de la Terre, mais sa conclusion implique même l'impossibilité de cette démonstration au moyen d'expériences de mécanique.

Cependant, lorsqu'il examine dans le *Dialogue* le cas du tir tendu sur une cible, vers l'est ou vers l'ouest, dont les aristotéliciens prévoyaient l'échec si la Terre tournait, Galilée conclut encore que le tir réussirait comme si la Terre était fixe, mais tout en signalant qu'il serait quand même très légèrement dévié par la rotation de la Terre. Bien mieux, Galilée calcula cette déviation sur un exemple et trouva un résultat conforme à celui qu'on obtient par les théories qui seront développées au XIX^e siècle. Mais Galilée ne prêta pas attention à ce petit écart qui préfigurait pourtant des expériences qui seront réalisées pour mettre en évidence la rotation de la Terre (cf. (b) et (c) ci-dessous).

(b) Un argument nouveau contre la rotation de la Terre.

Dix-huit ans avant l'offensive de Galilée, dans son *Dialogue*, contre les objections aristotéliciennes à la rotation de la Terre, un argument d'un type tout à fait nouveau avait été émis. C'est en 1614 qu'un élève du Père Scheiner à l'Université d'Ingolstadt, Johann Georg Locher, soutint une thèse anticopernicienne où il imaginait la fiction suivante. Dans l'hypothèse où la Terre tournerait du mouvement axial, supposons qu'une petite boule pesante soit maintenue sur la face interne de l'orbe lunaire (la sphère concentrique à la Terre et passant par la Lune) de manière à toujours surplomber le même point au sol. Notons que cette condition ne fait que reproduire, sur une vaste échelle, la situation d'un corps que l'on s'apprête à lâcher en chute libre de puis le sommet d'une tour.

Et justement, Locher s'interroge sur la trajectoire que suivrait la petite boule si elle était libérée de manière à chuter librement vers la Terre, trajectoire «absolue» c'est-à-dire relativement à un repère (défini par le centre de la Terre et des directions d'étoiles) par rapport auquel serait conçue la rotation de la Terre. Plus précisément, Locher cherche la réponse à cette question en supposant à la fois deux hypothèses admises par les coperniciens : (α) la Terre tourne, et (β) la trajectoire (apparente) de la chute libre est la verticale (droite joignant le point de départ au centre de la Terre). Ainsi le corps glisse le long de la verticale du point de chute au sol, qui elle-même est entraînée par la rotation de la Terre. De la superposition de ces deux mouvements il résulte en général une trajectoire hélicoïdale tracée sur un cône ayant pour sommet le centre de la Terre, mais qui serait une droite ou une spirale plane respectivement dans les cas particuliers où le corps serait lâché sur l'axe de la Terre ou dans le plan équatorial.

Or ces trajectoires semblent peu vraisemblables à Locher qui s'étonne de leur diversité, et encore de ce que le corps livré à lui-même en chute libre devrait avoir l'intelligence de suivre un chemin aussi bizarre que les hélices coniques à seule fin de se maintenir en permanence à l'aplomb du même point au sol. Locher est donc conduit à rejeter ces trajectoires qui révèlent une contradiction à l'intérieur même du système des coperniciens : il faut que l'une des hypothèses (α) et (β) soit fausse, et comme personne, chez les coperniciens comme chez leurs adversaires, ne songe à contester (β), c'est donc que (α) est fausse.

Voilà donc l'impossibilité de la rotation de la Terre démontrée «par l'absurde». Malheureusement pour Locher, la nouveauté et la subtilité de son argument, jointes à quelques maladresses et obscurités de son texte, font qu'il ne s'est trouvé aucun copernicien ou aristotélicien pour relever le pertinence de son propos. Dans son *Dialogue*, Galilée a beaucoup digressé sur l'argument de Locher, mais c'était surtout pour tourner en dérision son adversaire Christoph Scheiner qu'il considérait comme l'auteur du texte. De plus, Galilée n'était nullement choqué par les trajectoires trouvées par Locher et qu'il aurait pourtant dû être le premier à rejeter. Elles sont en effet contraires aux principes de mécanique qu'il mettait en place et grâce auxquels il avait très bien analysé le cas analogue du projectile lancé par une fronde. Des trajectoires de chute s'enroulant autour de l'axe de la Terre ne pourraient s'expliquer que par l'action d'un *impetus* circulaire, notion que Galilée avait évidemment abandonnée. La vérité est que l'argument de Locher, s'il avait été compris, aurait posé un sérieux problème aux coperniciens. Locher avait parfaitement raison, à ceci près que l'hypothèse fausse était (β) et non (α) (cf. §13, et (c) ci-dessous).

(c) La déviation de la chute libre.

Nous avons vu (§13) comment Newton avait eu l'idée que la rotation de la Terre devait empêcher la verticalité de la chute libre, et comment il voyait ainsi le moyen de mettre expérimentalement cette rotation en évidence.

Les premières expériences réalisées par Hooke en 1679-1680 le furent avec des hauteurs de chute beaucoup trop faibles (de l'ordre de huit mètres) pour rendre la déviation sensible. Plus d'un siècle s'écoule ensuite avant les expériences effectuées depuis le sommet d'une tour à Bologne (78m) par Guglielmini (1790-1791) et à Hambourg (76m) par Benzenberg (1802). Elles sont l'occasion pour Laplace et Gauss de développer indépendamment, en 1803, la théorie correcte de la chute libre sur la Terre en rotation. La réalisation de telles expériences est délicate, les mouvements de l'air sont à craindre. L'expérience de Hambourg était plus satisfaisante que celle de Bologne, mais il fallut attendre de nouvelles expériences réalisées dans des puits de mines en Allemagne par Benzenberg en 1804 (85m), puis par Reich en 1831 (158m), pour obtenir des résultats probants, en conformité suffisante avec ceux prévus par la théorie.

(d) Le pendule de Foucault.

Les expériences de chute libre évoquées ci-dessus et bien peu exaltantes ont été brusquement éclipsées par le spectaculaire pendule de **Léon Foucault** (1819-1868). Génial inventeur et expérimentateur, Foucault a l'intuition que la rotation de la Terre doit provoquer une lente rotation du plan d'oscillation d'un pendule autour de la verticale du point de suspension. C'est d'abord avec un pendule de 2m qu'il a installé dans sa cave que Foucault met en évidence le phénomène, le 8 janvier 1851. L'expérience sera ensuite montée à l'Observatoire de Paris avec un pendule de 11m, puis, en mars 1851, sous la coupole du Panthéon avec un pendule de 67m. Le public répond avec enthousiasme à l'invitation qui lui est faite d'aller «voir tourner la Terre» au Panthéon. Le succès considérable de l'expérience dépasse bientôt nos frontières et des pendules de Foucault se mettent à osciller un peu partout dans le monde.

Mais si le mérite de Foucault est universellement reconnu, son succès a quand même un goût amer pour les théoriciens de la mécanique, principalement pour ceux de l'Académie des Sciences de Paris. En fait, c'est un véritable camouflet que Foucault leur inflige avec sa découverte. Car en dépit du haut degré de sophistication atteint par la mécanique - songer à la *Mécanique analytique* de Lagrange, au *Traité de Mécanique céleste* de Laplace, à la récente découverte de Neptune par Le Verrier (cf. §14.4 ci-dessous) -, les savants avaient été incapables de prévoir un phénomène mécanique aussi important sur le plan théorique, et qui leur est présenté par un expérimentateur sans formation mathématique ! Foucault récidivera d'ailleurs l'année suivante avec son gyroscope aux propriétés encore plus remarquables et tout aussi imprévues.

Si les savants n'avaient pas prévu le phénomène, ils se devaient maintenant de l'expliquer et c'est ce que fit l'académicien Jacques Binet (1786-1856) dès le mois de février 1851 en établissant les équations du mouvement du pendule. Il en résulte que le plan d'oscillation doit effectivement tourner, dans le sens rétrograde ou direct selon que l'expérience se déroule au nord ou au sud de l'équateur, à la vitesse angulaire $\omega \sin\varphi$, où ω est la vitesse angulaire de la rotation terrestre et φ la latitude du lieu. C'est la *loi de Foucault* que Foucault lui-même avait déjà trouvée par ses propres moyens et d'où il suit en particulier que l'*effet Foucault* de pivotement du plan d'oscillation possède la vitesse maximum ω aux pôles, mais est inexistant à l'équateur. Au Panthéon, le plan des oscillations accomplissait théoriquement un tour complet en 31h 47m 15s.

(e) Le problème du mouvement absolu.

La déviation vers l'est de la chute libre et le comportement du pendule de Foucault sont censés apporter la preuve de la rotation de la Terre qui est donc comprise comme un mouvement en soi, un mouvement *absolu*. Mais qu'en est-il exactement de ce concept de mouvement absolu ? Sans doute, à l'échelle de notre vie quotidienne, avons-nous l'habitude de classer les objets qui nous entourent en objets fixes et en objets mobiles. Cependant, la réflexion sur la notion de mouvement a conduit certains philosophes à cette idée que le mouvement ne peut se concevoir autrement que *relatif.* Le mouvement en soi ou *absolu*, ainsi par conséquent que la fixité en soi, n'ont aucun sens ; le mouvement d'un corps ne peut être compris que *par rapport* à un autre corps.

Ce point de vue fut, au XVII^e siècle, celui de Descartes et Leibniz qui, cependant, ne s'intéressèrent pas à ses conséquences cosmologiques. Il n'en fut pas de même avec George Berkeley (1685-1753), puis Ernst Mach (1838-1916), qui insistèrent avec force sur la relativité essentielle du mouvement et sur la remise en cause qui en résulte quant à la conception des mouvements dans l'univers. Or l'affaire est particulièrement importante car, si le mouvement absolu n'existe pas, la question de savoir si la Terre est fixe ou en mouvement est tout simplement dépourvue de sens. Est-ce à dire que Galilée s'est battu pour rien ? Pas du tout.

Pour sortir de l'impasse résultant du rejet du mouvement absolu, il est nécessaire de replacer le problème dans le cadre d'une conception saine de l'activité scientifique. L'opinion du mathématicien Henri Poincaré (1854-1912) est qu'une théorie scientifique n'est pas meilleure qu'une autre parce qu'elle décrirait mieux une «réalité» sous-jacente aux apparences et dont personne ne sait ce qu'elle est, mais parce qu'elle révélerait davantage de rapports entre les phénomènes observés. A cet égard, par l'ensemble des corrélations qu'elle établit entre les mouvements des astres, la théorie de Copernic est incontestablement supérieure à celle de Ptolémée. De plus, elle reçoit l'appui du puissant appareil de la mécanique classique qui, reposant sur seulement quelques principes simples, voit son champ d'application et ses succès s'étendre du domaine terrestre au domaine céleste. En fait, ce n'est pas une expérience isolée, comme celle du pendule de Foucault, qui peut prouver la rotation de la Terre, ceci à cause de l'obstacle du mouvement absolu. Cette rotation est bien davantage démontrée par la mécanique dans son ensemble, vaste système explicatif et unitaire, dans lequel cette rotation s'inscrit et prend tout son sens. C'est par ce biais que le mouvement de la Terre apparaît comme particulièrement signifiant, et participant d'une certaine «réalité» de la nature. Voilà ce dont Galilée a eu l'intuition et qui a entraîné sa conviction que la Terre était *vraiment* en mouvement («Et pourtant, elle tourne !»), même s'il croyait, tout comme Newton d'ailleurs, à l'existence du mouvement absolu.

Signalons encore que les recherches théoriques suscitées, dans la seconde moitié du XIX^e siècle, par les expériences de Foucault (pendule et gyroscope), conduisirent la mécanique à abandonner l'espace absolu de Newton pour lui substituer les référentiels inertiels ou galiléens, mutuellement en translation rectiligne uniforme, et par rapport à chacun desquels la loi fondamentale de la dynamique conserve la forme simple sous laquelle Newton l'avait énoncée. De cette façon, la mécanique classique n'a pas davantage besoin de l'espace absolu que la théorie de la relativité restreinte introduite par Einstein en 1905.

14.4. LA DÉCOUVERTE DE NOUVELLES PLANÈTES.

(a) La découverte d'Uranus.

William Herschel (1738 - 1822), un organiste allemand vivant en Angleterre, se passionne pour les mathématiques et l'astronomie.

13 mars 1781 : au cours d'une observation dans la constellation des Gémeaux à l'aide d'un télescope de 16 cm d'ouverture, de 2m de longueur focale et muni d'un oculaire grossissant 227 fois, il découvre fortuitement un astre ayant un diamètre apparent, surtout si le grossissement est porté à 460.

La première idée qui lui vient naturellement à l'esprit est qu'il a repéré une comète. Cependant on reconnut bientôt qu'il s'agissait d'une planète gravitant au-delà de Saturne.

Après une période confuse où les Anglais appelaient le nouvel astre «Georgian planet» en l'honneur de leur roi George III, tandis que les Français essayaient d'imposer le nom de «Herschel», la nouvelle planète fut finalement baptisée «Uranus», nom proposé par l'astronome de Berlin **Johann Elert Bode** (1747-1826).

1787 : Herschel découvre deux satellites à Uranus : **Titania** et **Obéron**.

1851 : l'astronome anglais William Lassell (1799-1880) découvre deux autres satellites : **Ariel** et **Umbriel**.

1948 : l'astronome américain Gerard Kuiper (1905-) découvre le satellite **Miranda**.

Aujourd'hui on connaît 15 satellites à Uranus et un système d'anneaux.

L'axe de rotation d'Uranus est presque couché sur le plan de son orbite, l'inclinaison de l'équateur sur ce plan étant de 98°. La rotation sidérale est de 10,70 j.

Pour terminer, signalons que les astronomes avaient déjà observé Uranus une vingtaine de fois entre 1690 et 1781 sans en reconnaître la nature planétaire.

(b) La loi de Titius-Bode. Les petites planètes.

1766 : une traduction de la *Contemplation de la nature* (1764) du naturaliste suisse Charles Bonnet est publiée à Leipzig, dans laquelle figure une loi empirique reproduisant approximativement la suite des distances des planètes au Soleil. Cette loi est due à un professeur de l'université de Wittenberg, **Johann Daniel Tietz**, dit **Titius** (1729-1796), dont le champ d'activité et de publication s'étendait des mathématiques à l'histoire, en passant par la physique, les sciences naturelles et la philosophie.

1772 : la loi proposée par Titius, d'abord passée inaperçue, est remarquée par Bode qui y voit plus qu'une simple curiosité arithmétique et s'en fait un ardent propagandiste. Appelée **loi de Titius-Bode**, et appliquée ci-dessous jusqu'à Uranus, elle est décrite par le tableau suivant où les distances qu'elle prévoit sont comparées aux distances moyennes des planètes au Soleil (demi-grand axe *a* de leur orbite) :

	Mercure	Vénus	Terre	Mars	*lacune*	Jupiter	Saturne	Uranus
n	$\to -\infty$	0	1	2	3	4	5	6
$0{,}4+0{,}3\text{x}2^n$	0,4	0,7	1	1,6	2,8	5,2	10	19,6
a	*0,387*	*0,723*	*1*	*1,524*		*5,203*	*9,555*	*19,218*

Dans le *Mysterium cosmographicum*, Kepler avait déjà remarqué que les orbes de Mars et de Jupiter semblaient anormalement espacés par comparaison aux écarts séparant les autres planètes. Ce fait est particulièrement mis en évidence par la loi de Titius-Bode puisqu'à n=3 ne correspond aucune planète. Bode conjecture alors l'existence d'une planète qui graviterait entre les orbites de Mars et de Jupiter. Cette hypothèse se trouve encore renforcée par la découverte d'Uranus dont la distance au Soleil s'accorde bien avec la loi de Titius-Bode.

1800 : Francis Xaver von Zach (1754-1832), directeur de l'observatoire de Gotha, organise une recherche systématique de la planète manquante par vingt-quatre astronomes européens dont chacun se voit affecter une heure (15°) du zodiaque.

1er janvier 1801 : l'astronome de Palerme **Giuseppe Piazzi** (1746-1826), qui ne sait pas encore qu'il a été choisi pour participer à la recherche de la planète hypothétique, découvre un astre nouveau dans la constellation du Taureau. Piazzi put l'observer jusqu'au 11 février, période pendant laquelle l'astre se déplaça d'un mouvement d'abord rétrograde puis direct. De même que Herschel découvrant Uranus, Piazzi crut d'abord avoir affaire à une comète, mais von Zach fut aussitôt convaincu qu'il s'agissait de la planète cherchée.

Cependant, quand la communauté scientifique fut avertie de sa découverte, le nouvel astre, trop peu lumineux et dont la distance angulaire au Soleil était devenue trop faible, n'était déjà plus visible, et il était évident qu'on aurait la plus grande peine à le retrouver lorsqu'il redeviendrait théoriquement observable à l'ouest du Soleil. De plus, les observations dont on disposait ne couvraient qu'un intervalle de 41 jours et un arc de 3° dans le ciel. Les tentatives pour déterminer une orbite approximative circulaire, ou une orbite elliptique, dans l'hypothèse où il se serait agi d'une planète, furent toutes des échecs. En août et septembre les astronomes cherchèrent vainement l'astre de Piazzi ; il était bel et bien perdu.

Septembre-octobre 1801 : un jeune mathématicien allemand, **Karl Friedrich Gauss** (1777-1855), élabore une méthode entièrement nouvelle permettant de déterminer tous les éléments képlériens d'une planète à partir de seulement trois observations complètes (à savoir, pour chacune d'elles : temps, ascension droite et déclinaison).

1er janvier 1802 : grâce aux calculs de Gauss, l'astre de Piazzi (dont il est maintenant clair qu'il s'agit d'une planète) est retrouvé indépendamment par von Zach et **Heinrich Wilhelm Olbers** (1758-1840), astronome à Brême.

Piazzi donne à la nouvelle planète le nom de **Cérès**, déesse tutélaire de la Sicile. Avec une orbite dont le demi-grand axe a mesure 2,763 unités astronomiques, la nouvelle planète vient exactement combler la lacune mise en évidence par la loi de Titius-Bode. Cependant, il apparaît vite qu'elle est beaucoup plus petite que les autres planètes du système solaire. Dans ces conditions, n'est-elle pas un peu décevante et peut-elle vraiment prétendre tenir le rôle que Bode et von Zach voulaient lui faire jouer ?

28 mars 1802 : Olbers découvre une deuxième petite planète, **Pallas** (a = 2,773).

1er septembre 1804 : Karl Ludwig Harding (1765-1834), astronome à Lilienthal, découvre une troisième petite planète, **Junon** (a = 2,672).

29 mars 1807 : Olbers découvre une quatrième petite planète, **Vesta** (a = 2,361). Pendant trente-huit ans, aucune autre découverte de ce genre n'eut lieu. La liste des petites planètes, ou **astéroïdes** comme les appelait Herschel, semblait close.

1845 : un astronome amateur de Berlin, Hencke, découvre un cinquième astéroïde, **Astrée**. Cette découverte relance l'intérêt pour la recherche des petites planètes dont plusieurs unités furent trouvées chaque année.

20 décembre 1891 : **Max Wolf** (1863-1932), astronome à Heidelberg, découvre le 323e astéroïde, **Brucia**, inaugurant une méthode photographique de recherche. Sur une plaque exposée pendant environ une heure, les étoiles dans le champ du télescope seront figurées par des points, tandis qu'on y verrait la trajectoire d'un astéroïde sous la forme d'un petit segment. Cette méthode, beaucoup plus efficace que la recherche visuelle directe, fut dès lors presque exclusivement utilisée.

On connaît aujourd'hui plus de 10500 astéroïdes, dont les quatre découverts au début du XIXe siècle sont nettement les plus gros, et dont la masse totale est environ 1600 fois plus faible que celle de la Terre. Aussi a-t-on abandonné l'hypothèse émise par Olbers et soutenue par Lagrange, selon laquelle ces petites planètes proviendraient de l'explosion d'une planète plus grosse gravitant initialement entre les orbites de Mars et de Jupiter. On pense aujourd'hui que la proximité de Jupiter a dès l'origine empêché la formation d'une planète massive à cet endroit.

(c) La découverte de Neptune.

Depuis Newton, la mécanique céleste a fait des progrès considérables, notamment grâce aux travaux de Lagrange, Laplace et Gauss.

En particulier s'est développée la théorie des perturbations permettant, entre autres, de calculer les inégalités séculaires du mouvement des planètes. L'orbite d'une planète n'est une ellipse képlérienne qu'en première approximation, ce que Newton avait déjà prévu. En réalité, cette orbite se déforme (variation de l'excentricité), tourne dans son plan (avance du périhélie), tandis que ce plan de révolution se déplace lui-même (avance du nœud ascendant et variation de l'inclinaison). Mais tous ces mouvements s'effectuent lentement, à un rythme variable selon la planète, de l'ordre de 10^{-5} par siècle pour l'excentricité, 1° par siècle pour l'avance du périhélie ou celle du nœud ascendant, et quelques secondes par siècle pour l'inclinaison. Les calculs permettent de prévoir, à plus ou moins long terme, la position et la forme de l'orbite képlérienne dite *osculatrice*, qui réalise la meilleure approximation de l'orbite variable à un instant donné.

1821 : Alexis Bouvard (1767-1843) publie des *Tables astronomiques* comportant, entre autres, des tables d'Uranus. Il reconnaît avoir été incapable de concilier la théorie avec, à la fois, les observations d'Uranus faites avant sa découverte et celles faites depuis. Aussi a-t-il choisi de ne pas utiliser les anciennes observations, prétextant leur moins grande précision. Cependant, plusieurs astronomes ne sont pas convaincus et soupçonnent l'existence d'un problème posé par la marche de cette planète.

1825-1826 : Uranus commence à s'écarter de la marche prévue par les tables de Bouvard.

1832 : les écarts atteignent une demi-minute d'arc. Ils dépasseront 2' en 1845.

1836 : Bouvard et plusieurs autres astronomes pensent que les anomalies de la marche d'Uranus doivent s'expliquer par la présence perturbatrice d'une planète massive gravitant au-delà d'Uranus.

Octobre 1843 : un jeune calculateur anglais, **John Couch Adams** (1819-1892), de l'Université de Cambridge, achève un premier calcul de détermination de la planète hypothétique.

Été 1845 : non averti des travaux d'Adams, François Arago (1786-1853), directeur de l'Observatoire de Paris, propose à **Urbain Le Verrier** (1811-1877), qui a déjà démontré une grande habileté en mécanique céleste, de rechercher les éléments de la planète hypothétique.

Septembre 1845 : Adams termine un second calcul.

10 novembre 1845 : Le Verrier présente à l'Académie des Sciences un *Premier mémoire sur la théorie d'Uranus.*

1^er^ juin 1846 : Le Verrier présente à l'Académie des Sciences un second mémoire, *Recherches sur les mouvements d'Uranus*, contenant les résultats d'un premier calcul qui situe la planète perturbatrice à une longitude voisine de 325° au 1^er^ janvier 1847. Cette valeur correspond à 1° près au résultat d'Adams.

31 août 1846 : Le Verrier présente un troisième mémoire au titre particulièrement explicite : *Sur la planète qui produit les anomalies observées dans le mouvement d'Uranus. Détermination de sa masse, de son orbite et de sa position actuelle.* Il y conclut à une valeur légèrement différente de la longitude ci-dessus : 326° 32'.

Contrairement à ce qu'on aurait pu attendre en raison du caractère sérieux des travaux qui leur étaient présentés, surtout en Angleterre où la concordance des conclusions des deux calculateurs était connue (tandis que les travaux d'Adams, non publiés, étaient ignorés des Français), les astronomes officiels ne se sont pas précipités vers leurs télescopes pour les pointer dans la direction qui leur était indiquée. Des recherches, malheureusement malhabiles, avaient pourtant été finalement entreprises en Angleterre par James Challis (1803-1882). En France il semble que quelques recherches aient été effectuées à l'instigation d'Arago, mais dans de mauvaises conditions par manque d'une carte du ciel convenable pour ce genre d'investigation. Le Verrier s'impatiente.

18 septembre 1846 : Le Verrier écrit à Johann Gottfried Galle (1812-1910), astronome à l'observatoire de Berlin, pour le remercier d'un envoi qu'il lui avait fait, et en profite pour lui communiquer les coordonnées de la planète hypothétique.

23 septembre 1846 : Galle reçoit le courrier de Le Verrier. Il doit insister auprès du directeur de l'observatoire, Johann Franz Encke (1791-1865), pour obtenir l'autorisation d'entreprendre la recherche de la planète. Le soir même, il la repère dans la constellation du Verseau, à 55' du lieu indiqué par Le Verrier auquel il écrit :«Monsieur, la planète, dont vous avez signalé la position, *réellement existe*».

Arago voulait appeler la nouvelle planète «Le Verrier». Galle proposait le nom de «Janus». Mais on ne sait quelles circonstances conduisirent Le Verrier à annoncer dans plusieurs correspondances, dès le 1^er^ septembre 1846, que le Bureau des Longitudes avait décidé de nommer «Neptune» la nouvelle planète, ce qui était inexact. Toujours est-il que c'est ce nom qui fut finalement adopté.

Le problème auquel Adams et Le Verrier s'étaient attaqués indépendamment, était entièrement nouveau. Il s'agissait en somme du problème inverse de celui des perturbations évoqué plus haut : rechercher une planète responsable de perturbations observées.

Considéré d'un point de vue purement mathématique le problème est inextricable. Bien qu'employant des méthodes différentes, Adams et Le Verrier réduisaient le nombre des inconnues en spéculant sur la valeur du demi-grand axe de l'orbite, d'abord d'après la loi de Titius-Bode qui donne a = 38,8, et en négligeant son inclinaison sur l'écliptique. Les calculs donnaient :

- l'excentricité e,
- la longitude du périhélie ϖ,
- la masse de la planète m,
- la longitude L de la planète à une date donnée.

	a	e	ϖ	m	L 1847,0
Adams	38,05 ramené à 34,15	0,1206	299° 11'	$\frac{1}{6666}$ ≈ 0,00015	329° 57'
LeVerrier	36,16	0,1076	284° 6'	$\frac{1}{9300}$ ≈ 0,00011	326° 32'
Neptune	*30,11*	*0,0090*	*46°*	$\frac{1}{19314}$ *≈ 0,00005*	*327° 34'*

Comme on le voit, la masse de Neptune est notablement surestimée par Adams et Le Verrier, mais c'est la conséquence logique de la surestimation initiale du demi-grand axe. On remarque aussi que les orbites obtenues sont assez différentes de l'orbite réelle, mais elles s'en rapprochent vers 1840-1850. Après que Le Verrier eut recueilli une gloire méritée, au grand dam d'Adams et des astronomes britanniques qui étaient pourtant en position d'aboutir plus tôt au même résultat, ces différences avec la réalité ont été avancées pour amoindrir l'exploit de Le Verrier, certains allant même jusqu'à soupçonner que ses calculs étaient sans valeur et que seul un heureux hasard avait permis la découverte de Neptune. C'est oublier que le but du calcul était bien moins de déterminer les éléments de la planète perturbatrice que d'indiquer sa position dans le ciel à une époque suivant immédiatement la série d'observations utilisées, et ce n'est sans doute pas un hasard si les orbites trouvées par les deux calculateurs sont assez proches de l'orbite réelle justement dans l'intervalle de temps comprenant les observations d'Uranus qui servirent de base aux calculs. Adams et Le Verrier ont sans doute eu tort de ne pas s'entourer d'assez de précautions en livrant leurs résultats quant aux éléments de la planète cherchée, résultats en lesquels ils avaient peut-être une trop grande confiance, alors que leur objectif était surtout d'indiquer les coordonnées célestes de la planète à l'époque où ils achevaient leurs calculs.

Remarquons que Neptune déroge notablement à la loi de Titius-Bode. Une régression exponentielle (méthode des moindres carrés) sur les demi-grands axes des planètes ainsi numérotées :

	Mercure	Vénus	Terre	Mars	Jupiter	Saturne	Uranus
n	1	2	3	4	6	7	8

donne $a \approx 0{,}21\, e^{0{,}55\, n}$, d'où, pour $n = 9$, $a \approx 28{,}91 \approx 29$, ce qui est une extrapolation bien meilleure que les 38,8 de la loi de Titius-Bode.

Signalons encore que la révolution sidérale de Neptune est d'environ 164,77 ans, de sorte que, depuis sa découverte, Neptune n'a pas encore accompli un tour complet sur son orbite. Ce sera chose faite en 2011.

10 octobre 1846 : Lassell découvre un premier satellite de Neptune, **Triton**.

1949 : Kuiper découvre **Néréide**, autre satellite de Neptune.

On connaît aujourd'hui huit satellites de Neptune.

(d) L'avance du périhélie de Mercure.

1843 : Le Verrier publie les résultats de travaux sur le mouvement de Mercure. Cependant, cette nouvelle étude ne permettra pas de prévoir avec précision le passage de la planète devant le disque solaire en 1848.

1849 : Le Verrier s'aperçoit que le périhélie de Mercure avance plus vite que ne le prévoit la mécanique céleste, l'écart étant de 38" par siècle.

En fait, entre 1750 et 1850, la longitude du périhélie de Mercure s'est accrue d'environ 5599" tandis que, dans le même temps, la précession a fait rétrograder le point γ d'environ 5027". Il en résulte que, vu du Soleil et par rapport aux étoiles, le périhélie de Mercure a avancé de 572". Mais la théorie newtonienne des perturbation ne peut expliquer qu'une avance de l'ordre de 569". L'avance résiduelle que Le Verrier avait estimée à 38" était donc en réalité de 43".

Quoi qu'il en soit, après le triomphe qu'elle venait de remporter lors de la découverte de Neptune, cette incapacité de la mécanique newtonienne à rendre compte de la totalité de l'avance du périhélie de Mercure posait aux théoriciens un problème nouveau. Plusieurs hypothèses furent émises pour tenter d'expliquer le phénomène, parmi lesquelles celle que la loi d'attraction gravitationnelle ne serait pas exactement en $1/r^2$ au voisinage du Soleil. Mais la conjecture qui retint principalement l'attention fut formulée par Le Verrier.

1859 : Le Verrier déclare que l'effet pourrait provenir d'une masse inconnue située entre Mercure et le Soleil, constituée d'une ou plusieurs petites planètes. Il suggère de faire des recherches à la faveur d'éclipses de Soleil.

22 décembre 1859 : un astronome amateur, le docteur Lescarbault, d'Orgères (Eure-et-Loir), fait part à Le Verrier de l'observation qu'il a faite, le 26 mars 1859, d'un petit disque noir passant sur le Soleil et dont il estimait le diamètre au quart de celui de Mercure lors du transit du 8 mai 1845.

Bien que cette hypothétique planète serait d'une masse insuffisante pour expliquer à elle seule le phénomène en cause, Le Verrier est vivement intéressé. Il déduit des observations de Lescarbault la position du plan de l'orbite de la nouvelle planète, sa révolution sidérale (19,7 jours) et sa masse (1/17 de celle de Mercure). Enfin, il la baptise «Vulcain».

Un astronome suisse, Jean Rodolphe Wolf (1816-1893), répertorie 21 observations de ce genre. On calcule que la planète devrait passer devant le disque solaire entre le 26 mars et le 7 avril 1860. Les observations se soldent par un échec.

Des opposants à l'existence de Vulcain se manifestent, parmi lesquels le jeune Camille Flammarion (1842-1925), futur auteur de la célèbre *Astronomie populaire* (1880). Ce qui n'empêche pas que Vulcain, ou des planètes similaires, soient observées un peu partout, notamment aux États-Unis. Mais le plus souvent les observateurs sont des amateurs prompts à confondre une tache du Soleil avec la planète recherchée.

1876 : Se basant sur plusieurs observations lui semblant se rapporter à Vulcain, Le Verrier calcule une orbite et annonce un passage possible de la planète sur le disque solaire pour le 22 mars 1877, et un autre beaucoup plus probable pour le 15 octobre 1882. Mais les nombreux astronomes qui scrutent le Soleil aux alentours du 22 mars 1877 ne découvrent rien.

23 septembre 1877 : Le Verrier meurt, persuadé de l'existence de Vulcain et d'autres planètes semblables.

Les observations du 15 octobre 1882 sont tout aussi inutiles. Au début du XX^e siècle, les astronomes en sont encore réduits à des conjectures.

20 mars 1915 : **Albert Einstein** (1879-1955) annonce à l'Académie des Sciences de Berlin qu'il a établi les équations du champ de la gravitation. La **théorie de la relativité générale** est née. Einstein exposera ses travaux la même année dans une série de trois articles, dont l'un est intitulé : *Erklärung der Perihelbewegung des Merkur aus der allgemeinen*

Relativitätstheorie (*Explication du mouvement du périhélie de Mercure par la théorie de la relativité générale*).

C'est donc la nouvelle théorie qui détient la clé du mystère. Selon cette théorie, les planètes se déplacent en suivant des géodésiques de l'espace-temps dont la géométrie est déterminée par les masses présentes, principalement par le Soleil en l'occurrence. La théorie de Newton du mouvement des planètes apparaît comme une excellente approximation de celle d'Einstein, sauf au voisinage du Soleil où des différences peuvent être notées. En l'absence des perturbations provoquées classiquement par les autres planètes, le mouvement de Mercure se ferait selon une orbite képlérienne invariable ; mais Einstein montre que le champ gravitationnel du Soleil induit un lent déplacement du périhélie de l'orbite, dans le sens direct, estimé par le calcul à environ 43" par siècle, et cette avance «relativiste» du périhélie est tout à fait compatible avec l'avance résiduelle observée. L'hypothèse «Vulcain» est désormais sans objet.

L'avance relativiste du périhélie est surtout sensible pour Mercure qui est la planète la plus proche du Soleil, mais elle affecte également de façon non négligeable Vénus et la Terre, ainsi que l'astéroïde Icare qui gravite sur une orbite fortement elliptique et qui, à son périhélie, est plus proche du Soleil que Mercure.

Pour une orbite planétaire de demi-grand axe a et d'excentricité e, l'avance séculaire relativiste du périhélie est donnée par la formule

$$\Delta\theta \approx \frac{3{,}8377}{(1-e^2)\, a^{5/2}}$$

où a est exprimé en unités astronomiques et $\Delta\theta$ en secondes d'arc. La concordance entre les résultats de la théorie et les données de l'observation est manifeste dans le tableau suivant :

PLANÈTE	a en u.a.	e	$\Delta\theta$ en secondes d'arc	
			CALCUL	OBSERVATION
Mercure	0,3871	0,2056	42,98	43,11±0,45
Vénus	0,7233	0,0068	8,6	8,4±4,8
Terre	1	0,0167	3,8	5,0±1,2
Icare	1,076	0,827	10,10	9,8±0,8

(e) La découverte de Pluton.

1905 : un astronome amateur américain, **Percival Lowel** (1855-1916), calcule les éléments d'une planète trans-neptunienne censée expliquer des inégalités de la marche d'Uranus dont Neptune ne pouvait rendre compte. A partir de cette date, et jusqu'à la fin de sa vie, Lowel recherchera vainement la planète hypothétique par des méthodes photographiques, à son observatoire de Flagstaff (Arizona), fondé en 1894.

1907 : l'astronome américain **William Henry Pickering** (1858-1938) (à ne pas confondre avec son frère plus célèbre Edward Charles Pickering (1846-1919)), qui avait découvert en 1898 et 1900 les satellites **Phœbé** et **Thémis** de Saturne, calcule lui aussi les éléments d'une planète perturbatrice, fondés, en outre, sur des inégalités constatées dans le mouvement de Neptune. Il procède aussi à des recherches photographiques, sans succès.

1919 : à la demande de William Pickering, des recherches photographiques sont entreprises à l'observatoire du Mont Wilson (Californie).

18 février 1930 : de nouvelles recherches organisées à l'observatoire Lowel (Arizona), à l'aide d'un télescope à grand champ spécialement construit à cet effet, permettent à **Clyde William Tombaugh** de découvrir enfin la planète cherchée, dans la constellation des Gémeaux, à 5° de la position prédite. Mais la découverte ne fut annoncée que le 13 mars 1930, jour du soixante-quinzième anniversaire de la naissance de Lowel. La nouvelle planète fut nommée «Pluton», et son symbole ♇ rappelle les initiales de Percival Lowel. On s'aperçut alors que Pluton figurait déjà sur quatre clichés pris pour W. Pickering à l'observatoire du Mont Wilson en 1919, avec l'aspect d'une étoile de magnitude 15, mais à l'époque on n'avait pas su reconnaître sa nature planétaire.

On a d'abord cru que la masse de Pluton était voisine de celle de la Terre, mais cette estimation n'était pas compatible avec son volume qui semblait environ le 1/10^{e} de celui de notre planète. Il fallait admettre que la densité de Pluton atteigne la valeur peu vraisemblable de 50, ou bien ne lui attribuer qu'une masse de l'ordre du 1/10^{e} de celle de la Terre. Mais une telle masse était trop faible pour provoquer les perturbations imputées à Pluton.

27 juillet 1978 : l'astronome américain **J. W. Christy** découvre un satellite de Pluton, nommé **Charon**.

Il devient alors patent que Pluton possède une masse très inférieure à celle résultant des premières estimations. Le rapport des masses de Pluton et de la Terre est même nettement moindre que 1/10 puisqu'il est maintenant estimé à 1/390. Quant au rapport des volumes, il est de 1/219 (Le rayon de Pluton est estimé à 1140km, celui de Charon à 590km et la distance Pluton-Charon à 19640km, la révolution du satellite s'opérant en 6,39 jours).

La conclusion qui s'impose est que la performance de la découverte de Neptune ne s'est pas renouvelée à propos de Pluton. Les spéculations de Lowel et de W. Pickering, fondées sur des inégalités inexpliquées des mouvements de Neptune et d'Uranus, ont conduit à la découverte d'un astre qui ne peut causer aucune perturbation notable à la marche de ces deux planètes. Les calculs étaient donc faux, et seul un heureux hasard était responsable de la présence de Pluton dans la région du ciel où les astronomes espéraient le trouver.

Terminons en précisant que Pluton accomplit une révolution sidérale en 247,7 ans sur une orbite de demi-grand axe 39,4387 u. a., très inclinée sur l'écliptique (17°,17) et de forte excentricité (0,250), de sorte que, depuis 1979, Pluton se trouve plus proche du Soleil que Neptune, et ce sera le cas jusqu'en 1998.

BIBLIOGRAPHIE

POUR UNE INITIATION FACILE A L'HISTOIRE DE L'ASTRONOMIE

CELNIKIER, L.M., *Histoire de l'astronomie*, Paris, Lavoisier, «Petite collection d'histoire des sciences», 1986, 265 p.

COUDERC, P., *Histoire de l'Astronomie classique*, Paris, Presses universitaires de France, «Que sais-je ?», n° 165, 1982, 128 p.

MAURY, J.-P., *Galilée, le messager des étoiles*, Paris, Gallimard, «Découvertes», n°10, 1986, 160 p.

MAURY, J.-P., *Newton et la mécanique céleste*, Paris, Gallimard, «Découvertes», n°91, 1990, 144 p.

VERDET, J.-P., *Une histoire de l'astronomie*, Paris, Éditions du Seuil, «Points Sciences», n° 62, 1990, 382 p.

QUELQUES OUVRAGES PLUS SAVANTS OU/ET PLUS SPÉCIALISÉS

DELIGEORGES, S., *Foucault et ses pendules*, Paris, Éditions Carré, 1990, 127 p.

DRAKE, S., *Galilée*, Arles, Actes Sud, 1987, 141 p.

GAPAILLARD, J., «Le mouvement de la Terre. La détection de sa rotation par la chute des corps», *Cahiers d'Histoire et de Philosophie des sciences*, n° 25, 1988, 182 p.

GAPAILLARD, J., *Et pourtant, elle tourne ! (Mais est-ce si sûr ?)*, IREM de Nantes, 1988, 15 p.

GAPAILLARD, J., *Les multiples aspects du pendule de Foucault*, IREM de Nantes, 1993, 32 p.

GAPAILLARD, J., *Et pourtant, elle tourne ! Le mouvement de la Terre*, Paris, Éditions du Seuil, «Science ouverte», 1993, 353 p.

GEYMONAT, L., *Galilée*, Paris, Éditions du Seuil, «Points Sciences», n° 82, 1992, 351 p.

KOYRÉ, A., *Du monde clos à l'univers infini*, Paris, Gallimard, 1992, 349 p.

NEUGEBAUER, O., *Les sciences exactes dans l'Antiquité*, Arles, Actes Sud, 1990, 319 p.

SHEA, W., *La révolution galiléenne*, Paris, Éditions du Seuil, «Science ouverte», 1992, 317 p.

SIMON, G., *Kepler, astronome, astrologue*, Paris, Gallimard, 1979.

TATON, R., *La science antique et médiévale, des origines à 1450*, Paris, Presses universitaires de France, 1994, 720 p. (Il s'agit d'une réédition du tome 1 de l'*Histoire générale des sciences*, 4 volumes, Paris, Presses universitaires de France, 1966).

QUELQUES TEXTES

ARISTOTE, *Traité du ciel*, trad. de J. Tricot, Paris, Vrin, 1986.

Introductions à l'astronomie de Copernic, contenant le *Commentariolus* de Copernic, et la *Narratio prima* de Rheticus, trad. de H. Hugonnard-Roche, E. Rosen et J.-P. Verdet, Paris, Blanchard, 1975.

GALILÉE, *Le Messager des étoiles*, trad. de F. Hallyn, Paris, Editions du Seuil, 1992.

GALILÉE, *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, trad. de R. Fréreux et F. de Gandt, Paris, Editions du Seuil, 1992.

KEPLER, *Le Secret du monde*, trad. de A. Segonds, Paris, Gallimard, «Tel», 1993.