

C2. L'empirisme hypothético-déductif – La mécanique céleste de Copernic à Newton

I. L'empirisme hypothético-déductif

On sait maintenant comment on fait des théories – du moins, à quoi elles ressemblent. Mais qu'est-ce qui les justifie ? Qu'est-ce qui doit nous faire adopter une théorie plutôt que l'autre ?

Les systèmes axiomatiques sont déductifs.

Les théories scientifiques sont des systèmes axiomatiques. Dans un système axiomatique, les théorèmes sont *déduits* des axiomes. La déduction a ici un sens logique, qui est très fort : il n'est pas *possible* que les théorèmes soient faux, si les axiomes sont vrais. A opposer au sens faible de « déduire » qu'on utilise souvent en philosophie : 'Descartes a *déduit* sa théorie de l'interaction entre l'âme et le corps de sa théorie des deux substances' ; en fait, on pourrait accepter la seconde théorie sans accepter la première, en ce sens, la théorie de l'interaction n'est pas déductible de la théorie des deux substances.

En pratique : en fait, les théories concrètes, même bien formulées (Euclide) ne sont pas parfaitement déductives, on doit les compléter en précisant quelques axiomes, pour qu'elles deviennent vraiment des systèmes déductifs. On fait donc une *idéalisation*, en faisant comme si la théorie avait été complétée. La différence entre 'déduire' chez Euclide et 'déduire' chez un philosophe est donc plutôt que 1) chez Euclide, il manque peu d'axiomes pour compléter le système, alors qu'il en manque bcp chez les philosophes ; 2) chez Euclide, on peut assez facilement se mettre d'accord sur les axiomes à ajouter, alors que c'est bcp plus difficile chez les philosophes.

En résumé : *dans les systèmes axiomatiques, si on accepte les axiomes, on doit accepter les théorèmes.*

Comment justifier les théorèmes ? Conception empiriste et conception métaphysique de la science

Une chose est sûre, avec les systèmes axiomatiques, c'est (en supposant que je connaisse le système) :

si je connais les prémisses, je connais la conclusion.

(*Note* : cela n'implique pas : *je ne connais la conclusion que si je connais les prémisses*. Je vous laisse voir le rapport entre cette remarque et ce qui suit.)

Conception métaphysique

D'où l'idée suivante, assez naturelle :

Une théorie scientifique est justifiée si on sait que ses axiomes sont vrais.

Je l'appellerai « conception métaphysique de la justification scientifique ». (Je l'appelle ainsi parce qu'elle remonte à Aristote, qu'elle a un rapport (complexe en fait, cf. plus bas) avec sa *Métaphysique*, et surtout avec la notion de métaphysique chez Descartes.) On peut la décrire comme « justification par en haut ».

On trouve cette doctrine dans les *Seconds analytiques* d'Aristote :

Si la science est telle que nous l'avons posé, il est nécessaire que la science démonstrative parte de choses qui sont vraies, premières, immédiates, plus connues que la conclusion, antérieures à elles et qui en sont causes. (71b 19-22)

La notion de « choses plus connues » doit être expliquée. Aristote distingue deux sens de « être connu en premier/avant » : temporel et épistémique. Il y a ce qui est connu en premier, parce que c'est ce qu'on connaît en premier dans le temps, et ce qui est connu en premier, parce que c'est mieux connu (plus évident ou certain). Pour Aristote, les axiomes ne sont pas les premières choses qu'on découvre – les premières choses qu'on découvre, ce sont les perceptions – mais ce sont les choses les mieux connues. Aristote ne dit donc pas qu'on découvre d'abord les axiomes, puis les théorèmes ; mais il dit que les axiomes doivent être « mieux connus » que les théorèmes.

Pour qu'une théorie soit scientifique, il faut donc deux connaissances :

- 1) la connaissance du système axiomatique. (le système lui-même se résume à : *si A, alors T*, où A est la conjonction des axiomes, et T la conjonction des théorèmes)
- 2) la connaissance de la vérité des axiomes. (c'est-à-dire: A)

Cela permet de connaître tout ce que la théorie affirme (à savoir A et T).

On retrouve les mêmes idées dans les *Règles pour la direction de l'esprit* de Descartes. La science repose sur l'intuition (=2) et la déduction (=1).

Application à Euclide, et à la mécanique.

- Cette conception a longtemps été appliquée aux mathématiques d'Euclide. Les mathématiciens pensaient que les axiomes d'Euclide étaient vrais, et que nous les connaissions avec certitude. (Comme le 5^e paraissait moins évident que les autres, on a essayé de le démontrer à partir des autres, mais ça n'a pas marché.) L'apparition de géométries non-euclidiennes a bousculé cette façon de voir les mathématiques.
- On peut l'appliquer à la mécanique aussi. L'idée serait que les lois du mouvement sont connues par évidence, et on en déduit le reste. C'est la façon dont Descartes présente sa mécanique dans *Les Principia (Principes de philosophie)*, ouvrage que Descartes a rédigé vers la fin de sa vie, qu'il a conçu comme un manuel exposant sa philosophie).

Le problème du mode de connaissance des principes

La conception métaphysique soulève tout de suite une difficulté : mais comment connaît-on les axiomes ? Il pourrait y avoir une science qui montre que les axiomes sont vrais. (Dans cette science, les axiomes de notre théorie sont des théorèmes.) Mais elle-même aura des axiomes. Où s'arrête-t-on ?

La réponse habituelle (Aristote, Descartes) est de dire qu'on a une *intuition intellectuelle* de la vérité des premiers principes.

On pourrait voir les choses de la façon suivante. Dans la conception Aristote-Descartes, il y a toujours une métaphysique avec la physique : la métaphysique est la connaissance des premiers principes, et la physique est la description du monde à partir de ceux-ci. Dans la pratique, c'est un peu différent : la *Métaphysique* d'Aristote est elle-même une théorie, qui a ses premiers principes et ses théorèmes ; il y aurait donc une science des premiers principes qui est une sous-partie de la Métaphysique (pourtant, Aristote semble considérer tout le livre

comme la « science des premiers principes ») ; en outre, les premiers principes des sciences particulières (mathématiques, physique, biologie) ne semble pas être des théorèmes de la métaphysique. Chez Descartes, cela correspond plus au modèle : les pps de la physique sont bien des théorèmes de la métaphysique ; néanmoins, là aussi, la « métaphysique » recouvre plus que les premiers principes.

Voir Wagner (2002), chap. 11, p.603-613, sur Aristote.

La conception empiriste.

Avant même de soulever des questions sur la connaissance des premiers principes, on peut faire une objection à la conception métaphysique. A savoir : *qui a dit qu'on devait connaître les axiomes en premier ?* (Et surtout, qui a dit qu'on devait connaître les axiomes indépendamment de leurs conséquences ?) Imaginons qu'au contraire, on puisse confirmer les théorèmes. On pourra dire : « tout se passe comme si les axiomes étaient vrais ». On fait une supposition (les axiomes) ; de cette supposition, on déduit des conséquences (les théorèmes) ; on confirme ces conséquences (test par expérience) ; cela suggère que la supposition de départ était vraie. En résumé :

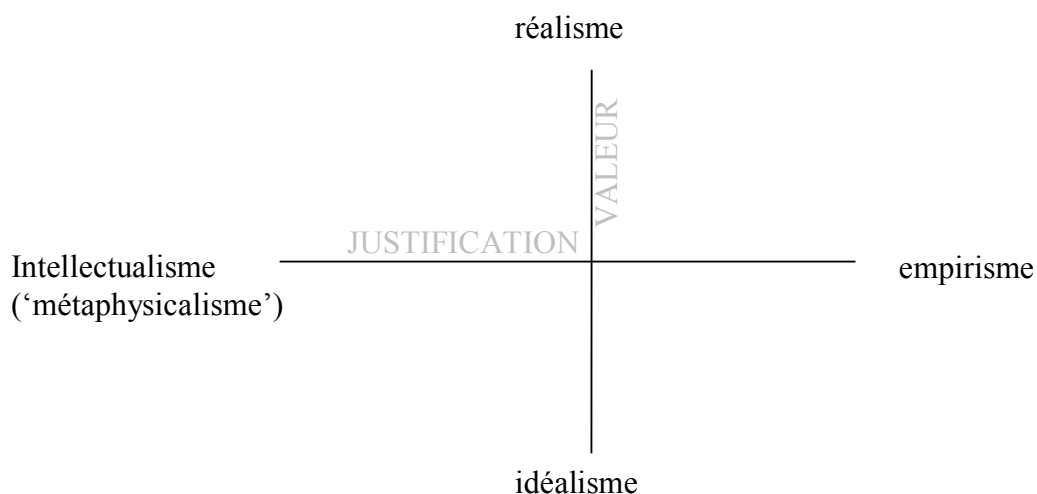
Une théorie scientifique est justifiée si on sait que ses théorèmes sont vrais.

J'appellerai cela la « conception empiriste de la justification ». C'est l'idée d'une « justification par en bas ». En général, les théorèmes sont confirmés par des choses qui sont de l'ordre de la perception ou de l'expérience ; comme « empiria » signifie expérience, on appelle cette conception « empiriste ». Comme on le verra, sa formulation doit être qualifiée. Mais elle conservera son aspect *anti-métaphysique* suivant :

On ne connaît pas la vérité des axiomes indépendamment de la vérité des théorèmes.

On appelle cela la méthode *hypothético-déductive* : un savant fait des hypothèses (axiomes), en déduit des conséquences (théorèmes), teste ces conséquences (expérience) et cela confirme son hypothèse.

Dans cette partie du cours, on va voir comment on peut défendre la conception empiriste (et la raffiner) à partir d'exemples de l'histoire des sciences. Le schéma suivant est utile pour comprendre la structure des problèmes du cours (d'après Granger, 2000) :



Toutes les combinaisons de positions sont possibles. Voir le tableau ci-dessous:

		Justification	
		Empirisme	Intellectualisme
Valeur	Réalisme	Locke	Descartes
	Idéalisme	Berkeley	Kant

Néanmoins, aujourd'hui, les philosophes sont plutôt partagés en trois camps: empiriste+réaliste, empiriste+idéaliste, et intellectualiste+idéaliste.

Remarque. Aristote n'est-il pas un empiriste ? Il est empiriste au sens psychologique : toutes les idées viennent de la perception (à la naissance, l'âme est une « table rase »). Mais il pense que dans la perception nous saisissons les premiers principes.

Remarque. Conception métaphysique = fondationnaliste ? Non. Le fondationnalisme en théorie de la justification, c'est l'idée que : il y a une sous-classe de nos croyances (le fondements) qui justifie toutes les autres, sans être justifiée par les autres. Telles qu'elles sont présentées ci-dessus, les deux conceptions sont fondationnalistes. La différence est que pour la conception métaphysique, les fondements sont la connaissance les premiers principes ; alors que pour la conception empiristes, les fondements sont l'expérience des conséquences.

Remarque. Je vous laisse faire l'analogie du raisonnement (1) (2) pour l'empirisme. Voyez-vous le sophisme ? Qu'est-ce qui cloche ? Voir aussi la notion de raisonnement abductif (C.S. Peirce).

II La mécanique céleste des Grecs à Newton

La légende de Christophe Colomb. Une légende tenace veut que Christophe Colomb se soit heurté à l'hostilité de ses contemporains à propos de son voyage parce qu'ils pensaient que la Terre était plate, et qu'il tomberait au bout du monde. Cette légende a été inventé par un romancier américain du début du XIX^e siècle, Washington Irving. En fait, Christophe Colomb s'est heurté à l'hostilité de ses contemporains, parce que ses contemporains savaient non seulement que la Terre est ronde, mais que le Japon était beaucoup trop loin pour être atteint par là! Colomb avait refaits les calculs de la taille de la Terre, et l'avait trouvé beaucoup plus petite qu'elle n'est en réalité. Il aurait dû périr en mer, mais, par chance, un continent inconnu des européens était sur sa route. En fait, on connaissait le périmètre de la Terre avec une assez bonne précision depuis le III^e siècle avant JC.

Quatre étapes à retenir:

Aristote, *Du ciel*, IV^e av. JC,

Ptolémée, *Almageste*, II^e ap. JC,

Copernic, *Des révolutions des orbés célestes*, 1543

Képler, *Astronomia nova*, 1609

L'astronomie de Ptolémée

Le monde archaïque

Les Egyptiens, les Babyloniens, et les Grecs pensaient que le monde était plat, entouré d'un fleuve (Océan chez les Grecs), et recouvert d'une voûte. Les étoiles étaient conçues comme des points brillants accrochés à la voûte; le Soleil avait une taille réduite. Fragment 3 d'Héraclite: « [le soleil] sa largeur est d'un pied » (interprétation délicate). Selon certaines

croyances, le Soleil était nouveau chaque jour. Selon d'autres croyances (grecques), il faisait le tour du fleuve Océan pendant la nuit, pour revenir à sa position initiale.

Le monde des Grecs recouvrait environ: l'Europe du Nord, la mer Caspienne, l'Inde, la péninsule arabique, la mer rouge, l'Afrique saharienne. Plus on s'éloignait de la Méditerranée, moins les formes étaient connues. [Cf. Illustration dans les documents]

Ce qu'on voit dans le ciel

L'observation du ciel est importante pour l'agriculture. Dès Babylone, l'astronomie et l'astrologie sont liées: prédire le retour du printemps, prédire les éclipses (qui sont supposées néfastes), prédire le bon moment pour entreprendre une guerre. Ce qu'on voit dans le ciel (depuis la Grèce):

- Le Soleil parcourt le ciel d'est en ouest chaque jour. Son trajet, et la durée du jour, changent tout au long de l'année.
Remarques: Les Egyptiens et Babyloniens utilisaient un bâton planté verticalement, le gnomon. On note l'ombre au cours de la journée. La plus courte est chaque jour dans la même direction: c'est le nord. Autrement dit, le soleil atteint son point le plus haut toujours dans la même direction, le sud.
(remarque: « haut » ici signifie l'angle au-dessus de l'horizon. Soit H un point à l'horizon, à la verticale du soleil (S), et O l'observateur: c'est l'angle HOS.)
(réflexion: pourquoi est-ce toujours exactement au Sud que le soleil est le plus haut?)
Détails: aux équinoxes (mars/septembre), il se lève exactement à l'est, se couche exactement à l'ouest. L'hiver, il se lève et se couche un peu plus au sud (et y reste toute la journée). L'été, il se lève et se couche un peu plus au nord, passe au sud à midi, et se couche. Les maximums de ces mouvements sont les solstices. [SCHEMA]
(remarque: en-dessous du tropique, le soleil passe au nord pendant l'été, et juste avant et après, il passe exactement à la verticale – le bâton ne projette pas d'ombre.)
- La Lune se lève et se couche chaque nuit, elle aussi d'est en ouest.
- *Les étoiles.* On les appelle « fixes » parce qu'elles ne bougent pas relativement les unes aux autres. Mais elles font un tour chaque jour. Tout le ciel tourne autour de l'étoile polaire, qui se trouve au nord.
(Les étoiles autour de l'étoile polaire font un demi-tour complet pendant la nuit; les autres, à l'est, se lèvent ou se couchent.)
(réflexion: l'étoile immobile est au Nord. Sachant ce qui donne l'impression que les étoiles tournent, trouvez pourquoi.)
(réflexion: à Paris, l'étoile polaire apparaît à environ 45° au-dessus de l'horizon – si vous faites un triangle de l'étoile, à l'observateur, et de l'observateur, à l'horizon, l'angle qui se situe à l'observateur fait 45°. Quel est l'angle à l'équateur? Au pôle nord? Vous avez compris la signification de la latitude, et vous savez comment vous situer sur la direction nord-sud...)
- les Anciens ont vite compris que les étoiles étaient toujours là pendant le jour, cachées par la lumière du soleil. En effet, on les retrouve la nuit à l'endroit où elles seraient si elles avaient continué leur trajet circulaire à la même vitesse. [SCHEMA]. Du coup, on peut placer le soleil dans le ciel des étoiles.
- *Position du soleil dans le ciel étoilé.* Le soleil tourne chaque jour avec les 1) Il tourne chaque jour avec les étoiles, mais 2) pas tout à fait: il prend un peu de retard chaque jour –

les étoiles font le tour en 23h56min, le soleil en 24h. Il décrit un cercle annuel. On appelle ce cercle *l'écliptique*.

- *Mouvement annuel des étoiles fixes*: inversement, le ciel étoilé prend de l'avance sur le soleil: chaque jour, il est un peu plus à l'ouest que la veille à la même heure.
- *Résumé sur le soleil*, le soleil se déplace tous les jours vers l'ouest avec les étoiles, simultanément, il se déplace lentement vers l'est, sur l'écliptique, relativement aux étoiles. C'est comme le déplacement d'un homme sur un manège: il tourne avec le manège, mais en même temps va de cheval en cheval sur le manège.

Mouvement des astres errants. Les astres errants visibles à l'oeil nu: Mercure, Venus, Mars, Jupiter, Saturne. Les astres errants sont tous sur l'écliptique. Ils bougent chaque jour avec le reste du ciel. Et ils bougent par rapport au ciel, comme le soleil.

Certains font le tour plus vite que le soleil: Mercure, Venus. D'autres moins vite: Mars, Jupiter, Saturne.

(*réflexion*: pourquoi tout bouge chaque jour avec les étoiles?)

(*réflexion*: en fait, toutes les orbites des planètes autour du soleil sont sur un même plan. Cela explique que les astres errants soient tous sur l'écliptique.)

Remarque: les constellations sur l'écliptique sont la Balance, la Vierge, le Lion, les Gémeaux, etc. En fait, le zodiaque est constitué des constellations sur lesquelles passent l'écliptique. On divise ainsi l'écliptique en 12 zones, dans lesquelles les étoiles se promènent. Vous comprenez maintenant le jargon des astrologues: « Mars est dans les Gémeaux ».

- Les astres errants ont des **mouvements rétrogrades** sur l'écliptique. Ils vont globalement vers l'est, mais ils peuvent accélérer ou ralentir, et même parfois revenir un peu en arrière.
- *La Lune*. Elle tourne quotidiennement avec le reste du ciel. Elle se déplace aussi dans le ciel, tantôt d'un côté de l'écliptique, tantôt de l'autre. Son déplacement dans le ciel est plus rapide que celui des autres astres: 1 tour en 27 jours environ.

L'astronomie jusqu'à Aristote

- *Thalès et la Ionie (Asie mineure), VI^e s.*

Thalès : monde plat archaïque, repose sur l'eau. (ordre vertical d'éléments: eau, terre, air, feu).

Anaximandre: Terre est un cylindre. Hauteur = 1/3 Largeur, comme une pierre de colonne grecque. Elle est au *centre du monde*, ce qui résout le problème du support (elle n'a besoin de rien pour la soutenir parce qu'il n'y a pas d'endroit où aller). Le Soleil (et la Lune!) sont plus gros que la Terre. Le Soleil et les autres astres sont des roues (des disques).

- *Pythagore et la Grande Grèce (Sicile), V^e s.*

Pythagore: la Terre est une boule. Les autres astres aussi. (*note*: Anaxagore, le maître de Socrate, légèrement plus tardif, croit encore qu'elle est plate).

Parménide: les phases de la Lune sont dues à la position du soleil par rapport à elle. [SCHEMA]. Soleil plus gros que la Terre.

(*Remarque*. Philolaos (470-400), pythagoricien: la Terre et une Anti-Terre tournent autour d'un Feu central, qui n'est pas le soleil. Apparemment motivé par la perfection supposée du nombre 10, qui le pousse à ajouter 2 astres aux 8 connus. Premier à proposer une Terre mobile.)

L'astronomie d'Aristote à Ptolémée, le cadre

Les deux sphères. Vers l'époque de Socrate, l'astronomie grecque adopte ce que Kuhn nomme «l'univers des deux sphères». La première sphère est la Terre, une boule immobile au centre de l'univers. Les étoiles sont disposées sur une seconde sphère, qui tourne chaque jour autour de la Terre. Cette sphère est la limite de l'univers. Chez Aristote, elle est entourée d'une autre, le « premier moteur », qui entraîne tout le mouvement du monde.

Chaque planète à son « orbe », la sphère où il se meut. 7 ciels au-dessus de la Lune.

Ordonnées en fonction du temps que les astres mettent à faire le tour de l'écliptique (=révolution sidérale; Mercure, 3mois env., Venus, 7mois1/2 env; Mars, plus de 2ans1/2; Jupiter, 12ans env.; Saturne, 30ans env.). Rapports harmonieux entre les tailles des sphères. La « musique des sphères ».

La perfection de la sphère céleste. Le *Timée* de Platon montre ce que cette vision de l'univers a de satisfaisant. Le « Démiurge » ou « Créateur » construit un monde parfait. Or 1) le cercle est une forme parfaite. 2) le monde se suffit à lui-même: il n'a pas besoin d'absorber ou de rejeter quoi que ce soit, il est donc approprié qu'il ait une surface lisse et arrondie, 3) il n'y a rien en dehors de lui, il est donc approprié qu'il n'ait pas d'ouvertures (« yeux », « oreilles »), 4) toutes ses opérations se produisent en lui, il n'a pas besoin de membres (« pieds »). 5) la « révolution uniforme dans le même lieu », i.e. la rotation sur soi-même est un mouvement parfait. [probablement parce que le corps y bouge, sans pourtant occuper un lieu différent, ce qui est le plus près possible de l'identité.]

La rotondité de la Terre. Deux arguments. 1) Argument de la coque des navires. 2) Argument de l'ombre (arrondie) de la Terre sur la Lune pendant les éclipses de Lune. *Un problème:* pourquoi est-ce que les gens aux antipodes ne tombent pas? *Réponse:* la Terre est au centre du monde; imaginez un corps au centre de la Terre: vers où tomberait-il? Il n'y a pas de « bas » au centre. On peut supposer plutôt que tout tombe vers le centre. *Note:* le solution au pb des antipodes est moins aisée si la Terre n'est pas au centre du monde.

Sauver les phénomènes. Dans son commentaire au *Du Ciel* d'Aristote, Simplicius (5^e siècle ap. JC) attribue à Platon d'avoir posé le problème suivant: quels mouvements circulaires uniformes faut-il postuler, pour expliquer les mouvements des astres tels qu'on les observe? Pour « sauver les apparences (sozein ta phainomena) »? *Problèmes:* Les « anomalies », i.e. écarts par rapport au mouvement circulaire uniforme: 1) accélération et ralentissement du Soleil au cours de l'année, 2) stations et mouvements rétrogrades des planètes, 3) variation d'éclat des planètes, en particulier de Mars.

L'astronomie d'Aristote à Ptolémée, les systèmes

- le système des sphères homocentriques

Eudoxe, Aristote. Eudoxe de Cnide est le fondateur d'une école à Cyzique, on dit parfois qu'il était un ami de Platon. C'était un excellent géomètre: on lui attribue parfois le livre 5 des *Elements*, qui est d'un niveau très avancé. En astronomie, il introduit le système des sphères homocentriques: chaque planète est attaché à une sphère, elle-même attachée à une sphère, ainsi de suite, jusqu'à une sphère qui tourne avec la sphère céleste. Toutes les sphères tournent uniformément autour de la Terre. Mais chaque sphère a son axe de rotation, sa vitesse et sa direction propre.

Problème: ne rend pas compte de la variation d'intensité des étoiles. (Et probablement, prédit mal les rétrogradations/accélérations).

- le système des épicycles

Appolonius, Hipparque, Ptolémée. Appolonius de Perge, actif au Musée d'Alexandrie à la fin du III^e s. av. JC. Hipparque de Nicée, fin du II^e s. av. JC. Claudius Ptolémée, II^e s. ap. JC. (Remarque: rien à voir avec les rois du même nom.)

Appolonius a introduit deux systèmes pour rendre compte des mouvements des astres errants: les épicycles et les excentriques. [cf. SCHEMA]. Les deux systèmes sont équivalents.

Hipparque a perfectionné les valeurs pour le mouvement de la Lune et du Soleil.

(Hipparque a aussi découvert la *précession des équinoxes*, le fait que le pôle nord céleste se déplace très lentement dans le ciel étoilé. Ainsi, l'étoile polaire est plus ou moins proche du centre réel de rotation des étoiles. Ce mouvement, circulaire, a une période de 28000 ans env.!)

Le système des épicycles l'emporte. 1) *Il est plus homogène.* dans les excentriques, les deux cercles se meuvent dans le même sens pour les planètes extérieures (Ma, Ju, Sa), et dans un sens opposé pour les planètes intérieures (Me, Ve). Dans les épicycles, les cercles se meuvent dans le même sens pour les 5 planètes. 2) *Il n'est pas excentrique.* La Terre est au centre des rotations. 3) *On peut lui donner un sens réaliste.* Dans le système des excentriques, on ne peut pas envisager de sphères cristallines solides qui tourneraient réellement (elles passeraient les unes à travers les autres / on ne peut pas « poser » l'excentrique sur le concentrique).

La « tricherie géniale » de Ptolémée. L'ouvrage de Ptolémée, *Syntaxe mathématique*, transmis par les arabes sous le nom d'*Almageste*, est une synthèse magistrale des travaux antérieurs, et une avancée majeure sur ceux-ci. Il sert de référence jusqu'à Copernic, malgré certaines améliorations arabes.

La « tricherie géniale » de Ptolémée est l'introduction du « point équant ». L'idée est la suivante: un astre tourne sur un cercle de centre C; mais il ne tourne pas uniformément autour de C, il tourne uniformément autour d'un point E (point équant) légèrement éloigné de C. Imaginez le point équant comme un phare: le rayon lumineux tourne uniformément autour du phare. Comme le phare est plus proche d'un côté du cercle que de l'autre, l'astre *ralentit* lorsqu'il passe près du point équant.

Dans le cas de la Lune, le point équant est la Terre. Dans le cas des planètes, le point équant est distinct de la Terre.

Le point équant est « génial » parce qu'il rend compte des accélérations et ralentissements. (Le système reste complexe: la Lune est sur un épicycle, posé sur un déférent dont le centre tourne autour de la terre – le déférent est un excentrique mobile.)

Le point équant est une « tricherie » parce qu'il enfreint les principes de la cosmologie aristotélicienne: la Terre n'est ni le centre de la sphère, ni le centre de rotation; et les sphères ne tournent pas uniformément.

(« tricherie géniale » Verdet p.63)

Les problèmes du système.

- inexactitudes. Ptolémée peut observer une erreur d'un degré dans la position du soleil, sur ses tables.

- taille de la Lune. Le système de Ptolémée prédit sa position mieux qu'aucun autre. Mais il suppose que la Lune s'approche et s'éloigne de beaucoup: sa taille apparente devrait doubler entre certaines positions!

Le cas d'Aristarque. Aristarque, au III^e s. av. JC, a proposé une astronomie héliocentrique. Elle a été unanimement rejetée parce que:

1) on ne perçoit pas de parallaxe des étoiles. (Les positions des étoiles les unes par rapport

aux autres devraient légèrement changer quand la Terre change de place, comme quand on regarde un carré de face puis légèrement de biais. A moins que les étoiles soient très, très loin – ce qui semblait implausible. Note: en fait, les étoiles ont bien un parallaxe, mais elles sont très loin!)

2) on doit admettre que la Terre tourne, et qu'elle n'est pas au centre. Ce qui posait des problèmes pour la physique terrestre: pourquoi les pierres tombent vers le centre de la Terre, si elle n'est pas au centre du monde? Et pourquoi ne tombent-elles pas de biais, si elle tourne?

3) ses prédictions n'étaient pas meilleures.

Les théories d'une Terre mobile d'Aristarque et de Philolaos sont néanmoins connues des astronomes ultérieurs (à travers Ptolémée?).

La révolution copernicienne

Le système de Copernic

Nicolas Copernic (1473-1543), *Des révolutions des orbés célestes* (1543). Polonais, passe l'essentiel de sa vie près de Cracovie (où se trouvait un bon astronome et mathématicien, Albert de Brudzewo, mais on n'en sait pas plus), une partie de ses études à Bologne, où il est assistant d'un astronome renommé (Domenico Maria Novara). Chanoine dans une petite ville. Dès 1507-1512, il écrit un manuscrit qui est beaucoup lu, où il présente son système. En 1543, le manuscrit de son *Des Révolutions* est publié par son disciple Rhéticus. L'ouvrage suit de près le plan de l'*Almageste* de Ptolémée.

Le système. Le Soleil est au centre. Les planètes et la Terre tournent uniformément sur des sphères circulaires autour du Soleil; sauf la Lune qui tourne autour de la Terre. La Terre fait un tour sur elle-même chaque jour.

(NB: en fait le Soleil est légèrement excentrique par rapport centre de l'Univers, qui est le centre des sphères des planètes.)

Ce qui demeure. Copernic continue d'utiliser les méthodes grecques pour expliquer les accélérations et les ralentissements. Ainsi la Terre est sur une sphère excentrique par rapport au Soleil. Les planètes ont toujours des épicycles. Dans certains cas, les Maintient un 'dogme' de l'astronomie aristotélicienne: il n'y a plus de point équatorial, on revient aux mouvements circulaires uniformes. (Sera brisé par Képler)

Ce qui change. La rotation diurne des étoiles, du soleil, de la Lune et des astres est une apparence due à la rotation de la Terre.

Les stations et les rétrogradations sont expliqués par le mouvement de la Terre autour du Soleil. [SCHEMA]

Lien simple entre les distances des planètes au Soleil et la durée de leurs révolutions.

Violer des 'dogmes' de l'astronomie aristotélicienne. 1) la Terre n'est pas au centre. (pourquoi les pierres tombent?) 2) la Terre n'est pas immobile. (Pb: pourquoi les pierres tombent en ligne droite? + pas de parallaxe, il faut admettre que les étoiles sont à une grande distance.)

3) plus de dichotomie terrestre/céleste.

Réception de Copernic. personne n'y croit, mais on utilise son système pour établir des tables de position des planètes, qui sont meilleures que celles de Ptolémée: Erasme Reinhold, *Tables prussiennes*, 1551. Les adeptes (Kepler, Galilée) sont rares. Beaucoup d'astronomes jugent qu'à partir d'une hypothèse fautive, Copernic a simplement découvert des calculs plus précis. Le système copernicien n'est largement accepté par les savants que dans les années 1630.

(Galilée, vieillissant, est condamné en 1633; Descartes renonce à publier son *Monde*.)

Détails. Luther, dès 1539, mentionne dans ses *Propos de table* un nouvel astrologue qui « veut prouver que la Terre bouge », en contradiction avec l'Écriture où il est dit que « Josué a commandé au Soleil et non à la Terre de s'arrêter ». Mélenchton, Calvin jugent également la doctrine hérétique. Le dominicain Giovanni Maria Tolosani, membre éminent de la Curie, écrit un texte où il reproche à Copernic de violer le principe de la hiérarchie des sciences, selon lequel l'astronomie est subordonnée à la théologie. Le texte est non publié, mais connu, entre autres, de Thomas Caccini, qui contribuera à faire mettre l'ouvrage Copernic à l'Index en 1616, comme faux et hérétique.

Voir Paolo Rossi, pp.98-103, sur les détails complexes de la réception de Copernic. Les adeptes ne sont pas toujours les plus rationnels; ils comptent des mystiques, des passionnés de magie et d'astrologie.

Le système de Copernic soulève des questions sur la mécanique terrestre: qu'est-ce que la gravité, qu'est-ce qui meut les planètes, quelle est la dimension de l'Univers.

Le système intermédiaire de Tycho Brahé

Tycho Brahé (1546-1601), astronome danois. Plus grand observateur à l'oeil nu de l'histoire; il est quinze fois plus précis que ses contemporains. (Instruments fabriqués et utilisés avec grand soin: noyer veilli qui se déforme moins que les métaux avec les changements de température, graduation précise, fil à plomb, etc.) Publie son système en 1588. Beaucoup de variations seront proposées, au début du XVII^e.

Rejette la rotation de la Terre: les pierres ne tomberaient pas en ligne droite. Rejette le mouvement circulaire de la Terre: les étoiles ne peuvent pas être si loin. Et les deux contredisent les Écritures.

Détail: Tycho a un argument d'observation pour rejeter le mouvement de la Terre. Il donne des mesures du diamètre apparent des étoiles, et calcule que, si elles étaient aussi loin que Copernic le dit, elles devraient être plus grosses que l'orbite de la Terre autour du Soleil, ce qu'il juge inacceptable. (En fait, ses mesures sont surestimées: la brillance des étoiles les fait paraître plus grandes à l'oeil nu.)

Terre au centre, Lune et Soleil tournent autour. Mais les planètes tournent autour du Soleil.

Mathématiquement équivalent à celui de Copernic; maintient équants, épicycles, excentriques. *Défauts:* perd le rapport simple distance au soleil – durée des révolutions.

Le système de Brahé rallie des théologiens (jésuites; mais les aristotéliens y restent opposés).

Le système de Képler

Johannes Képler (1571-1630). Famille modeste, luthérienne. Chétif, myopie et polyopie (voyait parfois double). Bénéficie d'une bourse pour des études à l'Université, se destine à être pasteur. Études à l'Université de Tübingen, où Michael Mästlin lui présente probablement le système copernicien. Obtient par chance un poste titulaire de mathématicien au séminaire de Graz, en Autriche (1594). *Astronomie nouvelle, ou Physique céleste (Astronomia Nova seu Physica coelestis)*, 1609, où Képler présente les lois qui régissent les mouvements dans le système solaire.

Il y a trois « lois de Képler », les deux premières sont dans l'*Astronomie nouvelle*, la troisième dans les *Harmonies du monde (Harmonia mundi)*, 1618.

1609 est l'année où Galilée observe pour la première fois le ciel avec sa lunette.

Les ouvrages de Képler sont exceptionnels et passionnants, parce qu'il y explique en détail comment il est parvenu à ses théories, en s'attardant sur ses erreurs et ses doutes.

« Calculateur fou » (Verdet) et maniaque de la précision, il s'obstine à chercher des rapports mathématiques simples dans le mouvement des astres.

Les découvertes de Képler. Persuadé de la supériorité mathématique du système copernicien (prédictions + simplicité). Cherche à en trouver les « raisons » physiques.

- Première loi: les orbites des planètes sont des ellipses dont le Soleil est l'un des foyers.
- Deuxième loi (« loi des aires »): le rayon qui joint la planète au Soleil parcourt des aires égales en des temps égaux.
- Troisième loi: les carrés des temps de révolution d'une planète sont proportionnels au cubes des moyennes distances au Soleil.
 $T^2 / a^3 = \text{constante}$; où T est la durée de la révolution de l'astre, et *a* sa distance moyenne au Soleil.

Conséquence: fin du mouvement circulaire uniforme. La vitesse des planètes est réellement variable. Fin du cercle. Uniformité et simplicité du mouvement des planètes. Calculs bien plus exacts que tout ce qui précédait.

Découverte des deux premières lois. Képler découvrit le moyen de tracer la courbe que parcourt la Terre autour du Soleil. Une heureuse succession d'erreurs lui fait découvrir la loi des aires égales à propos de la Terre. Connaissant le mouvement de la Terre, il peut tracer l'orbite de Mars. Il essaie des cercles; puis pense à l'ovoïde, puis trouve l'ellipse. Il applique les lois, et les prédictions sont parfaites. « Mars était enchaîné » (Verdet).

En tout, Képler rapporte soixante-dix hypothèses envisagées pour le mouvement de Mars. *Détail:* on sait que Mars revient à la même position tous les 687 jours; en calculant l'angle Mars-Soleil vu depuis la Terre, on peut placer la Terre ce jour-là. Képler trouve que la Terre parcourt un cercle légèrement excentrique par rapport au Soleil; c'est une erreur minime par rapport à la réalité (une ellipse quasi-circulaire dont le Soleil est un foyer). Il calcule sa vitesse; deux erreurs qui se compensent lui font découvrir la deuxième loi (mais c'est donc pour un cercle!). Ensuite, il trace l'orbite de Mars: à J, Mars est à un endroit donné; on connaît l'angle ST₁M (l'angle entre le Soleil et Mars vu depuis la Terre); Mars est quelque part sur la droite T₁M. A J+687, on sait que Mars est au même endroit; mais la Terre est ailleurs sur son orbite à elle. On peut observer l'angle ST₂M; Mars est sur la droite T₂M. On peut déterminer la position de Mars: au croisement de T₁M et T₂M. On fait répéter l'opération pour d'autres jours, et on dessine l'orbite de Mars. Kepler cherche sa forme: on voit tout de suite que la distance Soleil-Mars n'est pas fixe; il envisage un cercle excentrique, mais les écarts sont trop grands d'un côté; puis un ovoïde; puis une ellipse.

Découverte de la troisième loi. Énoncée comme un rapport harmonique, dans les *Harmonies du monde*.

Les motivations mystiques de Képler

Képler est « encombrant » (Rossi). Révolutionnaires, ses découvertes sont entourées de croyances mystiques et ésotériques, que les savants contemporains (Galilée, Bacon, Descartes) jugeaient déjà archaïques – à l'exception de Giovanni Alfonso Borelli. Ses lois ne furent acceptés des savants que vers 1660.

Deux influences fortes sur Képler: 1) le pythagorisme, dans la recherche de nombres, 2) le mysticisme platonicien de la Renaissance, qui attribue des âmes au corps célestes
2) l'hérmetisme. [Hermétisme: du *Corpus Hermeticum*, collection d'écrits de philosophie occulte et de magie, datant du IIe-IIIe siècle ap. JC, attribués au dieu *Hermès Trismegiste*. C'est le livre de magie/alchimie le plus connu et influent.]

Pour Képler, le Soleil est une « âme ». Il a une « force » magnétique, qui tourne avec lui, et fait tourner les planètes à distance (non pas en les attirant, comme chez Newton, mais en les poussant sur leur orbite!). Elle s'exerce de moins en moins fort avec la distance, d'où la 3^e loi. Dans les *Harmonia mundi*, les différents tons musicaux correspondent aux différentes planètes. Dans le *Secret du monde*, les différents orbites sont ordonnés suivant les 5 cylindres réguliers.

Détail. Le *Secret du monde (Mysterium cosmographicum)*, 1596, sur la disposition du système solaire. Dans le sys copernicien, on devine un lien entre la taille des orbites et la durée de révolution. Pourquoi ce lien, pourquoi 6 orbes et pourquoi ces distances entre eux? Dans le *Secret du monde*, Képler raconte sa quête et sa découverte d'un principe mathématique à ces rapports. Suite d'hypothèses (Verdet p.73 sq.): à partir de sinus (points sur un quart de cercle), de la série des figures (triangles dans la voûte céleste pour la distance Saturne-Jupiter, carré pour Jupiter-Mars, etc.). S'inspire finalement des polyèdres réguliers (importants chez les pythagoriciens, Platon) : il ne peut y en avoir que 5, comme Euclide l'a montré – or il y a 6 orbes, donc 5 interstices entre les orbes. est cube entre la sphère de Jupiter et celle de Saturne, tétraèdre entre Ju et Mars, dodécaèdre entre Ma et la Terre, Isocaèdre entre T et Ve, octaèdre entre Ve et Me. Chaque sphère est inscrite dans un polyèdre, lui-même inscrit dans l'orbite supérieure.

Alors, Képler mystique? Rossi (p.114-115) propose une évaluation équilibrée. Képler manifeste une modernité par 1) la recherche de rapports quantitatifs, 2) une interprétation mécaniste des thèmes animistes. Il fait valoir que dans son système, il n'a besoin que d'une âme céleste (Soleil), que sa force est « simple et unique », qu'elle est une « chose géométrique », de telle sorte que l'univers « peut être comparé, non pas à un organisme divin, mais à un mécanisme d'horlogerie ».

La lunette de Galilée: le nouveau ciel

Au moment de la révolution copernicienne, on observe dans le Ciel des choses qui n'avaient jamais été vues, et qui contribuent à renverser la vision aristotélicienne du monde.

La nova et les comètes de Tycho. le 11 novembre 1572, le jeune Tycho Brahé observe une nouvelle étoile (« nova ») dans la constellation de Cassiopée. Elle devient très brillante, reste 18 mois et disparaît. Il mesure précisément sa position par rapport aux autres étoiles: elle est parfaitement fixe. Il doit admettre que c'était une étoile. Les ciels ne sont pas immuables. *De Stella Nova* (1973)

Détail: Brahé considère cela comme un « miracle », autrement dit, une exception, qui ne renverse pas véritablement le principe aristotélicien.

Détail: Ces observations valurent à Tycho Brahé une seigneurie, de la part du roi du Danemark, où il fit construire des observatoires, laboratoires, et forma de nombreux astronomes européens.

En 1577, 1580, 1582, 1582 et 1590, Tycho observe des comètes. Depuis Aristote, les comètes étaient considérées comme des événements *sublunaires* (atmosphérique). Il mesure leur

parallaxe, qui est trop faible pour qu'elles soient sous la Lune. Il établit qu'elles se déplacent à travers les sphères. Donc 1) les cieux ne sont pas immuables, à nouveau, 2) il n'y a pas de sphères cristallines solides. *Second livre sur récentes apparitions dans le monde céleste* (1588).

La lunette de Galilée. (Galilée (1564-1643), physicien italien, né à Pise, se passionne pour les mathématiques et la physique lorsqu'il découvre les écrits d'Archimède. Enseigne les mathématiques à l'Université: les *Elements* et l'*Almageste*, s'intéresse à la technique (architecture militaire, fortifications, mécanique). Il est rapidement convaincu de la vérité du système copernicien (en 1597, il le dit dans une lettre à Kepler).

Galilée fait la démonstration de sa première lunette au doge de Venise, le 21 août 1609. Elle grossit 8 fois. Les membres du Sénat observent des voiliers au loin, deux heures avant de pouvoir les distinguer à l'oeil nu. Ce qui lui vaut une chaire à vie, et une récompense, qui lui permet de commencer sur-le-champ une seconde lunette, de puissance 20. Le 30 novembre, il la pointe vers la Lune et la dessine; il en découvre les cratères, les mers et les monts en décembre; le 7 janvier, il observe trois astres autour de Jupiter, le 8, il observe qu'ils suivent Jupiter. En mars 1610, il publie le *Messenger céleste* (*Sidereus Nuncius*) où il présente et reproduit ses observations. En quelques nuits, Galilée découvre un nouveau monde.

Galilée observe: les montagnes lunaires, que la Voie Lactée est constituée d'étoiles, que Jupiter a quatre satellites, les phases de Vénus, et plus tard, les taches solaires et la rotation du soleil. Conséquences:

- la Lune a du relief: un astre au moins n'est pas parfaitement sphérique, contre Aristote.
- La Lune, qui se meut dans le ciel, est semblable à la Terre (montagnes). Cela rend moins absurde l'idée que la Terre se meut elle aussi.
- Le système Jovien. Rend impossible d'envisager avec Aristote que tout tourne autour d'un même point, la Terre.
- Les phases de Vénus. Le système de Ptolémée prédit qu'on voit toujours la face obscure de Vénus, et qu'on ne peut jamais la voir complète; Galilée observe qu'on la voit parfois complète.
- Les taches solaires. Les astres ne sont pas incorruptibles, immuables.
(*Détail*: plusieurs astronomes avaient observé les taches solaires dès 1611, et certains avaient déjà soutenu qu'elles étaient bien sur le Soleil, et non des petites planètes entre le Soleil et nous. Mais la publication de Galilée, *Lettres sur les taches solaires*, 1613, s'est imposée par sa rigueur: il s'appuie sur la déformation des taches au fur et à mesure de la rotation du soleil pour écarter l'hypothèse des planètes.)

Conclusion

Une histoire tortueuse. Copernic: astrologue. Tycho Brahé: observateur attentif, mais qui cherche à rétablir les Ecritures. Képler: méthode hypothético-déductive, mais inspirée par le mysticisme des nombres.

Mais sur le long terme, une histoire conforme à la théorie empiriste. Ce qui justifie une théorie, c'est son adéquation avec l'observation. Copernic prédit mieux que Ptolémée; Képler mieux que Brahé. Et les observations de Galilée invalident la mécanique céleste aristotélicienne.

Annexes

voc. d'astronomie:

apogée: position d'une planète lorsqu'elle est le plus loin de la Terre. (aphélie: même chose avec le soleil.) Exemple: extérieur de l'épicycle.

périgée: position d'une planète lorsqu'elle est le plus proche de la Terre. (de même, périhélie)

opposition: deux planètes sont en opposition si elles sur la même ligne, de part et d'autre d'un astre donné (Terre, Soleil). Ex: dans l'éclipse de lune, la L et le S sont en opposition par rapport à la Terre.

conjonction: deux planètes sont en conjonction si elles sur la même ligne, du même côté d'un astre donné. Ex: dans l'éclipse de soleil, la L et le S sont en conjonction par rapport à la Terre.

Références

Kuhn, Thomas, *La révolution copernicienne*, Fayard 1973. Chap 1., p.18-38 sur le mouvement du soleil et des étoiles.

Verdet, Jean-Pierre, *Histoire de l'astronomie ancienne et classique*, PUF, Que sais-je, 1998. Référence utile, rapide, excellent sur les aspects techniques (épicycles, etc.).

Rossi, Paolo, *Aux origines de la sciences moderne*.

Histoire des sciences		Histoire de la philosophie
Egyptiens : (arpentage, calendrier solaire)	-2000	
Babyloniens (éclipses, calendrier lunaire)	-1800 à - 530	
	-700 VII -600	(Hésiode)
<i>Asie mineure</i> Thalès (640-546) Anaximandre (610-547)	VI -500	<i>Asie mineure</i> Héraclite
<i>Grande grèce</i> Pythagore, (école : 585-400) Parménide, <i>De la nature</i> , 490	(-479) V -400	<i>Grande grèce</i> Anaxagore (Athènes, 500-428) Socrate (Athènes, -399) Démocrite (Abdère, 460-370)
<i>Asie mineure</i> Eudoxe (408-355, Académie puis Cyzique) Héraclide du Pont	IV -300	<i>Athènes</i> Platon (428-347 ; Académie :388) <i>Académie</i> : -388 à +529 Aristote (384-322 ; Lycée :334)
<i>Alexandrie</i> Euclide (Alexandrie, 315-255) Aristarque (Alex., -310-230) Appolonius de Perge (Alex.vers 230) Archimède (Syracuse, 287-212) Eratosthène (284+ ?)	(-323) III -200	<i>Athènes</i> Démétrius (fonde le Musée de 323 à 300) Straton (au Musée 300-288, Lycée ensuite) <i>Stoïciens</i> <i>Epicuriens</i>
Hipparque	II -100	
	I 0	Plotin
	I	
Ptolémée	100 II	
	200 III	
	300 IV	
	400 427 V	
	500 VI	

Références

Blanché, Robert, *L'axiomatique*, Paris, PUF, 1955.

Granger, Gilles-Gaston, *Langages et épistémologies*, Paris, Klincksieck, 2000.

Wagner, P. (éd.) *Les philosophes et la science*, Paris, Gallimard (Folio Essais), 2002.

- ch. 11, Jean-Baptiste Gourinat, « Aristote et la forme démonstrative de la science », p.581-623
- ch. 2, Philippe Hamou, « Descartes et Newton », p.110-165.