Zeitschrift: Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Herausgeber: Schweizerische Astronomische Gesellschaft
Band: 65 (2007)
Heft: 340

Artikel: Les modèles cosmologiques à l'époque de Galilée
Autor: Beffa, Coralie
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-898049

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 15.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Les modèles cosmologiques à l'époque de Galilée

CORALIE BEFFA

Collège de Candolle; classe 402; maître accompagnateur: Nicolas Bernhardt; travail de maturité 2002

1. Introduction

Le passage de l'astronomie géocentrique à l'astronomie héliocentrique paraît au premier abord comme une brusque cassure, les uns ayant une pensée révolue et les autres inaugurant l'esprit moderne. En restant dans cette perspective, il est difficile de comprendre l'obstination des défenseurs d'un système qui perdure depuis plus de deux mille ans. A travers ce travail, nous nous interrogerons sur l'évolution qui conduit à la constitution des modèles géocentrique et héliocentrique tels qu'ils s'opposent à l'époque de Galilée. Nous ne nous intéresserons pas à l'aspect polémique concernant le procès fait à Galilée, mais porterons notre attention sur l'aspect scientifique des modèles, en observant leurs différences intrinsèques.

Les partisans du géocentrisme et de l'héliocentrisme tentent chacun à leur manière de concilier l'image idéale qu'ils se font de la nature avec la réalité observable. Aucun de ces modèles n'est un pur décalque de la réalité. Ce sont des représentations qui opèrent des simplifications délibérées, où certains aspects du réel sont négligés au profit d'autres aspects qui sont mis en valeur. Ces modèles, qu'ils soient géocentriques ou héliocentriques, sont de deux types, les modèles mathématiques visant à rendre compte des observations de positions des astres et les modèles qui incluent une explication physique, telle la chute des objets à la surface de la Terre. Suivant le modèle, la méthode diffère car ce ne sont pas les mêmes informations que l'on attend de la nature. L'instrumentalisation comme moyen mis en œuvre pour mettre en valeur des phénomènes apparaît avec Galilée, qui pointe sa lunette vers les objets célestes. Avant lui, les cieux étaient observés à l'œil nu. Certains de ses contemporains contestent ses résultats et les soupçonnent de n'être que des illusions produites par la lunette. L'utilisation d'un instrument n'est pas une chose évidente, car il faut faire confiance à ses informations, qui ne viennent pas directement de nos sens.

Nous nous proposons dans le travail qui va suivre d'examiner différents modèles, les réponses qu'ils apportent ainsi que leurs faiblesses. Nous observerons tout d'abord les différents modèles géocentriques, depuis les premières représentations des civilisations fluviales à l'aboutissement de la *Composition mathématique* de Ptolémée. Puis nous nous demanderons comment le géocentrisme s'est inscrit dans la tradition occidentale, jusqu'à devenir le modèle officiel imposé par les tenants de l'autorité. Ensuite nous considérerons l'héliocentrisme, en commençant par les premières ébauches des précurseurs antiques. Après avoir examiné les origines où l'héliocentrisme est une réponse parmi d'autres au problème de la représentation du ciel, nous aborderons la mathématisation de ces modèles lors de la révolution astronomique, à travers Copernic et Kepler. Enfin, nous présenterons la méthode ainsi que l'effort de diffusion de l'héliocentrisme de Galilée.

2. Géocentrisme

2.1 Naissance de la cosmologie

Civilisations fluviales

La régularité de certains phénomènes naturels, comme l'alternance du jour et de la nuit, le retour périodique des saisons ou le mouvement des astres, a dû être observée très tôt. On trouve dans les documents qui nous sont parvenus des civilisations mésopotamienne et égyptienne une tentative de repérage et de classification des événements naturels.

Les premières explications sont de type mythique, où les phénomènes naturels sont personnifiés par des dieux. Ces explications traitent de cas particuliers. Celles-ci sont multiples, sans qu'une version cherche à s'imposer en raison d'une meilleure représentation des faits observables.

Les Mésopotamiens considèrent les événements astronomiques, comme les éclipses ou le passage de comètes, comme des messages divins. Ils établissent des tables astronomiques pour pouvoir prédire à l'avance certains de ces événements et lire ainsi ces avis des dieux. L'astronomie prend donc des intérêts religieux.

L'apparition de l'écriture il y a quelques 5'000 ans en Mésopotamie permet de consigner les observations et de confronter par la suite un fait nouveau avec ceux qui ont été enregistré auparavant. De cette manière, il est possible de remarquer une périodicité dans les phénomènes, qui permet ensuite de les prédire. Les Mésopotamiens multiplient les observations en mesurant précisément la position des astres. Pour pouvoir se repérer sur la voûte céleste, ils partagent le ciel en constellations et établissent le zodiaque, qu'ils divisent en douze segments. Ce travail nécessite une arithmétique élaborée. Ils adoptent un système de numération sexagésimale de position, dont il nous reste d'ailleurs quelques traces dans la division du jour en vingt-quatre heures ou celle de l'angle au centre en 360 degrés. La numérotation de position signifie que le nombre de symbole à manipuler est réduit, car c'est la position qui donne sa valeur au symbole. Ce système permet de résoudre aisément des problèmes complexes.

Le modèle des Mésopotamiens est très sommaire. Il ne décrit que la structure générale de l'Univers. Cependant, il permet déjà l'explication de phénomènes naturels, comme la pluie. Les Mésopotamiens se représentent la terre comme un disque plat, flottant sur un océan. Au-dessus, s'élève la voûte céleste alors que l'enfer est placé dans la demi-sphère inférieure. A l'extérieur de cette sphère s'étend la mer primordiale. Quand l'eau filtre à travers le dôme, il pleut à la surface de la Terre.

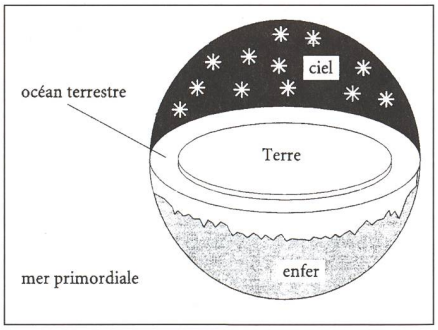


Fig. 1: représentation mésopotamienne du Monde.

Contrairement aux Mésopotamiens, les Egyptiens ont un mauvais outil mathématique à cause de leur tendance à tout ramener à des suites d'additions. Le domaine qu'ils développent est la géométrie. Leurs résultats seront repris par la science grecque. On a retrouvé peu de document sur l'astronomie égyptienne. Ils observent surtout le ciel en lien avec le Nil, pour pouvoir par exemple prédi-

re ses crues. Leurs intérêts sont principalement économiques et liés à l'agriculture.

Nous pouvons donc caractériser les civilisations fluviales ainsi: celles-ci donnent des explications mythologiques des phénomènes naturels et développent l'astronomie dans des buts utilitaires précis. Pour cette raison, elles n'ont pas besoin de mettre au point un modèle d'explication général de l'ensemble des phénomènes.

Milésiens

Au VIe siècle, l'école de Milet inaugure une nouvelle façon de concevoir les phénomènes naturels et l'on assiste à la naissance de l'esprit rationnel. Selon elle, la nature n'est pas soumise au pouvoir arbitraire de dieux et l'on a la capacité de chercher la cause des phénomènes naturels. Pour cela, elle remonte au principe fondamental de l'univers.

Thalès

Il conçoit la Terre comme un disque flottant sur l'eau, ce qui lui permet d'expliquer par exemple les tremblements de Terre, qui se produisent quand l'eau est agitée. Cette vision ressemble beaucoup à celle des Mésopotamiens, mais elle a le mérite d'écarter l'explication mythologique. Selon Thalès, l'élément premier est l'eau. Cette explication peut paraître simpliste mais de nouveau, la question a plus d'importance que la qualité de la réponse. Elle représente une nouvelle attitude devant la nature.

Cet élément premier est problématique. On peut se demander comment l'eau pourrait produire le feu, son contraire. On remarque ici un autre aspect de l'esprit nouveau de l'école milésienne: les théories sont discutées ; si l'une d'entre elles n'est pas satisfaisante, elle est remplacée par une autre théorie, ce qui n'est pas le cas des explications mythologiques, dont la multiplicité n'est pas critiquée.

Anaximandre

Selon lui, l'élément premier est indéfini. Il le nomme *apeiron*. Celui-ci n'a aucune caractéristique précise et Anaximandre évite le problème des contraires qui se pose à Thalès.

Anaximandre propose le premier modèle mécanique des corps célestes, incluant une explication des mouvements des astres. Les quatre éléments sont répartis en quatre régions. Le feu constitue les astres. Au-dessous se trouve l'air. Ses mouvements provoquent le déplacement des astres. L'eau se trouve dans la couche supérieure à la terre. En partie évaporée sous l'action du feu, elle forme la mer. Au centre se trouve la terre. La Terre a la forme d'une colonne et flotte en parfait équilibre au centre de l'Univers. Le feu est contenu dans des espèces de jantes. On l'aperçoit par de petits orifices qui sont les astres. Quand ceux-ci sont obstrués, on assiste aux phases de la Lune ou à une éclipse. Cette conception est beaucoup plus complète que celles qui l'ont précédée. On attribue également à Anaximandre l'invention du gnomon, sorte de cadran solaire constitué d'une tige plantée verticalement dans le sol. Cette invention atteste d'une volonté d'interroger la nature dans l'étude des phénomènes, et non d'attendre passivement qu'elle nous dévoile les informations dont on a besoin.

Anaximène

L'*apeiron* d'Anaximandre présente une généralisation dans la recherche de l'élément premier, mais qui est par trop abstraite. Anaximène propose de conserver une distinction entre l'élément premier et les autres. Il veut néanmoins se rattacher à l'expérience et présente un élément qu'il nomme air *apeiron*. Il peut alors décrire le processus par lequel cet élément premier engendre les autres par des notions que l'on rencontre dans l'expérience quotidienne. En effet, on obtient le feu par dilatation de cet élément, l'eau par condensation et la terre par précipitation. Anaximène présente également une conception de l'Univers. Selon lui, la Terre flotte dans l'air. Les astres sont fixés à la sphère de cristal qui s'élève au-dessus de la Terre.

Pythagoriciens

Toute chose est nombre pour les Pythagoriciens. Le principe fondamental de leur philosophie est la correspondance entre les nombres et les mécanismes naturels. Ils illustrent ce principe à travers la musique et l'astronomie, la musique s'adressant à l'oreille et l'astronomie aux yeux. Dans la cosmologie de Pythagore, les rapports mathématiques qui unissent les corps célestes entre eux sont les mêmes que ceux qui régissent l'harmonie de la lyre. La gamme de Pythagore est composée de sept notes jouées sur les sept cordes de la lyre. De même, sept corps tournent autour de la Terre. Cette analogie renforce l'intuition des Pythagoriciens: les nombres commandent tous les ordres de la réalité, même les plus lointains.

A partir de ce postulat, ils comparent le ciel à un gigantesque instrument de musique. Ils présentent alors une «harmonie des sphères célestes» où les corps céleste se déplacent dans l'Univers de manière régulière tout en émettant un son prodigieux. Cette théorie mettant en jeu les sens, il est aisé d'objecter que nous n'entendons pas le son émis par le déplacement des corps célestes. Pour répondre à cette objection, les Pythagoriciens précisent que, si nous ne l'entendons pas, c'est que nous y sommes accoutumés depuis notre naissance. Il convient ici d'examiner le type de réponse avancée. Les Pythagoriciens intègrent, à l'aide d'un raisonnement, la nouvelle observation, qui était problématique, dans leur théorie. Ils reviennent en quelque sorte à la phase qui précède la modélisation, celle où l'on observe les phénomènes en vue de construire un modèle. Par ce procédé, la théorie ne peut jamais être prise à défaut et donc jamais être vraiment vérifiée de façon scientifique. On n'a dans ce cas aucun moyen de la distinguer d'une fiction. L'astronomie mathématique puis Galilée mettrons au point des méthodes pour déterminer la qualité des représentations.

Modèle des Pythagoriciens

Les Pythagoriciens proposent au VIe siècle le premier modèle rendant compte de la position des planètes les unes par rapport aux autres. est un modèle géocentrique, la Terre occupant la position centrale dans l'Univers. C'est sûrement pour satisfaire leur principe de beauté et d'harmonie que les Pythagoriciens attribuent aux corps célestes un volume parfait, à savoir la sphère. Ils appliquent le même principe à la trajectoire des corps célestes: ils ne peuvent se mouvoir que selon une trajectoire parfaite, c'est-à-dire circulaire. C'est la première apparition de ce qui devient un dogme à partir de Platon: le mouvement circulaire uniforme des corps célestes.

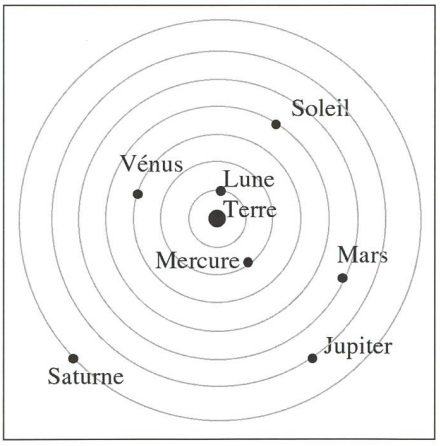


Figure 2: modèle des Pythagoriciens.

Modèle particulier de Philolaos

Philolaos est l'un des Pythagoriciens les plus importants. C'est le premier à mettre par écrit l'enseignement des Py-

thagoriciens, jusque là oral, dans un ouvrage intitulé *De la nature*. Il propose également un modèle cosmologique. Par rapport au premier modèle pythagoricien, Philolaos introduit des modifications considérables.

Il propose une conception pyrocentrique de l'Univers où la Terre est en rotation autour d'un feu central. Il justifie la position centrale du feu par sa noblesse. Le premier corps qui gravite autour est l'anti-Terre. En rajoutant ce corps céleste par rapport aux autres modèles, Philolaos porte le nombre des corps à dix, qui est considéré par les Pythagoriciens comme un nombre parfait. Les contemporains de Philolaos ont sûrement objecté que personne n'a jamais vu cette anti-Terre, ni d'ailleurs le feu central. Comme réponse, Philolaos explique que l'on ne les voit pas car on habite l'hémisphère opposé, un peu comme si nous étions sur un carrousel et que nous regardions vers l'extérieur: nous ne verrions pas l'axe central. L'anti-Terre permet aussi d'expliquer pourquoi les éclipses de Lune sont plus fréquentes que les éclipses de Soleil. En effet, l'anti-Terre pourrait aussi produire des éclipses de Lune. Ensuite vient la Terre, qui parcourt son orbite en vingt-quatre heures. Pour présenter toujours la même face au feu central, elle doit également avoir une rotation sur elle-même de vingt-quatre heures. Puis il y a la Lune, le Soleil, qui pour Philolaos n'est pas lumineux par lui-même mais est semblable à du cristal et renvoie la lumière du feu, les cinq planètes connues et observables, la sphère des étoiles fixes et le feu enveloppant.

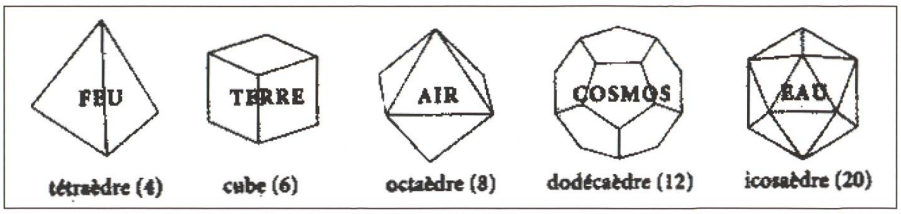


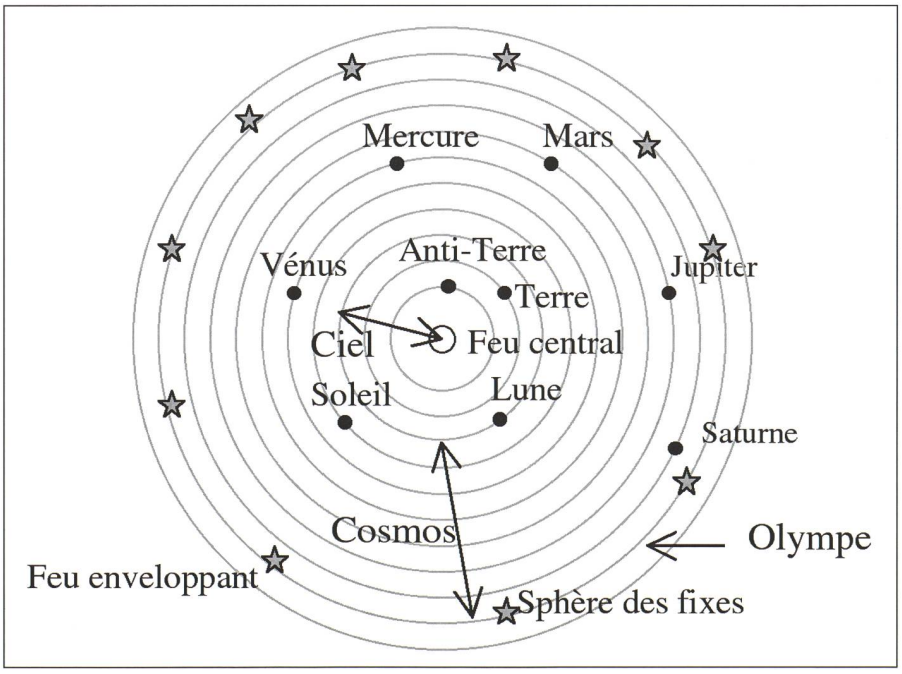
Figure 4: correspondance entre les éléments et les polyèdres réguliers.

Philolaos divise l'Univers en trois régions: le feu enveloppant est appelé Olympe; le Cosmos comprend les cinq planètes, le Soleil et la Lune. Ces deux premières régions sont considérées comme composées de corps immuables alors que la région sublunaire, nommée ciel, est le domaine de la génération et de la corruption. Tout comme pour le mouvement circulaire, la séparation des mondes sublunaire et supralunaire sera érigée par la suite en dogme.

Platon (~428-~348)

Pour Platon, ce qui est accessible à nos sens n'est que des apparences. Au-delà se trouve le monde des idées, éternel et immuable. L'activité scientifique doit dégager les lois abstraites qui s'étendent sous les observations sensibles. Platon privilégie une approche mathématique des phénomènes, au détriment de l'expérimentation et de l'observation. Les astres appartiennent au monde visible et sont une copie déformée du monde réel des idées. Platon formule le problème des mouvements planétaires et donne par-là l'impulsion à la recherche astronomique qui va suivre.

Figure 3: modèle de Philolaos.



Monde

Dans le *Timée*, Platon raconte comment le monde à été construit par un Démiurge. Ce monde est une copie du monde des idées; c'est donc le meilleur monde possible. Il est sphérique, car la sphère est un corps parfait. De plus, tous les solides réguliers sont inscriptibles dans la sphère. Il a un mouvement circulaire, car celui-ci est sans contraires ni errements, ce qui n'est pas le cas des six autres mouvements possibles, le mouvement vers le haut, le bas, la droite, la gauche, l'avant et l'arrière.

Le monde possède une âme qui est principe de mouvement. Elle est constituée du cercle de l'équateur, qui communique sa rotation à la sphère des fixes, et de celui de l'écliptique, qui, divisé en sept cercles concentriques, rend compte des révolutions des différentes planètes.

Eléments

La matière préexiste au monde, mais dans un état désordonné. Sous l'action du Démiurge, elle se regroupe suivant les affinités de ses éléments. Les quatre éléments se placent alors dans quatre régions. Platon identifie chaque élément à un polyèdre régulier. Le feu correspond au tétraèdre, l'air à l'octaèdre, l'eau à l'icosaèdre, la terre au cube et l'Univers dans son ensemble au dodécaèdre. Les corps qui nous entourent sont des assemblages de particules polyédriques. Il y a donc sous les apparences une réalité géométrique. Le monde est unique, car le Démiurge a épuisé le matériau des quatre éléments. Aucun élément extérieur au monde ne peut exister.

Planètes

Chaque planète ou luminaire est un globe entraîné par le mouvement d'une sphère invisible, concentrique à l'écliptique. Ils sont également affectés par la rotation du monde. Cela rend compte du fait que les planètes participent au mouvement diurne de la voûte céleste mais se déplacent aussi sur le fond du ciel. La terre se trouve immobile au centre.

Problème du mouvement planétaire

Platon propose une astronomie idéale, mathématisée. Cela ne correspond pas à la réalité telle que l'on peut l'observer. En effet, le mouvement des planètes comporte des irrégularités appelées anomalies planétaires. Platon indique alors qu'il faut aller au-delà des phénomènes observables et rendre compte de ce caractère apparent à l'aide de mouvements circulaires uniformes. La tâche qu'il assigne aux astronomes est de saisir, sous ces phénomènes changeants, la réalité permanente. Il s'agit de sauver les apparences.

Aristote (~384-~322)

Pour élaborer son modèle, Aristote se base sur des observations du monde qui l'entoure. Grâce à la logique, il parvient alors à intégrer ces observations dans un système complet d'explication du monde. Sa grande cohérence en fera le système dominant jusqu'à l'innovation de la physique classique.

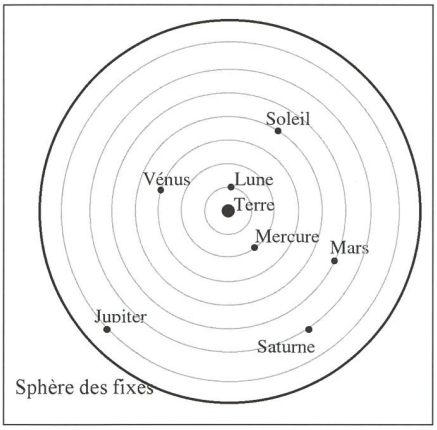


Figure 5: modèle d'Aristote.

Structure de l'Univers

Finitude du Monde

L'Univers est fini et contenu dans la sphère des étoiles fixe. D'une part, parce que le ciel a un mouvement fini. En effet, on peut observer que les étoiles reviennent toujours à la même place. Or, à un Univers infini correspondrait un mouvement infini. D'autre part, un espace infini n'aurait pas de centre, ce qui est contraire à l'observation de la chute des corps en direction d'un point convergent au centre de la Terre.

Au-delà de la sphère des étoiles fixes, il n'y a rien. Il ne faut pas confondre cette notion avec le vide. En effet, le vide nécessite l'existence d'espace, ce qui n'est pas le cas au-delà de la sphère des fixes.

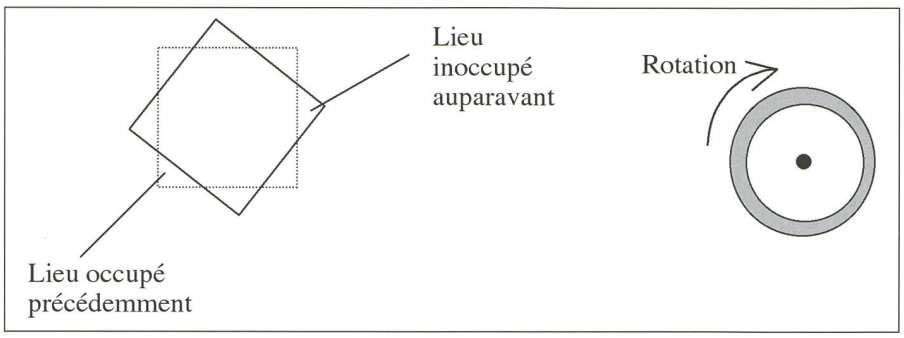


Figure 7: la rotation d'un cube provoque des changements locaux de l'espace alors que la rotation de sphères occupe toujours le même espace.

Unicité du Monde

Examinons tout d'abord deux axiomes de la physique d'Aristote:

1) Si un corps demeure dans un lieu, c'est son lieu naturel. Placé hors de ce lieu, il y retourne naturellement.
2) Si ce corps doit être tenu, c'est qu'il ne se trouve pas dans son lieu naturel.

De plus, pour qu'un monde soit qualifié «d'autre monde», il faut qu'il possède des ressemblances au monde en question et donc être constitué des mêmes éléments. Sinon, il ne s'agit pas «d'autre monde» mais d'autre chose.

Ainsi, il ne peut exister d'autre monde, car s'il en existait un, ses éléments se regrouperaient avec le premier de façon à n'en former qu'un seul, les éléments des deux mondes ayant les mêmes lieux naturels.

Inexistence du vide extérieur

Le vide qualifie un lieu inoccupé. Pour l'occuper, il suffit d'amener un objet. Cependant, il est impossible d'amener des objets au-delà de la sphère des étoiles fixes, car ils sont tous contenus dans cette sphère. Le vide n'existe donc pas en dehors de cette limite.

Sphéricité du Monde

Lorsqu'un cube est en rotation, il n'occupe pas toujours le même espace. Il y a un agrandissement et un rétrécissement local de l'espace. Si l'Univers était cubique, il faudrait du vide à l'extérieur de la sphère des fixes pour permettre sa rotation. Or, le vide à l'extérieur de l'Univers est une chose impossible. Le seul volume qui ne change pas de place lors de sa rotation est la sphère. L'Univers est donc sphérique.

De même, les orbes portant les planètes doivent être sphériques. En effet, la forme la plus facile à emboîter dans une sphère est une autre sphère.

Séparation des mondes supralunaire et sublunaire

Aristote sépare l'Univers en deux régions bien distinctes: la région supralunaire et la région sublunaire.

La première est éternelle et immuable, alors que la deuxième connaît la variété et le changement. En opposition à la région supralunaire qui possède des mouvements circulaires uniformes, la région sublunaire possède des mouvements rectilignes.

L'Univers est sphérique et, comme toute sphère en rotation, a un centre qui est la Terre, contenue dans la région sublunaire.

Quatre éléments

L'existence de la terre implique celle du feu, son contraire, et tous deux impli-

Figure 6: les trajectoires de chute des éléments lourds convergent vers un point unique.

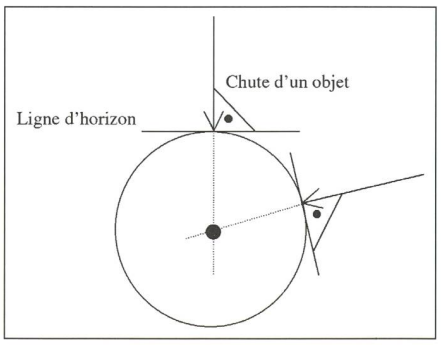
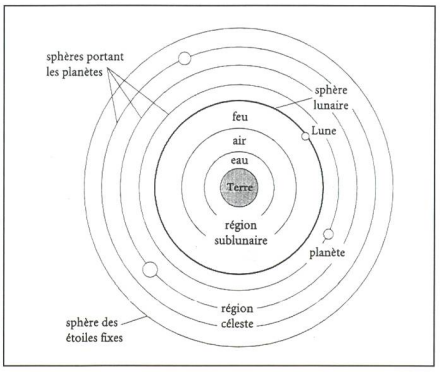


Figure 8: séparation entre le monde supralunaire et le monde sublunaire.



quent finalement leurs intermédiaires, l'eau et l'air. Toute la matière se trouvant dans le monde sublunaire est un composé de ces quatre éléments.

Ils sont répartis, tant que rien ne les perturbe, en quatre enveloppes concentriques. Cependant, la rotation des sphères du monde supralunaire les mélange de façon à former les objets qui nous entourent.

Tous les éléments du monde sublunaire ont des mouvements rectilignes, alors qu'Aristote observe des mouvements circulaires dans la région supralunaire. Le feu se dirige vers le haut en opposition à la terre qui se dirige vers le centre de l'Univers, comme tous les corps lourds. Quant aux deux intermédiaires, ils ont tantôt un mouvement vers le bas tantôt vers le haut, suivant le corps avec lequel ils sont en contact.

Ether

De la différence entre le mouvement rectiligne des éléments du monde sublunaire avec les mouvements circulaires observés dans le monde supralunaire, Aristote conclut qu'il s'agit d'un cinquième élément qu'il nomme l'éther, signifiant «ce qui se meut toujours». L'éther possédant un mouvement circulaire n'est ni léger ni lourd, car les corps légers se meuvent vers le haut et les lourds vers le bas. Il ne possède pas de contraire. En effet, le mouvement vers le bas est le contraire du mouvement vers le haut et inversement, alors qu'il n'y en a pas pour le mouvement circulaire.

Planètes

Les astres sont constitués d'éther et n'ont pas de mouvement propre. C'est à cause de cela qu'Aristote les décrit comme portées par des sphères. Il peut observer grâce aux éclipses que la Lune et le Soleil sont sphériques. En effet, on observe à ce moment la forme du disque lunaire qui occulte le disque solaire. Il est remarquable que, tout en ayant un modèle cosmologique très différent de celui que l'on considère actuellement, les Anciens proposent une explication des éclipses semblable à la nôtre, où une éclipse est provoquée par le passage de la Lune devant le Soleil. Ainsi, certains éléments d'une théorie peuvent être repris dans des modèles diamétralement opposés. La Lune et le Soleil étant constitués d'éther tout comme les autres astres, ils partagent également avec eux leur forme sphérique.

Terre

La Terre occupe la position centrale dans l'Univers. Pour montrer cela, Aristote observe que tous les éléments lourds constitués de terre sont attirés vers leur lieu naturel, le centre.

La Terre est fixe. Ayant jeté un objet en l'air, Aristote observe qu'il retombe à la même place. Si la terre avait tourné, il devrait retomber en arrière. Il peut donc conclure que la Terre est immobile. De plus, si la terre tournait, tous les objets de sa surface seraient éjectés par la force centrifuge.

Les composants de la Terre tendent à rejoindre leur lieu naturel. Ils se rassemblent alors le plus proche du centre et se regroupent en sphère.

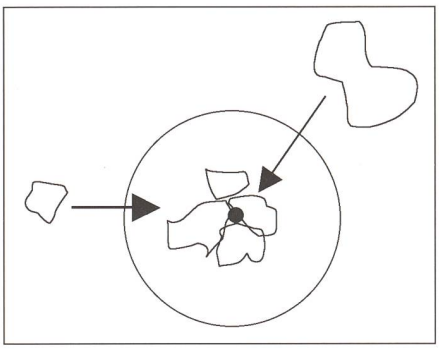


Figure 9: les graves sont attirés vers le centre de manière à former une sphère.

Par ailleurs, l'ombre que projette la terre sur la lune lors d'éclipses est circulaire. Cette observation n'est pas suffisante pour conclure à la sphéricité de la Terre. En effet, un disque faisant face au Soleil produirait le même effet. Aristote complète donc l'argument par une autre observation. Il remarque que les étoiles ne se trouvent pas toujours à la même place suivant le lieu où il se trouve sur la Terre.

Modèle mécanique

Aristote reprend le système des sphères homocentriques mis au point par Eudoxe et Callippe, mais il s'intéresse à l'aspect mécanique. Comme le vide n'existe pas, chaque sphère transmet son mouvement à celle qui la touche immédiatement. Pour compenser ces mouvements induits par les planètes voisines, il intercale des sphères réactrices. De cette manière, Aristote double presque le nombre de sphères utilisées par Eudoxe. Son modèle comporte alors cinquante-cinq sphères.

2.2. Astronomie mathématique

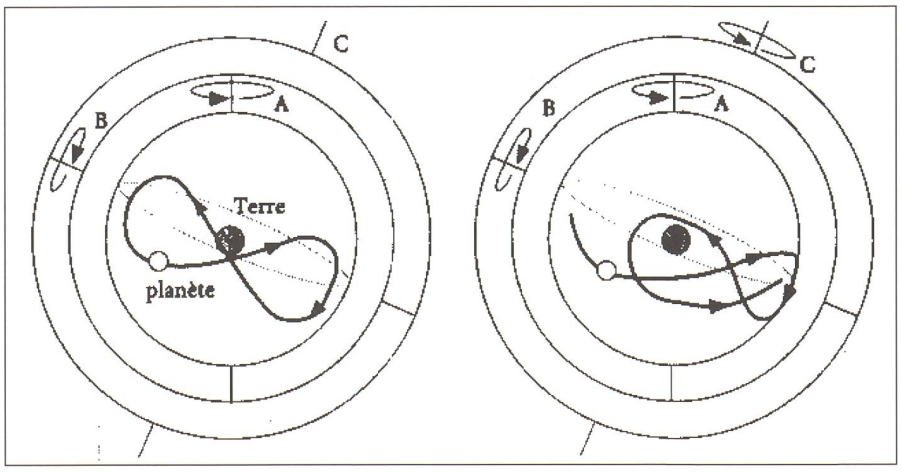
L'astronomie mathématique est développée à la suite des travaux de Platon et Aristote. Elle tente de résoudre le problème du mouvement des planètes en respectant les trois axiomes principaux, à savoir le dualisme des mondes supralunaire et sublunaire, le géocentrisme et les mouvements circulaires uniformes.

La question de la physique ayant été résolue grâce à l'œuvre d'Aristote, reposant sur la logique et constituant donc une connaissance certaine, l'astronomie mathématique ne s'interroge pas sur la vérité des systèmes proposés. Ce sont des modèles purement géométriques, qui tentent de rendre compte des mouvements planétaires, sans préoccupations physiques.

Eudoxe (v.~406-v.~355), Callippe

Platon pose une hypothèse géométrique, les mouvements sont circulaires et uniformes. Par-là, il donne une structure mathématique à l'astronomie. Il faut chercher l'ordre sous ces apparences de désordre. Les sphères homocentriques sont une première tentative de rendre compte des phénomènes tout en respectant les dogmes platoniciens et aristotéliciens.

Figure 10: modèle des sphères concentriques.



Pour expliquer les anomalies des planètes, Eudoxe emboîte des sphères dont l'axe de la sphère intérieure est solidaire de la sphère extérieure. Ces axes sont inclinés les uns par rapport aux autres. La planète est fixée à l'équateur de la sphère la plus intérieure. Les systèmes de chaque planète restent cependant indépendants les uns des autres.

Avec trois sphères pour le Soleil et trois pour la Lune, ainsi que quatre par planètes, Eudoxe arrive à rendre compte assez précisément des irrégularités. La première sphère explique le mouvement d'orient en occident autour de l'axe du monde, la deuxième le mouvement des planètes le long de l'écliptique, les suivantes les diverses anomalies. Callippe perfectionne ce système en ajoutant une sphère pour Mars, Mercure et Vénus, ainsi que deux pour le Soleil et la Lune. Il rend de cette manière compte de l'inégalité des saisons, ce que n'avait pas fait Eudoxe.

Ce modèle est satisfaisant pour Jupiter et Saturne, passable pour Mercure, mais mauvais pour Vénus et Mars. Il ne rend pas compte des variations d'éclat des planètes. Or, le ciel étant tenu pour immuable, cela ne peut être dû à une cause interne aux planètes. Il ne mentionne pas non plus la variation du diamètre apparent de la Lune, que l'on peut observer par la comparaison des éclipses totales et annulaires. De plus, ce modèle présente des rétrogradations trop régulières par rapport à l'observation.

Appolonius (v. ~262-v. ~180), Hipparque

Appolonius puis Hipparque mettent au point un modèle pour remplacer celui des sphères homocentriques, jugé insuffisant. Ils utilisent deux constructions mathématiquement équivalentes, à savoir les excentriques et les épicycles.

Excentriques

La vitesse des planètes sur le zodiaque semble varier, ce qui est contraire au dogme des mouvements uniformes. Les astronomes proposent alors que nous ne soyons pas exactement au centre des mouvements. La vitesse au périgée semble donc plus élevée que la vitesse à l'apogée.

Epicycles

Contrairement à la représentation des sphères homocentriques, les planètes ne rétrogradent pas toujours au même endroit. Cela est dû au fait que les irrégularités ne dépendent pas de la position par rapport aux étoiles fixes mais par rapport au Soleil. On peut observer qu'une planète se trouve au centre de son arc de rétrogradation lorsqu'elle est en opposition avec le Soleil.

Le nombre de cercles, la vitesse et le sens de rotation des épicycles peuvent être ajustés de manière à rendre compte des variations apparentes.

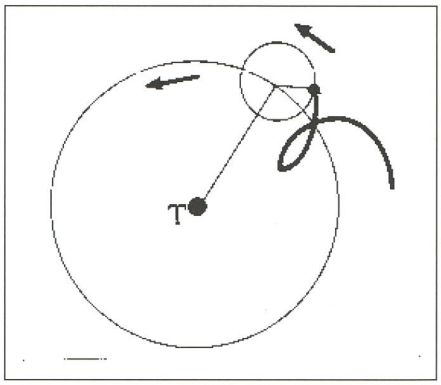


Figure 12: épicycle.

Hipparque

Hipparque détermine l'excentricité du soleil, ainsi que son lieu d'apogée. Il aborde la Lune par les deux méthodes équivalentes. Cependant, comme il utilise des observations différentes et inexactes, il n'obtient pas l'équivalence attendue. Dans une telle situation, l'astronomie mathématique privilégie la théorie sur l'observation, et Hipparque conçoit malgré tout son modèle avec ces deux constructions géométriques. Pour les planètes, celui-ci combine la méthode des excentriques et des épicycles. Par ce moyen, le centre de l'épicycle ne décrit pas l'écliptique avec une vitesse constante.

Méthode

Hipparque met au point une méthode pour l'élaboration de modèles. Il observe tout d'abord avec précision les particularités des mouvements, analyse ces anomalies et détermine les grandeurs et périodes de révolution des planètes. Il cherche alors une combinaison géométrique qui permet de rendre compte des apparences. Enfin, il élabore des tables en tirant les conséquences de son modèle. La qualité du modèle dépend de l'adéquation entre prévision et observations.

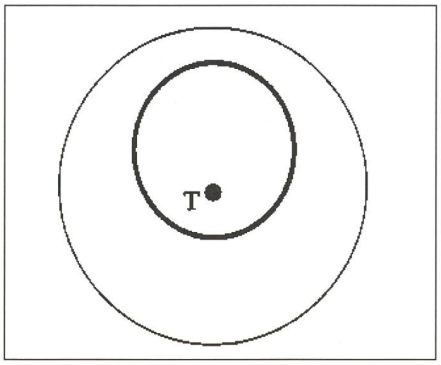


Figure 11: excentrique.

Ptolémée (v. 90-v. 168)

L'ouvrage majeur de Ptolémée est sa *Composition mathématique*, plus connue sous le nom d'*Almageste*. Il a été baptisé ainsi par les Arabes au Moyen-Age. Cela vient d'*Al Midjisti* et signifie «le très grand [livre]». C'est la somme de tout ce que l'on sait en astronomie à l'époque de Ptolémée. Il achève ainsi les ébauches de ses prédécesseurs. L'ouvrage traite de la structure de l'Univers, des mouvements célestes, de la situation de la Terre, ainsi que les théories du Soleil, de la Lune et des planètes. Il contient également une description de la sphère céleste et un catalogue d'étoiles. Ptolémée développe aussi les outils mathématiques nécessaires à l'astronomie.

Aspect physique

Ptolémée pose certaines propositions physiques. L'Univers est une sphère et est donc limité. Il est sphérique car il est fait d'éther. Or, l'éther est l'élément le plus homogène. Pour cette raison, il faut lui attribuer le solide le plus homogène qui est la sphère. L'Univers possède un mouvement diurne. C'est pour cela que les étoiles se déplacent dans le ciel. En revanche, les planètes ont un mouvement propre. Quant à la Terre, c'est une sphère immobile au centre du Monde. Si la Terre n'était pas au centre, le plan de l'horizon ne couperait pas la sphère céleste en deux moitiés.

L'immobilité de la Terre n'avait plus été examinée depuis Aristote. Les prédécesseurs de Ptolémée l'admettent sans discussions. Ptolémée reprend les justifications qu'Aristote donne dans le traité du Ciel. Il convient de relever un argument contre le mouvement de la Terre. Si la Terre tournait, les objets se trouvant en l'air, comme les oiseaux ou les nuages, partiraient en arrière. Certains répondent alors que l'eau et l'air tournent avec la Terre. Ptolémée répond que, si l'eau et l'air possédaient le même mouvement que la Terre, ils n'auraient pas de mouvements propres comme le vent ou les vagues.

Théorie du Soleil

Ptolémée utilise la méthode d'Hipparque pour mener à bien ses travaux. Il sauve les anomalies du Soleil de la

même façon que ce dernier. Il démontre aussi la parfaite équivalence de la méthode de l'épicycle et de l'excentrique pour le Soleil. Il choisit l'excentrique et détermine les paramètres afin de pouvoir dresser des tables. Comme ces tables supposent des jours d'une durée égale aux nuits, il consacre également des chapitres aux inégalités du jour et de la nuit.

Théorie des planètes

Ptolémée améliore la correspondance entre prédictions et observations. Pour cela, il combine les deux modes, tout comme Hipparque. Cependant, cela n'est pas suffisant. Il utilise alors deux artifices inédits, dont le premier est constitué du cercle équant. La vitesse n'est plus constante par rapport au centre mais par rapport à un point du disque.

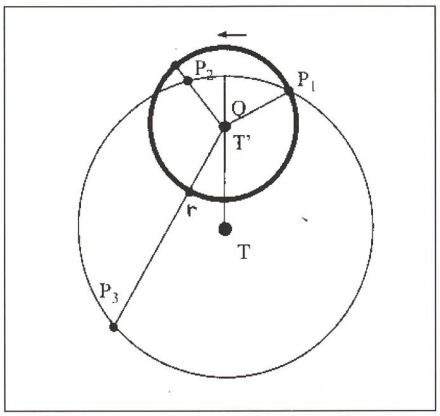


Figure 13: cercle équant de centre T', où r possède une vitesse constante.

Pour Vénus et Mercure, il introduit des excentriques mobiles rétrogrades. Il demeure un problème dans la description des mouvements en latitude. Ptolémée le résout en plaçant les déférents et épicycles dans des plans différents.

Statut du modèle

Ptolémée affirme l'inadéquation de tout modèle humain prétendant représenter les choses célestes. C'est une absurdité de vouloir imposer aux astres des figurations mécaniques de trajectoires. Il considère son modèle sans réalité physique.

La préoccupation de Ptolémée est d'établir une théorie du mouvement des planètes rapporté à la Terre. Son édifice reste valable dans un système où la Terre est en mouvement. En effet, il pratique une astronomie de position, en employant les étoiles comme repères. Ces observations sur la voûte céleste sont les mêmes, que se soit la Terre ou la sphère des fixes qui possèdent un mouvement. Copernic utilise d'ailleurs les données de Ptolémée pour mettre au point son système héliocentrique.

Après Ptolémée, l'astronomie mathématique consiste en précisions techniques, mais il n'y a que de rares modifications fondamentales.

2.3. Occident chrétien

Adoption

On peut considérer Aristote comme le dernier grand cosmologiste et Ptolémée comme le dernier grand astronome. Après eux, il n'y a aucun changement durable jusqu'à Copernic.

L'Occident chrétien ne s'intéresse pas l'héritage scientifique des Grecs, car l'Ecriture est considérée comme renfermant la totalité des connaissances nécessaires au salut, arrêtant ainsi la diffusion d'un savoir extérieur. L'islam récupère cet héritage et son astronomie a pour cadre la tradition de l'Antiquité classique. L'Europe redécouvre ces connaissances au moment de la *Reconquista*.

A cette époque l'Eglise catholique représente l'autorité. Intellectuels et savants sont des membres du clergé. Ce sont eux qui traduisent et diffusent les textes de l'Antiquité. Pour maintenir sa suprématie, l'Eglise doit trouver un compromis entre les doctrines et la philosophie classique. Saint Thomas d'Aquin permet la fusion entre les doctrines et l'aristotélisme.

Saint Thomas d'Aquin (1227-1274)

Saint Thomas d'Aquin tente de concilier foi et raison en intégrant la physique d'Aristote. Selon lui, les Ecritures ont un sens métaphorique pour pouvoir être comprises par des gens peu cultivés.

Son maître Albert le Grand a développé la philosophie d'Aristote hors de la théologie. Cependant, il y a de nombreuses contradictions. Pour saint Thomas, il existe des vérités philosophiques, établies par le raisonnement, sans rien emprunter de la théologie. Cependant, ces deux vérités ne sont pas opposées et peuvent s'accorder. Le thomisme permet, par exemple, d'expliquer rationnellement la transsubstantiation.

Lien entre le spirituel et le matériel

La scolastique résulte de l'union entre les dogmes chrétiens et l'aristotélisme. Elle aborde le monde de façon rationnelle. Cependant, le spirituel se trouve lié au matériel. Une modification dans l'interprétation des réalités sensibles peut invalider l'ensemble, qui contient aussi les croyances religieuses.

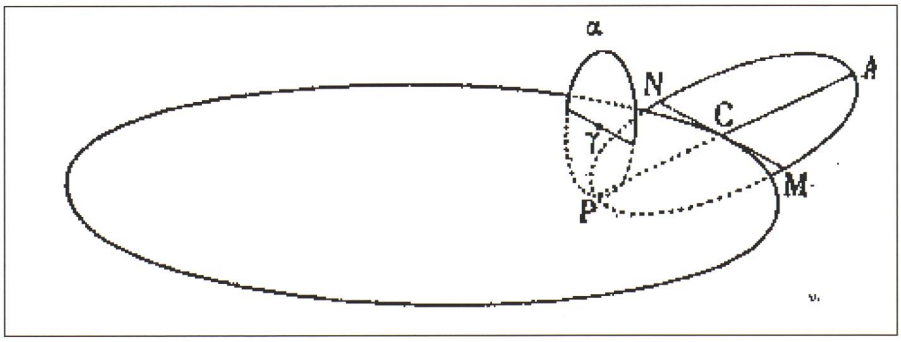
Tycho Brahé (1546-1601)

Tycho Brahé fait des observations systématiques et précises. Sa carte du ciel comporte environ mille étoiles, dont 777 sont très précisément repérées. Il observe le mouvement des planètes sur une période de plus de vingt ans. Pour améliorer la qualité des mesures, il construit une instrumentation plus grande et plus stable. Cependant, il continue de faire exclusivement des observations à l'œil nu.

Il élabore un système pour remplacer celui de Ptolémée. C'est une extension du système d'Héraclide, dont nous reparlerons. Ce système est un compromis par rapport aux problèmes posés par le *Des révolutions des orbes célestes* de Copernic. Tycho veut concilier les Ecritures avec les lois du mouvement, tout en maintenant l'harmonie du système de Copernic. Le centre de l'Univers n'est plus le centre géométrique de la plupart des mouvements.

Ce système pose des problèmes du point de vue physique, car il ne peut être ainsi justifié. Cependant, comme il répond à un besoin, ce système a un succès immédiat. C'est ce modèle qu'adoptent les membres du Collège Romain lorsque les observations de Galilée s'opposent au système de Ptolémée.

Figure 14: déférents et épicycle dans des plans différents.



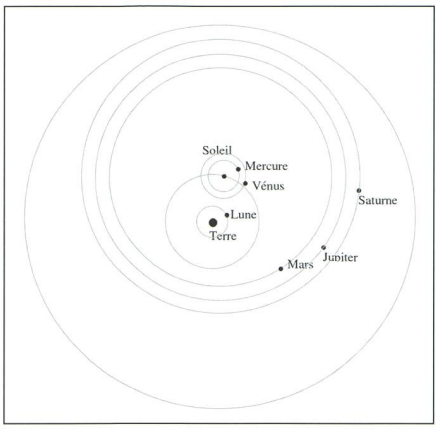


Figure 15: modèle de Tycho Brahé.

Tycho Brahé reste fidèle au dogme des mouvements circulaires uniformes et conserve la Terre au centre de son système. Ses observations l'amènent cependant à réfuter l'immuabilité des cieux. Tycho observe une comète et calcule qu'elle doit se trouver au-delà de l'orbe lunaire. Il abandonne alors les sphères de cristal. L'observation d'une nova le contraint à rompre une nouvelle fois avec la tradition. Puisqu'une nouvelle étoile est apparue, les cieux ne sont pas immuables. Après Tycho Brahé, l'opposition entre les mondes sublunaire et supralunaire est mise en question.

2.4. Conclusion

Le géocentrisme utilise le procédé que nous avons examiné précédemment chez les Pythagoriciens. Après avoir mis en place un certain nombre de postulats, les astronomes reviennent à l'étape qui précède la modélisation, qui consiste en observations, et complètent la théorie. Un tel procédé est mis en œuvre lorsque la théorie est tenue pour infaillible et que l'on ne doute plus qu'elle puisse tout expliquer. Une théorie érigée en dogme n'a pas besoin d'être vérifiée. La cause de son abandon est alors une trop grande complexité ou l'impossibilité de compléter encore la théorie.

En revanche, l'astronomie mathématique met au point une méthode, qui après l'élaboration d'un modèle, demande des observations, non plus pour compléter la théorie, mais pour la vérifier. Cette vérification est mise en œuvre par la comparaison entre prédictions théoriques et nouvelles observations.

L'aspect physique du modèle géocentrique perdure donc sous forme de dogmes, Tycho Brahé mis à part, alors que l'aspect mathématique, se réduisant à l'affinement des constructions géométriques, est constamment modifié, augmentant peu à peu la complexité des systèmes.

3. Héliocentrisme

3.1. Précurseurs

Alors que le géocentrisme fait autorité durant l'Antiquité, Héraclide et Aristarque proposent des solutions différentes au problème des planètes. Cependant, leurs modèles n'ont guère de succès. Ni mathématisés ni supportés par une doctrine physique, ces modèles ne sont pas aussi complets que les modèles géocentriques.

Héraclide (~388-~312)

Son système pourrait être à l'origine de la théorie épicyclique et le place comme précurseur de Tycho Brahé. Héraclide abandonne le premier les sphères homocentriques pour un système semi-héliocentrique.

Il y a des irrégularités de mouvement pour les planètes inférieures et supérieures. Par ailleurs, les planètes inférieures posent des problèmes supplémentaires. Vénus a des changements très marqués. De plus, tout comme Mercure, elle est tantôt devant, tantôt à l'arrière du Soleil. Pour résoudre cela, Héraclide propose que ces deux planètes soient liées au Soleil. La Terre reste tout de même au centre de l'Univers.

Pour expliquer le mouvement apparent de la sphère des fixes, il pose le mouvement de rotation de la Terre sur elle-même. L'hypothèse du mouvement de rotation de la Terre permet d'économiser des sphères. Cependant, elle heurte le bon sens. En effet, on n'observe aucune affectation sur les corps en chute libre ou le mouvement des nuages.

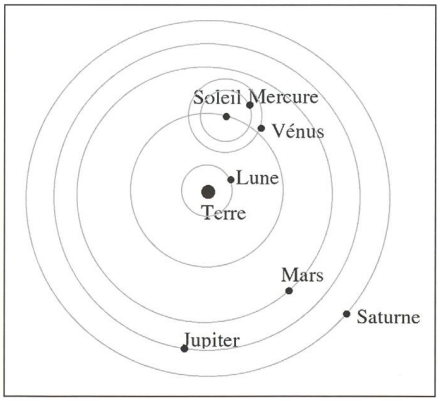


Figure 16: modèle semi-héliocentrique d'Héraclide.

Aristarque (v. ~310-v. ~230)

Aristarque met au point un système héliocentrique, qui inspirera Copernic. A l'instar de l'exigence platonicienne, il pose une hypothèse pour sauver les phénomènes astronomiques, mais n'en affirme pas la réalité.

Selon Aristarque, le Soleil immobile se trouve au centre de la sphère des fixes. La Terre fait le tour du Soleil en une année. De plus, elle possède une rotation diurne, alors que la sphère des étoiles est immobile. Le rayon de cette sphère a un rapport immensément grand avec le rayon de l'orbite terrestre. Si ce n'était pas le cas, on observerait des variations du mouvement des étoiles suivant la position de la Terre, ce qui n'est pas remarqué. La Lune est entraînée autour de la Terre. Les autres planètes décrivent des cercles autour du Soleil.

Avec le recul, cette théorie peut paraître évidente et l'on se demande pourquoi elle n'a pas été immédiatement adoptée. De nombreuses raisons s'y opposent. D'un point de vue religieux, la Terre, étant sacrée, doit se trouver au centre de l'Univers. L'héliocentrisme est aussi contraire à la physique. Si la Terre bougeait, on devrait en voir les effets sur les objets en mouvement dans l'air. D'un point de vue astronomique, ce modèle ne rend pas compte des irrégularités des saisons. De plus, malgré une tentative d'explication, l'absence de parallaxes reste un obstacle. Il faut également noter que l'héliocentrisme est contraire au sens commun. L'astronomie est constituée d'observations effectuées depuis la Terre et, au premier abord, la Terre ne peut être qu'au centre d'un modèle construit par ces mêmes observateurs.

3.2. Révolution astronomique

Copernic (1473-1543)

La publication en 1543 du *De Revolutionibus Orbium Coelestium* est une date importante de l'histoire de la pensée humaine. Avec la diffusion de cet ouvrage, la conception que l'homme se faisait de l'Univers est transformée.

Problème des planètes

Copernic se propose de trouver une nouvelle réponse au problème des planètes, qui consiste à réduire les mouvements apparents à des mouvements ré-

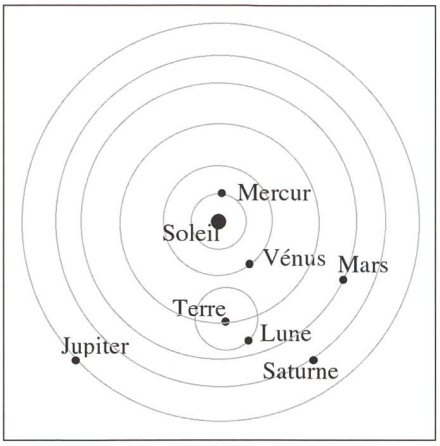


Figure 17: représentation simplifiée du système de Copernic.

guliers. En introduisant l'équant, Ptolémée déjoue la règle des mouvements circulaires uniformes. Cet artifice mathématique pose des problèmes physiques et esthétiques. Copernic peut se rendre compte des recherches infructueuses qui le séparent de Ptolémée, alors que ce dernier ne pouvait pas avoir ce recul. Par ailleurs, de nombreuses objections aussi bien physiques que religieuses s'y opposaient. Ainsi, Ptolémée n'aurait pas pu assurer l'affirmation selon laquelle la Terre se meut.

Copernic reproche au géocentrisme sa complexité. Cependant, son système use de presque autant de cercles. L'économie apparaît lorsque l'on envisage le système dans son ensemble. L'orbe de la Terre se substitue alors aux épicycles. Ces épicycles ne sont pas pour autant absents du modèle de Copernic, car ils sont nécessaires pour remplacer les équants.

Le modèle de Ptolémée est assez satisfaisant pour le calcul et représente un chef d'œuvre mathématique. Avec l'équant, il arrive à une précision étonnante. Le système de Copernic n'est pas plus précis. De plus, la nouvelle théorie repose pour une grande partie sur les données de Ptolémée. Il est intéressant de noter qu'à partir des mêmes observations deux modèles différents peuvent être construits. Dans un cas comme celui-ci, ce n'est pas une plus grande précision des mesures qui permet de déterminer le modèle qui représente le mieux la réalité.

De plus, le système de Copernic est pour l'observateur plus compliqué que celui de Ptolémée. En effet, le système de Ptolémée présente les objets célestes comme ils sont vus depuis la Terre. Il est alors aisé de retrouver le lieu apparent d'un astre. Le système de Copernic nécessite la connaissance des positions héliocentriques de l'objet et de la Terre pour déterminer le lieu apparent.

Par ailleurs, le système de Copernic élargit presque à l'infini les dimensions de l'Univers, pour pouvoir justifier l'absence de parallaxes observées.

Le système de Copernic est à peine moins lourd que le système de Ptolémée et n'est pas plus précis. Son importance se situe d'un point de vue esthétique. En effet, il représente une plus grande systématisation que ses prédécesseurs.

Composition de l'œuvre

Le *De Revolutionibus Orbium Coelestium* présente un système héliocentrique sous une forme complète. Celui-ci est écrit sur le modèle de l'Almageste. A part le premier livre, cet ouvrage est beaucoup trop mathématique pour pouvoir être lu par un large public et reste réservé aux astronomes. Le premier livre est une présentation générale et non-mathématique du système. Il inclut des arguments issus du géocentrisme, particulièrement de l'aristotélisme. Ainsi, Copernic procède à partir de thèses connues par le lecteur, et introduit progressivement les nouvelles, effectuant un glissement d'un système à un autre.

Système

Le système de Copernic comprend sept axiomes:

1. Il n'y a pas de centre unique pour tous les orbes. La Lune tourne par exemple autour de la Terre, qui parcours elle-même un orbe autour du Soleil.
2. La Terre n'est pas le centre de l'Univers mais le centre d'attirance des graves et celui de l'orbe lunaire.
3. Le Soleil est au milieu des orbes. Le centre du Monde se trouve au voisinage du Soleil.
4. La distance à laquelle se trouve la sphère des fixes est incommensurable.
5. La sphère des fixes est immobile et son mouvement n'est qu'apparent. C'est la rotation diurne de la Terre qui le produit.
6. Le mouvement apparent du Soleil est provoqué par le mouvement de révolution de la Terre sur son orbe.
7. Le mouvement rétrograde des planètes est produit par le mouvement de la Terre.

La Terre possède selon ce modèle un triple mouvement, la rotation autour de son axe, le mouvement orbital annuel et le mouvement conique annuel de son axe. Elle n'est pas réellement centrée sur le Soleil pour rendre compte de l'inégalité des saisons.

Les planètes n'ont pas d'épicycles majeurs. Les rétrogradations sont expliquées par les inégalités des temps requis pour parcourir les orbes. La Terre dépasse régulièrement les planètes supérieures et se fait dépasser par les planètes inférieures.

Argumentation

Copernic démontre d'abord la sphéricité du Monde, puis celle de la Terre. Il peut alors les rapprocher car ils la même forme. Il montre ensuite le rapport entre la forme sphérique et le mouvement circulaire. Comme la Terre est sphérique, il n'y a plus d'obstacle à son mouvement.

Copernic ne peut pas donner la preuve physique du mouvement de la Terre et doit se contenter d'arguments *a priori*. Il déclare qu'il est absurde de vouloir mouvoir l'Univers plutôt que ce qu'il contient. A l'objection selon laquelle la force centrifuge ferait éclater la Terre, il

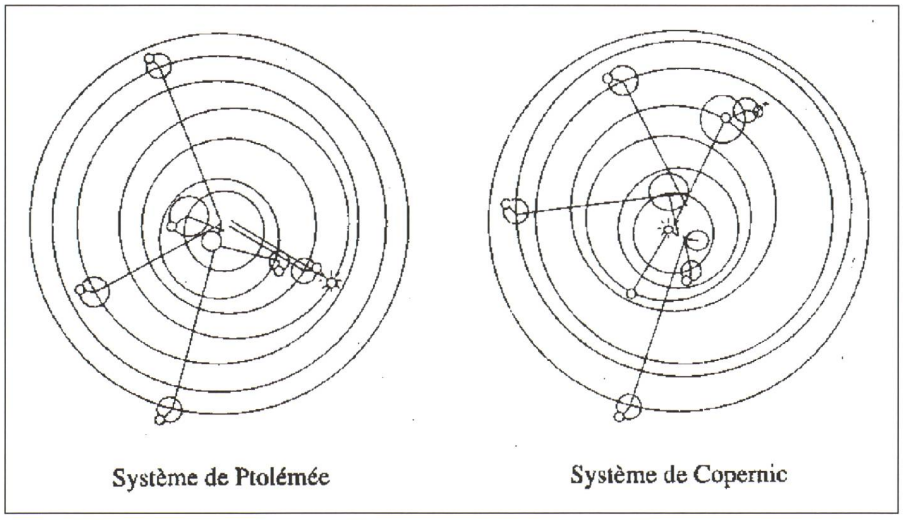


Figure 18: comparaison du système de Ptolémée et du système de Copernic.

répond que l'effet serait accentué dans le cas de la rotation des cieux. Cependant, la physique d'Aristote fait une différence qualitative entre la Terre, qui est lourde, et les cieux, qui sont privés de toute pesanteur. Pour mouvoir la Terre, il faut, d'après l'aristotélisme, une force formidable, alors que les cieux tournent selon leur propre nature.

Copernic redéfinit la gravité comme ce qui permet aux parties de former un tout. C'est sous son action que la matière se rassemble naturellement en sphère, qui tourne alors selon la nature propre à cette forme.

Copernic remarque que d'un point de vue strictement optique, on ne peut pas savoir si l'observateur est en mouvement ou si c'est ce qu'il observe qui possède un mouvement. Cependant, cet argument ne lui donne aucun avantage sur le système de Ptolémée.

Conclusion

L'œuvre de Copernic ne peut être lue que par des érudits. C'est pour cette raison qu'elle ne fait lors de sa parution que peu de bruit en dehors du milieu astronomique. Les astronomes l'emploient comme une fiction mathématique. C'est d'ailleurs sous cet aspect que le nouveau modèle est présenté dans la préface d'Osiander au *De Revolutionibus Orbium Coelestium*. Selon lui, la science, et l'astronomie en particulier, ne doit s'occuper que de sauver les phénomènes. Elle consiste à relier et ordonner les observations au moyen d'hypothèses, qui permettent par la suite le calcul et la prédiction, mais ne doit pas prétendre à la réalité.

Considérant la possibilité d'améliorer l'héliocentrisme, contrairement aux modèles géocentriques, buttant tous sans nouvelle ouverture sur le même problème, le choix de modèle aurait été vite fait dans le milieu astronomique. Cependant, avec la transformation de la façon dont l'homme conçoit Dieu qu'elle impliquait, l'œuvre de Copernic allait avoir une autre portée.

Kepler (1571-1630)

Kepler substitue une dynamique céleste à la cinématique des cercles. Il rejette ainsi l'attitude purement formaliste et calculatoire de ses prédécesseurs. En plus du calcul de positions, il cherche à révéler la structure réelle de l'Univers. Par cette volonté de s'appuyer sur la réalité et non sur des constructions fictives, Kepler est amené à abandonner le dogme du mouvement circulaire. C'est grâce aux données extrêmement précises de Tycho Brahé que Kepler découvre les trois lois qui portent son nom.

Abandon du mouvement circulaire

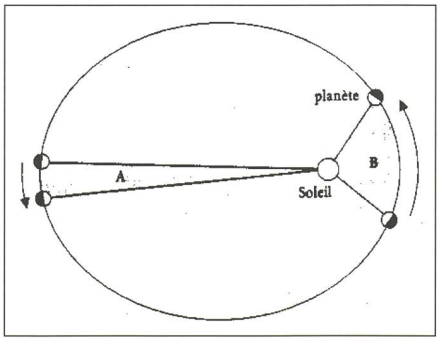
En premier lieu, Kepler abandonne les épicycles que Copernic utilise pour ajuster les trajectoires des planètes. En effet, le mouvement épicyclique est impossible à produire par des moyens purement naturels. Il faudrait à la planète une intelligence pour calculer et faire exécuter le mouvement. De plus, les distances entrant dans les calculs s'étendent entre des points de l'Univers marqués par rien, étant des points géométriques. Il est donc peu probable que les planètes possèdent un tel mouvement et Kepler préfère les équants.

Kepler travaille comme assistant auprès de Tycho Brahé. Celui-ci lui confie les calculs concernant Mars. C'est la seule planète dont l'excentrique est assez grande pour qu'elle apparaisse dans les données observationnelles et lui permettent de découvrir l'ellipticité des orbites.

Kepler commence à déterminer les paramètres de Mars, en utilisant la méthode de l'équant. Le résultat est déplorable. Il y a un écart de huit minutes d'arc entre le calcul et la position de la planète dans le ciel. C'est une erreur inférieure à la limite de l'astronomie antique, mais étant donné la précision des observations de Tycho Brahé, elle ne peut plus être négligée. Kepler est contraint d'abandonner la circularité de l'orbite de Mars. Il pense que c'est un ovale. Cependant, cette figure lui pose de grandes difficultés géométriques. Il décide de faire comme si la trajectoire était une ellipse parfaite. Il arrive ainsi à accorder les observations avec les calculs de positions. Kepler applique ensuite sa découverte aux autres planètes. Il formule sa première loi, selon laquelle les orbites des planètes sont des ellipses dont le Soleil occupe l'un des foyers.

Il élabore ensuite un nouveau calcul pour déterminer les équations des mouvements célestes se basant sur les aires. Il met au point sa deuxième loi. Connue sous le nom de «loi des aires», elle indique que les rayons vecteurs balaient des aires égales en des temps égaux.

Figure 19: deuxième loi de Kepler: les aires (A et B) balayées par le rayon vecteur de la planète pendant une même durée sont égales.



Dynamique

Selon la cosmologie traditionnelle, les planètes sont mues par des âmes. En revanche, la question de la cause du mouvement n'a aucun sens en astronomie mathématique. A l'époque de Kepler, la distinction entre les mondes sublunaire et supralunaire ne peut plus être maintenue. Il y a une unification des mondes céleste et terrestre. Kepler cherche alors une explication physique aux mouvements célestes.

Il remarque qu'une planète demeure sur un arc déterminé de sa trajectoire un temps d'autant plus long que cet arc est éloigné du Soleil. Si la planète possède une vitesse qui n'est pas constante, c'est que la force qui lui est appliquée n'est pas non plus constante. Or, ce phénomène dépend de la distance au Soleil. Kepler conclut que cette force vient du Soleil. Il tient cette force pour magnétique.

Selon cette théorie, la pesanteur n'est plus un attribut qui constitue le corps. Elle dépend de la grosseur de la planète, ou plus précisément de sa résistance au mouvement, et du Soleil. Le Soleil joue le rôle d'un aimant. Sa rotation provoque le mouvement de la planète, et cela permet de supprimer la notion de moteur planétaire. Kepler rejette le fait que les planètes aient aussi une force. Sinon, elles devraient provoquer un mouvement du Soleil.

Harmonie du Monde

Selon Kepler, le cosmos n'est pas le produit du hasard. C'est l'œuvre de Dieu et il doit avoir un plan architectural parfait. Kepler décide de chercher ses lois structurelles, qui, pour lui, ne peuvent être que mathématiques.

Il introduit dans son modèle des petites planètes invisibles, de manière à montrer des proportions dans les distances entre les planètes. Un problème se pose. En effet, l'espace est divisible à l'infini et Kepler ne peut trouver la bonne proportion à l'aide du calcul seul.

Puisqu'il a échoué numériquement, Kepler cherche une solution géométrique. Il associe les cinq espaces entre les planètes aux cinq corps réguliers dont parle Platon dans le *Timée*. Il calcule alors l'ordre dans lequel ils sont emboîtés. Le Monde doit être sphérique, car tous les corps réguliers sont inscriptibles dans la sphère. Le résultat de ce modèle n'est qu'approximatif. Kepler doit par ailleurs attribuer une épaisseur aux sphères qui se trouvent entre les corps géométriques, et où se trouvent les planètes, pour tenir compte des trajectoires.

Etant donné que les rapports géométriques ne sont pas satisfaisants, Kepler détermine les distances grâce aux rapports harmoniques de Pythagore. C'est ainsi qu'il découvre sa troisième loi, à savoir que le carré de la période de révolution divisé par le cube de la distance de la planète au Soleil est une constante.

Galilée (1564-1642)

Adversaire du système de Ptolémée, Galilée l'est aussi de celui de Tycho Brahé, qui lui paraît être un compromis odieux. Ce système qui ne représente pas une rupture majeure, puisqu'il admet l'immobilité de la Terre, est pourtant celui que l'Eglise juge conforme au dogme et choisit à la suite des observations de Galilée. Galilée ignore également les travaux de Kepler, auquel il reproche son mysticisme. L'héliocentrisme défendu par le savant pisan est une version où les trajectoires restent circulaires

Aspect scientifique de l'œuvre
Mouvement

Galilée reconnaît l'importance primordiale du problème du mouvement dans toute étude des phénomènes naturels. Au double mouvement vers le bas et vers le haut d'Aristote, Galilée en substitue un seul, vers le bas. Si les corps montent, c'est que le milieu dans lequel ils se trouvent possède une masse volumique plus importante et les pousse vers le haut suivant le principe d'Archimède.

Tout mouvement apparent est une combinaison du propre mouvement de l'objet et de celui de la Terre. Un corps en chute libre participe au mouvement de la Terre. De même, une pierre jetée du haut d'un mât participe au mouvement du bateau. Comme son mouvement est une combinaison de celui du bateau et de la chute, elle atterrit au pied du mât et non en arrière comme le pense les aristotéliciens. Si nous ne nous apercevons pas du mouvement de la Terre, c'est que nous y participons aussi.

Galilée ne formule pas explicitement le principe d'inertie mais sa mécanique en est imprégnée. Un corps reste dans un état de repos ou de mouvement aussi longtemps qu'il n'est pas soumis à une force quelconque. Cela est vrai pour le mouvement des planètes qui se meuvent ainsi en cercles.

Astronomie d'observation

Galilée n'est pas l'inventeur de la lunette, mais c'est lui qui l'introduit dans le domaine scientifique en étant le premier à la tourner vers le ciel. Ce qu'il observe est en contradiction avec la tradition, mais concorde avec le système de Copernic. Ces observations sont consignées dans le *Sidereus Nuncius*, paru en 1610.

La Lune lui apparaît comme montagneuse, presque semblable à la Terre. A l'aide des ombres projetées par la lumière du Soleil, il mesure la hauteur de ces monts. Cette observation s'oppose à la perfection du ciel. En effet, les corps célestes sont, selon la tradition, parfaitement sphériques et ne souffrent aucune régularité.

Il se rend compte que la lumière blanchâtre que l'on observe sur la partie qui n'est pas éclairée par le Soleil n'a pas sa source dans la Lune elle-même, mais possède une origine terrestre. La Lune ne produit donc pas de lumière, perdant ainsi son statut de luminaire, mais reflète celle qu'elle reçoit directement du Soleil et indirectement par la réflexion de la Terre. Cette dernière possède par-là la même caractéristique que certains corps célestes, ce qui est impensable dans le cadre de la physique aristotélicienne.

Quand il dirige sa lunette vers la Voie Lactée, il découvre qu'elle est constituée de petites étoiles que l'on ne peut distinguer à l'œil nu. Cette découverte introduit la problématique de l'imperfection de nos sens.

Le Soleil présente des taches. Celles-ci sont connues depuis l'Antiquité, mais Galilée prouve qu'elles se trouvent à la surface du Soleil. En observant leur déplacement, il mesure alors la rotation du Soleil. Ceci représente un double affront à la théorie traditionnelle. Il affirme que des irrégularités se produisent à la surface du Soleil, mais aussi que celui-ci tourne sur lui-même, offrant alors la même possibilité à la Terre.

Alors qu'il observe Jupiter, il découvre quatre planètes en rotation autour de ce corps. Le Soleil et la Terre ne sont donc pas les seuls centres de mouvements célestes. Il se rend compte que Vénus présente des phases comme la Lune. Ceci est géométriquement impossible dans le système de Ptolémée. En revanche, comme toutes les observations de Galilée, l'interprétation en est plus simple avec l'héliocentrisme, mais ne représente aucunement une preuve décisive, car elle est tout à fait compatible avec le système de Tycho Brahé.

Dialogue sur les deux grands systèmes du Monde

Le pape autorise l'impression du dialogue à condition qu'il ne prenne pas parti pour Copernic. Effectivement, le texte prend la forme d'un dialogue où divers points de vues sont présentés. Dans le préambule, Galilée explique qu'il veut montrer que les savants italiens ne sont pas plus ignorants que les autres et que la condamnation romaine a été faite en pleine connaissance de cause. Pourtant, en 1633, Galilée est condamné par le Saint-Office pour le contenu de ce même dialogue.

But du dialogue

Galilée veut répandre le système de Copernic qu'il considère comme représentatif de la réalité et trop peu connu. Il veut également imposer les caractéristiques de la recherche scientifique comme moyen de connaissance. Pour mener à bien son programme, celui-ci a besoin de l'appui d'une puissance importante. Pour l'obtenir de l'Eglise, Galilée cherche un accord entre le copernicanisme et les dogmes. Galilée ne veut pas de compromis de la part de la science, qui pour lui est un moyen de connaissance fiable, mais ne peut pas non plus corriger les dogmes au risque de perdre l'appui de l'Eglise. Il admet alors l'existence de deux langages, mais d'une vérité unique. Les Ecritures doivent pouvoir être comprises de tous. Elles emploient le langage ordinaire, constitué d'images que l'on ne doit pas considérer comme réelles, mais interpréter. Le langage scientifique est utilisé par Dieu quand il écrit le livre de la nature, mais ne s'adresse pas particulièrement aux hommes. Les vérités scientifiques sont incontestables et prouvées par des faits vérifiables. Cette idée est en accord avec les vues de saint Augustin, et a été utilisée par saint Thomas d'Aquin pour accorder le géocentrisme à la doctrine catholique. Cependant, elle est contraire à la doctrine post-tridentine.

Composition

Le dialogue s'adresse à l'honnête homme, non latiniste, et est écrit en italien. C'est un exposé clair qui doit persuader le lecteur, éliminer un à un tous ses doutes envers l'héliocentrisme.

La forme dialoguée permet d'introduire les arguments les plus divers, de ne pas prendre les affirmations personnellement à son compte, et rend également l'écrit plus vivant, plus agréable à lire.

Les interlocuteurs sont au nombre de trois, Salviati, copernicien, Sagredo, jeune homme curieux, et Simplicio, aristotélicien. La dialogue se déroule à Venise et les personnages décident de discuter de l'héliocentrisme, en présentant les arguments qui lui sont en faveur et en défaveur.

La première journée traite de l'organisation générale de l'Univers, la deuxième du mouvement diurne de la

Terre, la troisième de la révolution de la Terre autour du Soleil et la dernière de la théorie des marées, considérée par Galilée comme la preuve physique de l'héliocentrisme.

Contenu

Le Dialogue est un ouvrage plein de détails et d'arguments pour convaincre le lecteur. Nous ne présenterons dans ce travail que ce qu'écrit Galilée à propos du mouvement de la Terre.

Galilée traite de la position de la Terre sur le plan physique. Il dénonce la confusion faite par l'aristotélisme entre le centre de la Terre, vers lequel sont attirés les graves, et le centre de l'Univers. Il trouve arbitraire de considérer la masse volumique de la Terre comme plus élevée que celle des astres. Suivant le raisonnement aristotélicien, l'inaltérable devrait être plus dense, car plutôt semblable à l'or. D'un point de vue mécanique, Galilée montre l'impossibilité de décider à partir d'objet si le référentiel est en mouvement. Explicitée grâce à l'expérience de passagers dans la cabine d'un navire, cette idée est appliquée à la Terre.

Méthode

Instrumentalisation

La science se base sur des observations, et donc sur nos sensations. Les instruments ont pour fonction de rendre nos sens aussi efficaces que possible. Selon Galilée, notre organe de vision n'est pas en soi un critère absolu pour attester de l'existence des phénomènes. Ainsi, on découvre à la lunette des objets que l'on ne peut apercevoir à l'œil nu. Pour Galilée, la lunette ne déforme pas les objets, comme le prétendent certains aristotéliciens pour discréditer les observations, mais augmente notre capacité de perception. Cependant, admettre que la lunette rend notre perception plus efficace sous-entend que nos sens ne sont pas parfaits et qu'ils sont perfectibles. Les aristotéliciens s'opposent à cela, car, pour eux, seule la vision directe permet d'appréhender le réel.

Les observations de Galilée ne peuvent être vérifiées grâce à une version directe des phénomènes. De plus, il ne possède pas les bases théoriques adéquates pour comprendre l'optique mise en œuvre dans la lunette. Sa certitude ne peut être appuyée que sur l'expérience répétée que les observations terrestres à l'œil nu et à la lunette concordent.

Pour les aristotéliciens, la Lune ne peut *a priori* pas avoir de montagnes, car étant un corps céleste elle doit être une sphère parfaite. Selon Galilée, la perfection dépend du moyen d'investigation. Les corps célestes peuvent paraître parfaits à l'œil nu et ne pas l'être dans un instrument. Les aristotéliciens ne peuvent accepter cette interprétation et proposent qu'une sphère cristalline invisible enveloppe la Lune. Galilée répond que cette proposition est irréfutable mais également indémontrable, sortant ainsi du domaine scientifique.

Mathématisation et expérimentation

La science nécessite un type de discours qui ne puisse pas avoir de déformation de sens. Galilée introduit pour cette raison l'utilisation des mathématiques en tant qu'instrument pour connaître la nature. Les mathématiques garantissent la cohérence du discours de par leur précision et en rendant visible les liens logiques de l'argumentation. Galilée n'est de loin pas le premier à faire usage des mathématiques en astronomie. A la suite de Platon, l'astronomie est basée sur les mathématiques. Cependant, les deux utilisations de cette science sont opposées. Si les observations physiques servent à orienter les recherches mathématiques d'un astronome comme Eudoxe, les mathématiques sont au contraire entièrement au service de la physique telle que la pratique Galilée.

Galilée effectue une réduction systématique des propriétés physiques à une règle descriptive, qui soit commune aux phénomènes du même genre, et reproductible au-delà de l'événement singulier. Cela dit, ces lois s'appliquent dans des conditions idéales, impossibles à obtenir par expérimentation. De plus, la formulation mathématique nécessite des concepts théoriques qui ne peuvent pas être directement vérifiés dans les faits. Pour les vérifier, il faut examiner la correspondance entre les théorèmes que l'on peut en déduire et les phénomènes naturels observables.

Une démonstration mathématique ne peut à elle seule garantir la vérité de fait. Elle permet de mettre en lumière les liens logiques entre plusieurs propriétés et de saisir les principes généraux impliqués. L'expérience doit être préférée au raisonnement. Si une théorie est en désaccord avec les observations, on est assuré de sa fausseté. Cela ne veut pas dire pour autant qu'il faille abandonner la théorie, mais qu'il faut l'examiner à nouveau pour trouver l'erreur. L'expérimentation est facilement mise en œuvre en physique, discipline à laquelle Galilée a grandement contribué. En revanche, l'astronomie est une science d'observation. En raison de l'ampleur et de l'éloignement des objets étudiés, il n'y a pas d'expériences possibles. La mathématisation permet néanmoins de savoir précisément ce que l'on doit observer. C'est alors l'observation effective qui permet de tester la théorie. De plus, alors que les mondes supralunaire et sublunaires sont unifiés en une seule physique, toute expérience faite à la surface de la Terre doit être en accord avec ce que l'on observe dans le ciel. Ainsi, on a indirectement un moyen d'expérimenter pour vérifier les théories astronomiques.

Selon Galilée, il ne faut jamais se contenter d'anciennes explications, mais en chercher continuellement des nouvelles. Aristote peut s'être trompé. Pour rester fidèle à sa méthode, qui se base sur les sensations, il faut rejeter sa théorie. Par exemple, à la suite de l'observation de la nova, le ciel ne peut plus être tenu pour immuable. Le recours à l'expérience va néanmoins plus loin chez Galilée que chez Aristote. Elle est accompagnée d'un appel à la logique, mais aussi aux mathématiques, dans la formulation des lois, ainsi que pour améliorer la précision des mesures et les dispositifs techniques.

La science est pour Galilée une ouverture perpétuelle. Une théorie est une étape vers une connaissance jamais achevée de la nature. Il convient de relever ici que Ptolémée affirmait déjà l'impossibilité d'une adéquation totale et définitive d'un modèle avec la réalité. Cependant, Galilée considère la connaissance comme un but vers lequel on tend, alors que l'inadéquation des modèles conduisait Ptolémée à nier la réalité physique de ceux-ci et à ne les considérer que comme une fiction mathématique.

4. Conclusion

Les civilisations fluviales font les premières observations, qui permettent par la suite l'organisation en systèmes d'explications rationnels. L'élaboration de systèmes cosmologiques complets nécessite le développement de l'argumentation et d'une physique. L'astronomie mathématique tente de rendre compte des observations. Petit à petit le modèle géocentrique se met en place. De par ses problèmes récurrents il prépare la révolution qui va suivre, en astronomie, mais aussi dans la méthode scientifique en général. A force de toujours buter contre les mêmes obstacles, une nouvelle solution est proposée. Il se développe de nouveaux arguments, de nouveaux outils et une nouvelle méthode qui vont permettre de les surmonter.

Ainsi, l'évolution des modèles à travers l'histoire de l'astronomie concerne les aspects techniques de ceux-ci, mais également la méthode mise en œuvre

lors de leur conception. Un modèle ne peut véritablement changer sans un changement dans la méthode, dans la façon de concevoir le rapport de la science avec la réalité.

Jusqu'à Galilée, l'astronomie est basée sur l'observation de ce qui nous apparaît depuis la Terre, avec une prise de conscience depuis Platon que ce que l'on voit n'est pas forcément ce qui est. Malgré cette prise de conscience, le maintien d'une méthode strictement observationelle n'apporte pas de véritable changement dans les résultats scientifiques en terme de théories. Les dogmes anciens sont maintenus, car non concurrencés. Galilée développe une nouvelle méthode, où le scientifique doit savoir questionner la nature. Il applique lui-même ses conceptions mécaniques du mouvement, développées sur Terre, à la mécanique céleste. La théorie précède l'expérimentation, puis l'on en tire des conséquences. L'expérimentation ainsi que la prédiction interviennent alors, permettant de confirmer ou infirmer la théorie.

Après Galilée débute ce que l'on nomme la «science moderne». De par sa nouvelle méthode, celle-ci ne permet plus de conserver un ensemble de dogmes contraire à l'observation. Ce n'est plus l'observation qui est interprétée en fonction d'un modèle, mais le modèle développé en fonction de l'observation. Les modèles qui ne correspondent pas aux observations doivent être abandonnés.

Cet abandon des théories pose le problème de leur véracité. Un modèle ne peut correspondre exactement à la réalité. Les simplifications qu'il opère peuvent comporter un élément important dans la compréhension de l'enchaînement des phénomènes. De plus, un modèle décrit les liens entre les observations effectuées. Cependant, ces liens ne peuvent pas être observés directement lors de l'expérimentation, mais inférés. En suivant la méthode expérimentale, il faut alors examiner tous les cas pour être certain d'un modèle, ce qui est impossible à mettre en œuvre. Efficace pour dénoncer la fausseté d'une théorie, cette méthode se révèle être insuffisante pour assurer la vérité d'un modèle.

CORALIE BEFFA
46, rue Montchoisy, CH-1207 Genève
coralie.beffa@gmx.ch

Bibliographie

CELNIKIER, *Histoire de l'astronomie*, Paris, Lavoisier, «Petite collection d'histoire des sciences», 1996
CHAREIX, FABIEN, *La révolution galiléenne*, Paris, Ellipses, «Philo», 2001
CHAREIX, FABIEN, *Le mythe Galilée*, Paris, PUF, «Science, histoire et société», 2002
COTARDIÈRE, PHILIPPE DE LA, *Dictionnaire de l'astronomie*, Paris, Larousse, «Références Larousse», 1996
CUENOD, MARTIN, DUVERNEY, CLAUDE, *Matériaux d'histoire et de philosophie des sciences*, Genève, 2001
DUHEM, PIERRE, *Le système du monde*, Paris, Hermann, 1958-1979
FONTAINE, SIMAAN, *L'image du monde des Babyloniens à Newton*, Paris, Adapt, 1999
FRÉREUX, DE GANDT, «préface» à Galileo Galilei, *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, Paris, Seuil, «points sciences», 2001
GAPAILLARD, *Et pourtant, elle tourne !*, Paris, Seuil, «Science ouverte», 1993
GEYMONAT, LUDOVICO, *Galilée*, Paris, Seuil, «Points sciences», 1992
HAEFLIGER, NICOLE, *Forme sphérique et mouvements*, Fribourg, 2000
KOESTLER, ARTHUR, *Les Somnambules*, Paris, Calman-Lévy, 1960
KOYRÉ, ALEXANDRE, *Etudes d'histoire de la pensée scientifique*, Paris, Gallimard, «Tel», 1998
KOYRÉ, ALEXANDRE, *La révolution astronomique*, Paris, Hermann, «Histoire de la pensée», 1973
KUHN, THOMAS S., *La révolution copernicienne*, Paris, Fayard, «Le phénomène scientifique», 1973
LONCHAMP, *Science et croyances*, Paris, Desclée de Brouwer, «Petite encyclopédie moderne du christianisme», 1992
SOLER, LÉNA, *Introduction à l'épistémologie*, Paris, Ellipses, «Philo», 2000
Encyclopedie of Philosophy, ouvrage collectif, Londres, Routledge, 1998
Histoire générale des sciences, ouvrage collectif, Paris, PUF, 1961-1979
Le Petit Robert, ouvrage collectif, Paris, 1989

Illustrations

CHAREIX, FABIEN, *Le mythe Galilée*, Paris, PUF, «science, histoire et société», 2002, p. 15, pp. 22-23
CUENOD, MARTIN, DUVERNEY, CLAUDE, *Matériaux d'histoire et de philosophie des sciences*, Genève, 2001, p. 478
Du Scribe au Savant, ouvrage collectif, Paris, PUF, 2000, p.30, p. 63, p. 65, p. 69, p.221, p.230, p. 246

Glossaire

Apogée: point de l'orbite d'un corps où celui-ci se trouve à la distance la plus importante par rapport à la Terre.

Cinématique: partie de la physique qui étudie les mouvements des corps.

Comète: astre composé d'un petit noyau de glace, décrivant une orbite souvent elliptique autour du Soleil. Au voisinage de celui-ci se forment une queue de gaz et une autre de poussière dans la direction opposée au Soleil.

Dynamique: partie de la physique qui étudie les forces mises en jeu lors des interactions entre les corps.

Eclipses
Eclipse de Lune: passage de la Lune dans l'ombre de la Terre.
Eclipse de Soleil: passage de la Lune devant le Soleil, provoquant l'occultation du disque.

Ecliptique: trajectoire apparente du Soleil sur le fond du ciel durant une année.

Equateur
Equateur céleste: projection de l'équateur terrestre sur le fond du ciel.
Equateur terrestre: cercle imaginaire, perpendiculaire à l'axe de rotation de la Terre. Il permet de définir les coordonnées à la surface de la Terre.

Nova: Etoile qui présente une brusque augmentation d'éclat pour une période de quelques heures à quelques jours, puis reprend petit à petit son éclat initial. Ce phénomène est dû à l'explosion des couches extérieures de l'étoile.

Parallaxes: déplacement de la position apparente d'un corps en raison du changement de position de l'observateur.

Périgée: point de l'orbite d'un corps où celui-ci se trouve à la distance la plus courte par rapport à la Terre.

Période de révolution: temps requis par un corps pour accomplir une orbite complète.

Rétrogradation: Phase du mouvement d'une planète durant laquelle celle-ci semble repartir en sens inverse avant de reprendre son mouvement régulier le long de l'écliptique.

Zodiaque: région de la sphère céleste qui s'étend de par et d'autre de l'écliptique.