

Sur les principes et les principales thèses de l'astronomie ancienne, des Ioniens à Ptolémée

Il s'agit de notes de cours, donc très approximativement rédigées et qui sont pas conçues pour être diffusées ou citées.

Pourquoi étudier l'histoire des idées en astronomie ?

C'est la première science véritablement développée

Les rapports entre les mathématiques et les phénomènes y sont intenses

Les rapports entre les observations et les hypothèses serviront de modèle canonique.

Le concept de théorie reçoit sa pleine signification,

La question de la vérité dans les sciences s'y présente avec les difficultés qu'elle contient.

La caractérisation du programme du philosophe de la nature y est nettement controversée.

« L'astronomie nous a fait une âme capable de comprendre la nature » (H. Poincaré, *La valeur de la science*, VI, 157)

Environ huit siècles (du VI^e av. J.C. au II^e ap. J.C.) vont s'écouler au long desquels le système du monde qu'on appelle *géocentrique* (ayant la terre pour centre) est mis au point. On lui attache généralement les noms d'Aristote et de Ptolémée. L'accord général apparent sur l'architecture de l'ensemble ne peut cacher les différences profondes de conceptions que se font les savants sur ce monde géocentrique.

AVANT LES GRECS. REGARDER LE CIEL, POUR MESURER LE TEMPS.

Anecdote de Pascal Picq, « seule l'espèce humaine regarde en haut, c'est bizarre ! ».

Les grecs d'avant le VI^e siècle, cultivés, curieux et imaginatifs ont d'abord fait ce que firent d'autres hommes - avant et après eux - dans presque toutes les civilisations. Comme les babyloniens ou les égyptiens qui les précédèrent, ils ont observé le ciel d'abord et surtout pour évaluer le passage du temps, pour établir des calendriers, pour améliorer les possibilités de voyage (en particulier la navigation). Ils ont aussi mesuré, quantifié des grandeurs et opéré des partages. (On en a quelques témoignages chez Homère).

En ceci ils ne sont pas originaux ou novateurs (ils font plutôt moins bien que les babyloniens).

Les problèmes posés par ce qu'on appelle la civilisation assyrienne ou babylonienne sont complexes. Entre le quatrième millénaire avant J.C. et le début du premier millénaire, de nombreux peuples –souvent en conflits violents- contribuèrent à l'invention de l'écriture, à la mise au point de vastes connaissances médicales, astronomiques et mathématiques. Vers 1800 av. J.C. un petit village du nom de Babylone assoie sa suprématie sur les autres cités. Autour de Babylone se constitue un immense état centralisé, s'étendant depuis l'Anatolie au nord jusqu'au golfe persique au sud et de la Syrie à l'ouest jusqu'à l'Elam à l'est. Nous disposons d'un grand nombre d'archives assyriennes et babyloniennes, surtout depuis la découverte au milieu du XIX^e siècle à Ninive, des restes de la splendide bibliothèque d'Assourbanipal, roi d'Assyrie qui conquiert Babylone vers 650 av. J.C.

Dans la bibliothèque d'Assourbanipal, on a trouvé une table extrêmement précise des phases de la lune et on sait que la qualité des observations astrales et stellaires des babyloniens fut remarquable, les instruments d'observation astrologiques et astronomiques qu'ils mirent au point

furent décisifs et se retrouvent chez les astronomes grecs ; il s'agit du *gnomon* (à la base, dans sa version la plus élémentaire c'est un bâton dressé de façon à mesurer les ombres), de la *clepsydre* (appareil à écoulement destiné à mesurer celui du temps) et du *polos* (vaste demi-sphère dont la concavité est orientée vers le ciel pour recevoir avec exactitude l'image des positions des étoiles). Les catalogues d'étoiles et de situations planétaires réalisés à Babylone ou dans l'empire furent nombreux, bien connus, diffusés et leur précision est légendaire.

L'astronomie présocratique

LE MONDE DOIT ETRE COMPRIS

Mais une chose remarquable est advenue quand certains, dans les cités grecques, estimèrent que le Monde, la Terre, les astres et les étoiles pouvaient être étudiés et compris. Il y avait mieux à faire qu'à observer ces objets, à noter leurs positions et leurs formes ; il leur a paru possible de concevoir des règles générales, des principes, auxquels se conformait le Monde qui, dès lors, devenait intelligible.

(il convient de discuter la notion de *miracle grec*, et aussi sur le *continuisme* et/ou les ruptures.

Jacques Merleau-Ponty :

« Le fait capital à cet égard (l'intention cosmologique) est qu'à une certaine époque (Ve siècle av. J.C.), dans une certaine région du monde, une certaine image géométrique du monde se fixe, un système s'établit qui, pour très longtemps, accomplira l'harmonie la plus exacte possible entre l'intention rationnelle et ce que le regard attentif dévoile du monde ... L'important est de comprendre que ce système, qui a duré vingt siècles, est totalement erroné et que, cependant il porte une sorte de vérité permanente dans la mesure où son économie résulte d'un ajustement très subtil entre ce que l'œil voit, ce que l'imagination construit, ce que la raison exige » (*Les trois étapes de la cosmologie*, p. 22-23)

Avec ces hommes là naît la notion de cosmos, d'un ordre rationnel du ciel et aussi des phénomènes terrestres. Deux termes plus ou moins équivalents apparaissent et accèdent au niveau de concept : *taxis* et *kosmos* : rangement, classement ordonné des choses et des phénomènes. Le cosmos en particulier se distingue du chaos initial, selon des modalités qui vont être fort diverses. C'est donc déjà une prise de position forte que de nommer ainsi le monde céleste ; c'est dire qu'il est ordonné.

LES PLANETES

Les étoiles, si elles tournent toutes ensemble, paraissent parfaitement immobiles les unes par rapport aux autres. Rien ne vient modifier l'arrangement du ciel... Pourtant, il existe quelques étoiles indisciplinées, des *astres errants* qui ont des trajectoires à la fois régulières et complexes, très complexes même. Ce sont les planètes et les grecs en connaissaient sept, la Lune, le Soleil, Vénus, Mercure, Mars, Jupiter et Saturne. Tel est le matériau de départ de l'astronomie : une voûte étoilée où brillent, la nuit, les *étoiles fixes* et sept *planètes* qui se déplacent dans une même bande, le zodiaque, selon des trajectoires mystérieuses.

S'il faut considérer deux domaines privilégiés où cette mutation intellectuelle va produire ses effets les plus spectaculaires, on devra retenir les mathématiques et l'astronomie. La seconde est assez largement incluse dans la première (selon des modalités assez complexes) ; un ordre possible des choses règne aussi en musique et en optique, pour des raisons assez simples à comprendre. On pourra, à partir d'Aristote ajouter aussi la taxinomie.

Il devait y avoir quelques principes absolument généraux d'où l'on pourrait tirer, déduire, les lois de ce cosmos nouveau. A première vue, une sorte de recul peut apparaître : la précision et la quantité des observations semblent passer au second plan et les premiers systèmes astronomiques et cosmologiques ont parfois l'allure de vastes chimères imaginatives, moins fines que les collections babyloniennes par exemple.

Avec Thales, Pythagore ou Les premiers atomistes, sommes-nous en présence de *lois naturelles* ou de *lois de la nature* ? Sans doute pas. Il s'agit plutôt de reconnaître des principes architectoniques c'est-à-dire qui dépendent des causes finales ou qui commandent les principes des sciences « subalternes » (sens Aristotélicien), qui offrent un référent pour l'intelligibilité du monde. La loi physique ou "de la nature" apparaîtra lorsqu'il sera possible de décrire et de prévoir les variations régulières phénoménales.

L'ARCHE. LES MILESIENS OU IONIENS

Les trois grands savants de l'Ionie, Thales de Milet, Anaximandre, Anaximène, cherchent une même chose essentielle : de quoi est fait le Monde ? Quel est le principe premier, ou *arché*, qui préside à son existence ? Leurs réponses divergent.

Thales, estime que l'eau est cet élément primordial, comme en écho du mythe ancien de l'océan générateur : l'humide est source de vie, il est fertile et l'eau donne naissance aux autres éléments : aux corps solides par condensation, à l'air par évaporation et l'air, à son tour engendre le feu. L'eau soutient ainsi notre univers et *la Terre est portée sur l'eau* comme *le feu du soleil et des astres, le monde entier est entretenu par les exhalaisons des eaux* (*Histoire générale des Sciences*, vol. 1 p. 211). L'Univers de Thalès est une bulle d'air hémisphérique et la base de cette bulle est notre terre, sorte de cylindre aplati, posé sur les eaux inférieures qui, en bougeant, provoquent les multiples perturbations que sont les vents, les tremblements et éruptions. Les astres flottent sur les eaux d'en haut et, si leurs mouvements obéissent à des lois mystérieuses, celles-ci existent néanmoins comme l'indique la relative régularité des parcours planétaires. L'anecdote qui le fait tomber dans un trou parce qu'il regarde le ciel (*Théétète*, 174a) atteste de l'intérêt que Thalès portait à l'astronomie. Il aurait par ailleurs obtenu des résultats plus encourageants : une explication des éclipses du soleil, la description du décalage des solstices (inégalité des deux moitiés de l'année). Ce résultat est rendu possible en repérant l'ombre méridienne minimale d'un gnomon (solstice d'été) et la maximale (solstice d'hiver). L'usage du gnomon pour ceci est attestée chez Anaximandre (Diogène Laërce, *vie des philosophes illustres*, cité par Szabo, 32).

Anaximandre, comme Thales dont il fut l'élève, conçoit l'univers à partir d'un principe éternel, infini, origine de toutes choses ; mais il le pense plus abstrait que l'eau, l'air ou le feu ; c'est une substance au sein de laquelle notre monde - et tous ceux qui existèrent avant lui ou lui succéderont - prend forme puis disparaît ; il la nomme *apeiron*, élément à la fois infini et indéterminé qu'il est bien difficile de comprendre : s'agit-il d'un chaos primitif qui aurait contenu tous les éléments connus avant qu'ils ne se distinguent en se séparant ? Toujours est-il que la Terre, colonne cylindrique, y flotte environnée d'air, sans support et sans direction privilégiée. Elle est au centre d'une sphère céleste embrasée et percée çà et là de trous laissant passer la lumière de ce feu. Cette enveloppe percée nous donne à voir le soleil, la lune ou les étoiles. Imaginations que tout cela, bien sûr ; mais images confuses et fictives d'une machinerie bien réelle, d'un cosmos ordonné obéissant à des règles. Il s'agit des premiers pas, peu assurés et encore titubants sur la voie d'une cosmologie rationnelle. Là encore, on peut signaler des résultats

astronomiques tangibles : outre l'inégalité des moitiés de l'année, Anaximandre établit l'inclinaison de l'écliptique (environ 24 degrés) dont témoigne aussi la différence des ombres méridiennes aux solstices : si le plan de révolution solaire était le même que celui des étoiles, on n'aurait pas de variation des ombres d'un jour à l'autre.

Troisième évoquée, l'*Arché* d'Anaximène n'est ni eau, ni *apeiron* mystérieuse, c'est l'air. Plus en détail, il élabore une doctrine de la formation des autres éléments (eau, terre, feu) à partir de la condensation, de la raréfaction du premier: en se dilatant et en se condensant, l'air apparaît sous diverses formes...Quand il se dilate suffisamment, il produit le feu...quand il se condense, l'eau ; à un degré de plus la terre ; au plus haut degré de condensation, les pierres. Surtout, il invente une idée qui marquera l'astronomie jusqu'au début des temps modernes : une immense sphère de cristal entoure notre monde et les étoiles sont comme des clous fixés à cette voûte en rotation. Pour la première fois, il affirme nettement la différence de nature entre ces étoiles fixes et les planètes (comme le Soleil, la Lune, Vénus ...) qui sont supportées par l'air. Il revient cependant, contre Anaximandre qui estimait courbe la surface terrestre, à l'idée d'une surface plate, relevée vers le nord pour expliquer la dissimulation des astres dans leur rotation autour du pôle.

Aussi importante, aussi inaugurale qu'elle soit, la cosmologie des ioniens est donc très primitive ; elle se trouve largement surpassée par des conceptions qui leur sont quasiment contemporaines, notamment celles qui vont être développées par les pythagoriciens.

LES PYTHAGORICIENS

L'existence d'une école, dite pythagoricienne est clairement attestée ; elle fut influente, durable, eut de nombreux adeptes. Souvent légendaires sont, en revanche, les récits concernant le maître, le fondateur, dont on croit savoir qu'il fut lui aussi - par sa naissance - ionien puisqu'il serait né à Samos, île proche de Milet. Après avoir voyagé en Egypte et en Cyrénaïque, il se serait fixé à Crotona, en Italie du Sud. Un premier trait important de la philosophie des pythagoriciens les sépare nettement des ioniens ; ils refusent le schéma d'une substance originelle unique et insistent en effet sur les oppositions à l'œuvre dans le monde (droit - courbe ; limité - illimité ; un - multiple etc.). On peut cependant retrouver dans l'enseignement de Pythagore et de ses disciples un modèle universel des choses (certains commentateurs y voient une forme de l'*arché* ionienne) : pour eux, en effet *tout est nombre dans l'univers* ou encore *toutes les choses sont des nombres*. Ces formules pythagoriciennes indiquent que toute connaissance possible passe par les nombres (pour eux, seuls ce que nous appelons les entiers positifs à partir de 2 sont des nombres). On va le voir, cette théorie s'épanouit particulièrement bien dans deux domaines : la musique et l'astronomie. D'ailleurs l'harmonie de certaines associations et suites numériques permet de réunir les savoirs musicaux et astronomiques. Les planètes, au nombre de sept (Lune, Soleil, Vénus, Mercure, Mars, Jupiter, Saturne), comme les notes de la gamme musicale qu'ils avaient inventée, avaient des périodes qui produisaient une ineffable musique céleste. On disait que Pythagore était le seul à pouvoir l'entendre. Comme les nombres, le monde est ordre, ce qu'exprime précisément le terme de *cosmos*, ou *monde ordonné* par lequel Pythagore désigne l'Univers limité par la sphère des fixes.

Les planètes déterminent une bande étroite et fondamentale en astronomie, le *zodiaque*, située de part et d'autre d'un des grands cercles de la voûte céleste, le cercle de l'écliptique ; comme sur un « fond d'écran », on peut voir, sur ou dans, le zodiaque, les douze constellations formées par des groupes d'étoiles (Scorpion, Lion, Cancer, Balance, Sagittaire, Gémeaux...).

LA TERRE EST UNE SPHERE

La démarche des pythagoriciens était-elle scientifique ? Oui en ce sens général que l'on a déjà souligné qui consiste à affirmer que le monde est soumis à des principes et des règles qui déterminent le cours des événements naturels, ce qui le rend, en droit, intelligible. En revanche, ce ne sont pas les observations, les expériences, les mesures qui suggèrent ces lois, qui rendent possible cette intelligibilité, mais une inspiration mystique, des croyances métaphysiques, des critères esthétiques. Un point de vue finaliste, une conception architectonique des régularités repérables, guident les pythagoriciens. Le plus éclatant manifeste de cette étrange science réside dans l'affirmation de la forme sphérique de notre Terre. De Pythagore à Philolaos, dans toute l'école pythagoricienne et, à travers elle, dans tout le monde grec puis, au delà de celui-ci, dans tout le monde cultivé, se répand la thèse d'une Terre sphérique. Non seulement la Terre, mais encore la voûte étoilée est une sphère et les planètes -sphériques elles aussi - sont attachées à des sphères célestes en mouvement.

Une remarque : il est abusif de dire que cette forme sphérique fasse l'unanimité. Pour preuve, la controverse qu'Aristote juge opportun de mener dans son *Traité du Ciel* rédigé au troisième siècle :

On relève à peu près les mêmes contestations (que sur le lieu) au sujet de la forme de la terre. Certains pensent qu'elle est sphérique, d'autres qu'elle est plate et qu'elle a la forme d'un tambourin. Ces derniers en donnent pour preuve qu'au lever et au coucher du Soleil, sa partie cachée par la terre montre une bordure droite et non circulaire... Ils mettent en avant un autre argument, et disent qu'en raison de son immobilité la Terre doit nécessairement posséder cette forme... (*De Caelo*, II, 13, 294a)

Il poursuit ainsi sa polémique contre Thalès, Anaximène, Anaxagore et aussi Démocrite (on y reviendra).

Sur quels arguments s'appuyaient les tenants de la terre sphérique? On a écrit (Aristote le premier, *De caelo* 297b-298a20) que l'ombre portée de la Terre sur la lune lors des éclipses, de forme courbe, constituait un bon argument en faveur de la sphéricité terrestre. Il s'agit toutefois d'une donnée insuffisante : une forme cylindrique eut suffi ; certains voyageurs avaient bien indiqué que de nouvelles étoiles devenaient visibles si l'on s'éloignait loin des côtes et ceci militait pour une courbure de la surface terrestre (comme celle que défendait Anaximandre) mais n'en faisait pas nécessairement une boule ronde. Une même remarque s'impose pour l'argument tiré des mâts des navires qui s'estompaient petit à petit vers l'horizon, après que les coques aient disparu. Bref, bien qu'il n'existât pas d'argument péremptoire pour la sphéricité, les pythagoriciens la défendirent absolument, systématiquement.

Proclus (5^{ème} ap. J.C.) souligne que Pythagore

« mit en œuvre une méthode non empirique et purement intellectuelle ; c'est lui qui découvrit la théorie des proportions et l'existence d'une structure des formes de l'univers » (Pléiade, p.560).

La thèse de la sphéricité terrestre fut d'abord un dogme : en ce monde, les nombres révèlent une harmonie générale et universelle ; tout conspire à la symétrie, à la perfection des rapports et des formes ; or, il est une forme parfaitement symétrique, toujours identique à elle-même, sans direction privilégiée, sans désordre et cette forme, qui est la beauté même, est la sphère (ou le cercle si on se réfère au plan). Cette forme sphérique convient au Monde, au Cosmos, à la Terre et aux astres. C'est sur ce principe *a priori* que va être progressivement édifié un système du monde assez extraordinaire, depuis le 'premier pythagorisme' (celui du maître) jusqu'au

flamboyant système de Philolaos de Tarente. C'est aussi un principe de raison qui fait dire à Philolaos, selon Stobée (doxographe, ou compilateur d'extraits du Vème siècle) :

« Le monde est un ; il a commencé à naître à partir du centre et dans les mêmes proportions vers le haut et vers le bas... Il en va de même pour le reste ; car par rapport au centre, les directions sont identiques, à ceci près qu'elles sont inversées » (Pléiade, p.509).

LE PREMIER COSMOS

La terre sphérique est au centre du cosmos de Pythagore et, autour de cette boule, la Lune, le Soleil et les planètes (Venus, Mercure, Mars, Jupiter et Saturne) tournent en cercles concentriques, chacun étant fixé à une sphère en mouvement.

Selon Plutarque, les chefs pythagoriciens auraient été capturés et exécutés en 482 av. J.C. par Cylon (puissant personnage de Croton dont on dit qu'il aurait été éconduit par Pythagore). Philolaos et Lysis échappèrent aux attaquants. « [Ils] durent leur salut à la force et à l'agilité de leur jeunesse » (Pléiade, p.490)¹. Philolaos aurait été le maître d'Archytas de Tarente, lui-même maître de Théétète.

Il va donner de l'éclat au modèle de base du Monde en y installant un feu central qu'il nomme *Hestia* et qui vaudra à son système le nom de système pyrocentrique (cf *Mattéi*, p.85).

Voici ce qu'Aristote écrit à propos de Philolaos (qu'il ne cite pas)

La plupart des philosophes assurent que la Terre est située au centre du monde, et, en fait, ce sont tous ceux qui considèrent le Ciel comme fini. D'une opinion différente sont les représentants de l'école italique qu'on appelle pythagoriciens. Pour ces derniers, c'est le feu qui occupe le centre ; la Terre est seulement un des astres et c'est elle qui, par son mouvement circulaire autour du centre, produit le jour et la nuit. En outre, ils construisent une autre Terre, contraire à la notre, qu'ils désignent sous le nom d'Antiterre. (*De Caelo*, II,13,393a).

Sur plusieurs points, les témoignages semblent imprécis ou contradictoires, mais les grandes lignes du système sont les suivantes : une région centrale du cosmos contient trois objets : le feu central (*Hestia*) source de vie et d'énergie autour duquel tournent deux objets : la Terre et son Anti terre (ou *Antichton*). Le feu central n'est d'ailleurs pas visible de la Terre car celle-ci pivote sur elle-même lors de sa révolution, en lui présentant toujours le même hémisphère inhabité ; cette disposition rend de même invisible l'étrange Anti terre, qui circule symétriquement, au delà d'*Hestia*.

A ce sujet, Stobée rapporte ce fragment de Philolaos : « Le premier composé harmonieux, l'Un, qui occupe le centre de la sphère, s'appelle *Hestia* » (in *Pléiade*, 505) (Rappel : l'harmonie est la conciliation des opposés ou des contraires ; elle est codifiée en musique et dans la théorie arithmétique des médiétés).

Aétius (auteur d'un recueil d'*Opinions des philosophes*, sans doute vers le troisième siècle ap. JC, connu sous le nom de Théodoret) nous rapporte ceci :

¹ Il existe de nombreuses versions de ces troubles et attaques contre les pythagoriciens ; on rapporte que Pythagore lui-même aurait péri dans l'incendie criminel commandé par Cylon. On a pensé que Philolaos fut élève du maître et qu'il eut pour élève Platon lui-même, ce qui le pose en une situation de transition entre les origines et l'acmé de la pensée grecque.

« Le pythagoricien Philolaos affirme que c'est le feu qui occupe le milieu de l'Univers puisqu'il en est le foyer ; en deuxième lieu vient l'anti-terre, puis en troisième lieu la terre, habitée, située à l'opposé et tournant à l'inverse de l'anti-terre. C'est ce qui explique que les habitants de la Terre sont dans l'impossibilité de voir ceux de l'anti-terre » (Pléiade, p.497-498).

La région centrale du Cosmos dans laquelle sont situés ces trois objets est appelée *Ouranos* et elle est limitée par la sphère de la Lune, à partir de laquelle se succèdent les sphères des autres planètes jusqu'à la grande sphère cristalline des étoiles fixes au delà de laquelle règne le feu infiniment pur de l'*Olympe*.

Certains Pythagoriciens n'ont donc pas éprouvé de difficultés insurmontables à mettre la Terre en mouvement, même si c'est autour d'un bien étrange foyer central. On a des fragments en ce sens des Pythagoriciens tardifs Hicetas et Ectanphos tous les deux de Syracuse (Pléiade, p.545-46).

Quel besoin avaient-ils d'inventer *Hestia* et l'*Antichton* ? On a remarqué que l'Anti - Terre était utile dans ce système pour expliquer les éclipses de la lune, mais on avance en général une autre raison, plus conforme à la mystique numérologique de cette école : avec ces deux objets (et la sphère des fixes), le nombre total des corps célestes est porté à dix. Le cosmos est ainsi associé à la *décade* nombre sacré des Pythagoriciens, notamment car il est la somme de la tétrade ($10 = 1+2+3+4$). La décade enferme la nature des diverses espèces de nombres, celle du pair (2 le premier), de l'impair (3 le premier), du carré parfait (4 étant le premier d'entre eux). Cet argument numérologique est relevé par Aristote :

« Quand [les pythagoriciens] remarquaient quelque part une lacune, ils se hâtaient d'ajouter un maillon pour assurer la parfaite cohérence de leur système. Je prends ici un exemple : puisque la décade semble être parfaite et embrasser la nature des nombres dans son ensemble, ils affirment que les corps qui parcourent le ciel sont également au nombre de dix ; mais comme l'on en voit que neuf, ils en inventent, pour les besoins de la cause, un dixième, l'anti-Terre. » (*Métaphysique*, A, V, 985a13)

D'autre part, on a déjà, dans le système cosmique pythagoricien, des exposés de la thèse des *deux régions* :

« Le monde se compose de deux parties, l'une immuable, l'autre changeante. La partie immuable s'étend de l'âme qui enveloppe le tout jusqu'à la lune, tandis que la partie changeante va de la lune à la terre » selon Philolaos, via Stobée en un fragment douteux (Pléiade, p.511)

LA GAMME DE PYTHAGORE

Musique et astronomie marchent d'un même pas chez les pythagoriciens, pas réglé par les rapports harmonieux des nombres. Ces relations harmonieuses existent entre les sons émis par une corde de tension constante et dont on fait varier les longueurs dans des proportions simples : rapport deux pour les combinaisons d'octaves ; rapport trois pour les quintes. Or, le cosmos est comme une lyre grandiose où l'intervalle entre la Terre et la lune représente un ton, entre Mercure et Venus, un demi-ton ; entre Venus et le Soleil, une tierce mineure ; entre le Soleil et Mars, un ton ; entre Mars et Jupiter, un demi-ton ; entre Jupiter et Saturne, un demi-ton et entre Saturne et la Sphère des fixes, une tierce mineure ; la rotation des sphères fait vibrer cet instrument Univers en produisant l'ineffable *musique des Sphères* qu'entendait le maître.

THALES VERSUS PYTHAGORE

Si Thales et Pythagore sont proches dans le temps et dans l'espace, comme aussi par l'immense programme de connaissance du Monde qu'ils inaugurent, on a pu les présenter comme

exemplaires d'une opposition radicale. Ainsi écrit A. Koestler dans son superbe et très critiquable ouvrage *Les Somnambules* :

Les philosophes ioniens avaient été matérialistes en ce sens que leur recherche portait surtout sur la matière dont est fait l'Univers ; celle des pythagoriciens concernait principalement la proportion, la forme et le plan, l'eidos et le schéma, la relation et non pas les choses en relation. Le pendule a été mis en mouvement ; on entendra son tic tac tout au long de l'histoire, chaque fois qu'on passera d'une position extrême à l'autre, de « tout est matière » à « il n'y a qu'esprit », chaque fois que les préoccupations changeront de la « substance » à la « forme », de la « structure » à la « relation », des « atomes » au « continu », des « corpuscules » aux « ondes » etc.

Remarque sur la transmission des doctrines :

On a évoqué ici des doctrines, des auteurs et des théories, comme s'il nous était donné de les pouvoir lire et étudier directement ; comme si ceux dont il est question nous avait transmis des livres clairs et plus ou moins complets sur leurs systèmes. Il n'en est rien et de tous ceux-là, nous n'avons à vrai dire presque aucun écrit. C'est le travail immense des historiens, des philologues que d'avoir su reconnaître des fragments épars, des témoignages souvent incomplets et contradictoires d'auteurs postérieurs pour reconstituer, au prix de discussions, de polémiques souvent intenses et encore non closes, les doctrines qu'il est raisonnable d'attribuer à l'un ou à l'autre. Ce formidable et multiséculaire travail d'érudition permet de considérer sans trop de risque d'erreur le tableau de ce que fut la vie intellectuelle et savante au temps de ceux que l'on désigne sous le nom bien vague de présocratiques.

ELEATES ET ATOMISTES - ÉAASTRONOMIE DEDAIGNEE

Aux côtés, mais aussi contre les grandes écoles ionienne et pythagoricienne de la Grèce présocratique, se sont déployées des philosophies qui devaient avoir une énorme influence scientifique mais qui - à un titre ou un autre - marquèrent une manière de dédain, de condescendance envers l'astronomie et les mathématiques.

LES ELEATES

Le premier d'entre eux fut Xénophane de Colophon qui vécut - sans plus de précisions - au VI^{ème} siècle ; les deux autres figures majeures de cette école dont l'influence philosophique fut immense sont Parménide et Zénon d'Elée. Pour Xénophane, tout n'est qu'illusion et vanité et il ne sert à rien de chercher la véritable substance des phénomènes qui s'offrent à nos sens. « La terre, dit-il, s'enracine dans l'infini » et le Soleil, comme les étoiles, n'a ni substance, ni permanence. Il ne s'agit que d'exhalaisons ou de vapeurs nuageuses qui montent de la Terre et prennent feu.

Remarque : ces notions d'exhalaisons ou vapeurs donnant naissance à des phénomènes astronomiques observables demeureront très fortes jusqu'à tard : Galilée s'opposera à Kepler pour soutenir que les comètes avaient des exhalaisons pour cause.

A l'aube, les voilà consumées alors que le soir fait s'élever de nouvelles exhalaisons. Ainsi chaque jour, naît un nouveau et illusoire Soleil qui disparaît chaque soir ; quant à la lune, ce nuage lumineux, il se consume doucement, chaque mois. Selon les régions de la Terre où l'on se trouve, on ne voit d'ailleurs pas les mêmes 'illusions', les Soleils et les Lunes sont multiples autant qu'éphémères.

Toutefois, on a, avec Xénophane, renforcement des arguments en faveur de la sphéricité du tout. A vrai dire, et selon un long passage dû au Pseudo-Aristote (Pléiade, p.99 sq.), c'est la sphéricité de Dieu qui est posée « étant semblable partout, il est sphérique... ».

Avec Parménide (544-450, dates controversées), nous avons à faire à l'un des plus importants philosophes de la Grèce antique. Son poème *de la Nature* fonde une distinction décisive dans l'histoire des idées entre les choses sensibles qui ne sont que les apparences et les choses intelligibles qui relèvent de la vérité profonde mais cachée du seul objet de méditation qui importe véritablement, *l'être*. On retrouve, à nouveau, la quête de l'*arché* primordiale, comme chez les philosophes ioniens ; mais il s'agit en vérité de bien autre chose que cet élément primordial (eau, air ou feu) qui, en se transformant, génère les autres éléments. Le principe de Parménide n'est pas une substance, ou un élément privilégié, il désigne ce qui subsiste quand les choses changent, ce qui demeure inaltéré et réel au delà des transformations apparentes ; c'est *l'être (to on)* qui s'oppose au *non-être*.

Ainsi des phénomènes astronomiques ; changeants par excellence (quoi que, comme on le verra, il soit possible de les décrire comme « en mouvement, mais sans changement, inaltérables ». Telle sera la doctrine d'Aristote), ils ne relèvent pas de cette réalité essentielle des choses. Quel savoir leur appliquer ? Il y a - admet Parménide - une science possible de ces phénomènes qui peuvent bien avoir leurs lois, mais c'est une science des illusions. 'A cette nuance près', les éléates s'accordent avec la cosmologie pythagoricienne ; comme les partisans de cette dernière, ils considèrent que la Terre est sphérique mais ils la placent au centre du Monde où elle se maintient en équilibre " puisqu'il n'y a pas de raison qu'elle aille ici plutôt que là ". Ils adhèrent également au grandiose système des sphères homocentriques, emboîtées à partir de la sphère des étoiles (système auquel Aristote donnera toute sa puissance). On attribue souvent à Parménide l'origine de la thèse selon laquelle la lumière lunaire est empruntée à celle du Soleil. Quoiqu'il en soit, on n'oubliera pas la condescendance dédaigneuse de ces philosophes pour une science qui ne concerne que les apparences sensibles et n'atteint pas l'être des choses. C'est l'une des facettes de la conception et de la solide tradition selon laquelle il n'y a pas de science de ce qui change.

LES ATOMISTES

L'atomisme contemporain se plaît à reconnaître en Leucippe, Démocrite, Epicure puis Lucrèce ses lointains mais bien authentiques ancêtres. Lorsqu'il voulu réhabiliter la doctrine atomiste au XVII^{ème} siècle, le philosophe Pierre Gassendi (1592-1655) s'appuya aussi sur ces même anciens. Il n'est donc absolument pas exagéré de soutenir que les théories atomistes de l'antiquité ont eu une influence primordiale et ont puissamment marqué l'histoire des sciences, de la physique en particulier.

Ayant vécu à la période qui nous occupe - avant Socrate donc (ou tout juste contemporain)- il y eu d'abord l'ancien maître, Leucippe, dont, à dire vrai, on ne sait rien de certain : il n'est pour nous qu' "une silhouette mystérieuse ". Démocrite d'Abdère, le véritable fondateur de l'atomisme, naquit en 460. Il fut heureux, d'un tempérament enjoué et chaleureux et vécut très vieux (jusqu'en 370 ou même plus tard). Il voyagea énormément et semble avoir eu beaucoup d'amis et de nombreux ennemis ; une vie bien remplie donc qu'il aurait lui-même interrompue en cessant de s'alimenter. Sa théorie est fondée sur une proposition essentielle : l'Univers est formé d'atomes et de vide.

La cosmologie des atomistes est à la fois grandiose et déficiente : grandiose puisqu'ils n'hésitent pas à soutenir que l'Univers est infini et n'a pas de centre ; au sein de cet univers vide, des atomes en nombre infini se choquent en tous sens et lorsqu'un grand nombre d'entre eux se rassemblent en un vaste tourbillon, celui-ci s'entoure d'une sorte d'enveloppe qui devient la frontière d'un Monde en constitution. Les atomes de ce monde s'organisent ; les plus lourds vers le centre pour donner naissance à une Terre semblable à la notre, comme un disque plat ; les

plus légers restent plus lointains et forment l'atmosphère et les cieux. En réalité les doctrines au sein de l'atomisme sont différenciées :

Pour Démocrite, il n'y a pas de pesanteur, mais seulement des chocs et impulsions

Pour Epicure (-341 ; -270), la lourdeur ou légèreté est une qualité caractéristique des atomes.

La question de la taille des atomes est aussi ouverte : ils peuvent être immenses pour Démocrite, pas pour Leucippe.

« Comment tombent-ils pour former un monde ? » est aussi une question délicate : le tourbillon ne doit-il pas laisser place à une certaine communauté de direction de « chute » ; ainsi Aristote dira qu'ils y a là une position originale puisque l'action et la passion peuvent concerner les semblables. Ce sont des mouvements de même direction –le semblable s' associant au semblable- qui permettent de s'agglomérer en un monde, un cosmos.

Une divergence majeure opposa (vers le IV^e siècle) deux doctrines : ceux qui, d'un côté, estimaient que l'univers avait un centre, qu'il était symétrique et homogène autour de ce centre : si les objets lourds tombent, disaient-ils, c'est parce qu'ils ont une tendance naturelle à rejoindre le centre de l'univers, c'est-à-dire le centre de la Terre. Cette idée militait fortement en faveur de la forme sphérique ; il n'y a pas de haut et de bas dans l'univers. Ce fut le point de vue de Platon et surtout celui d'Aristote. Les atomistes leur opposèrent la doctrine du mouvement de chute des atomes : ces particules élémentaires, issues du chaos primitif tombaient parallèlement (ou à peu près) vers le bas, c'est-à-dire perpendiculairement au sol terrestre. Ceci est cependant une commodité de présentation, car en fait, pour Démocrite, explicitement, il n'y a pas de haut et de bas : « Dans le vide infini où il n'y a ni haut, ni bas » (*De finibus*, cité in H.G.S., vol.I, p.219). Il y a toutefois, dans le processus de constitution d'un cosmos, une direction privilégiée fruit du hasard et du destin. Ainsi, Epicure reprit-il la théorie de la Terre plate. Selon Aetius, « Démocrite dit que la figure de la terre est en forme de disque dans sa largeur, mais concave au milieu » (frag. XCIV, Pléiade, p.793).

Selon Agathéméros, (géographe du deuxième siècle),

« Vinrent ensuite Démocrite, Eudoxe et d'autres qui écrivirent des voyages et des navigations autour du monde. Les anciens décrivaient la terre habitée comme ronde ; au milieu ils plaçaient la Grèce, et Delphes au centre. Car Delphes est le nombril de la Terre. Cependant Démocrite, homme de grande expérience, fut le premier à concevoir que la terre est oblongue, et une fois et demi plus longue que large. Le péripatéticien Dicéarque est d'accord avec lui sur ce point ».

Lucrèce (bien plus tard) tentait encore la défense de cette forme de la terre en ridiculisant l'idée de créatures qui vivraient la tête en bas, aux antipodes. Les atomistes perdirent la partie : leur astronomie était trop grossière, leur doctrine s'estompa ; elle ne devait renaître très fortement qu'après 2000 ans de purgatoire.

L'organisation du monde selon les atomistes n'est cependant pas éternelle et un temps arrive où les atomes se dissocient à nouveau et où ce monde se disperse alors que d'autres, en diverses régions de l'Univers naissent et meurent de la sorte.

Pour le reste, on n'aura pas d'astronomie constituée spécifiquement atomiste et c'est en cela qu'on peut parler de déficience de la doctrine atomiste relative au système du monde; elle est très en retrait par rapport aux doctrines précédentes ou contemporaines. On ne sait pas à quelles lois générales se conforment les mouvements des astres ni quelle est l'architecture plus précise de notre Monde.

On lit souvent que, selon Sénèque, Démocrite ne se prononçait pas sur le nombre des planètes. Il n'est toutefois pas sûr qu'il faille y voire autre chose qu'une saine prudence; voici ce que dit précisément le fragment XCII de Sénèque (*Questions naturelles*, Pléiade, p.792)

« Démocrite soupçonne l'existence d'un grand nombre de planètes, mais il n'a défini ni leur nombre, ni leur nom parce qu'on ne connaissait pas encore les trajectoires des cinq planètes ».

On doit à Démocrite un des premiers importants catalogues d'étoiles et pas mal de remarques sur les solstices, calendriers, cycle métonique etc. Le sage Méton avait découvert, au V^e siècle av. J.C. que 235 lunaisons faisaient exactement 19 années ce qui paraissait apporter une base solide pour une solution satisfaisante du problème de calendrier.

Les atomistes nous en disent plus à une échelle plus grande que le Monde, c'est à dire à l'échelle d'un Univers infini, de mondes multiples et, à l'autre extrémité, ils nous en disent aussi davantage sur la structure de la matière, la taille, la forme et les propriétés des atomes ; mais, à l'échelle intermédiaire, celle de notre cosmos, ils sont peu explicites.

L'atomisme antique fut presque immédiatement étouffé et réduit au silence ; les deux géants de la philosophie qui suivent Démocrite s'y prennent différemment contre lui ; Platon l'ignore absolument et superbement (alors qu'il connaissait fort bien ses doctrines) et Aristote accumule les critiques anti atomistes. Certains auteurs pensent - avec sans doute quelque raison - que cette indigence, cette faiblesse de l'astronomie atomiste, explique le faible impact de cette admirable doctrine jusqu'à sa double renaissance, au XVII^{eme}, puis au XX^{eme} siècles. Pour marquer et influencer la philosophie et la science qui allait éclore, il ne fallait pas faire l'impasse que firent les atomistes ; il ne fallait pas ignorer la terre et nos cieux.

Remarque

Toutefois certains systèmes philosophiques médiévaux ont des points communs avec celui de Démocrite. Le plus célèbre d'entre eux est, dans le monde arabo-islamique celui de théologiens philosophes, les mu'tazilites (VIII - Xe siècle de l'ère chrétienne), qui considéraient que les corps sont constitués de multitudes finies ou infinies d'atomes inétendus représentables par des points géométriques.

HERACLITE D'EPHESE (576-480)

Longtemps appelé Héraclite l'obscur, en raison des difficultés d'interprétation de ses aphorismes, il fut 'redécouvert' par Hegel qui voyait en lui le père de la dialectique (au sens moderne du terme). Il polémiqua violemment contre Pythagore et sa doctrine de la réalité des multiplicités. S'il accepte - semble-t-il - de reconnaître le feu, ou la foudre, comme élément primordial, c'est parce que celui-ci impose la fugacité à toute chose qui finit consumée avant de renaître. Pour Héraclite, rien n'est stable ni ne demeure, sinon le changement lui-même. Les opposés (chaud/froid, vivant/mort par exemple) ne se complètent pas, mais sont en guerre perpétuelle et la réalité qui vaut est l'unité de cette opposition. Si l'on ne connaît pas de cosmologie générale chez Héraclite, on en imagine l'orientation d'ensemble lorsqu'il nous enseigne que le Soleil, par exemple, n'est pas un objet persistant mais le produit d'un processus de transformation, une forme qui s'élève dans les cieux, sous l'effet de la puissance générale du feu qui l'embrace. La doctrine du flux héraclitéen, selon lequel « tout est en mouvement », eut un succès important (voir par exemple Platon, *Théétète* 180-183).

Remarques sur Empédocle (~490, ~435)

Très forte influence (la synthèse majeure). La théorie des quatre éléments (en raison de la tétrade ? des quatre polyèdres connus ?), ajoutés à un dualisme fondamental entre deux puissances ou principes : l'Amour et la Haine opposés irréconciliables en cycles continus de quatre périodes : règne de la Haine, remontée de l'Amour, règne de l'Amour, remontée de la Haine etc. Il serait mort en se jetant dans l'Etna.

L'astronomie des sphères. Platon.

Aristote.

PLATON

REMARQUES GENERALES

Quelques remarques sont nécessaires avant d'examiner ce que l'on pourra entendre par astronomie platonicienne. En tant qu'elle concerne les phénomènes (au sens propres, ce sont les trajectoires visibles des planètes), il n'est pas sûr qu'elle intéresse le diadoque de l'Académie. Un passage de *La République* pose clairement le problème.

“ Par conséquent, si la géométrie nous oblige à contempler l'essence, elle nous convient ; si elle s'arrête au devenir, elle ne nous convient pas... Nous étudierons l'astronomie comme la géométrie, à l'aide de problèmes, et nous laisserons les phénomènes du ciel, si nous voulons vraiment saisir cette science, et rendre utile la partie intelligente de notre âme, d'inutile qu'elle était auparavant ” (*La République*, livre VI, 526 ou 530 vérifier).

Comme on le sait, quatre régions sont distinguées qui correspondent à des genres de savoirs bien hiérarchisés.

La République (Livre VI, 509 d-511e) donne la topologie de la connaissance entre le visible et l'intelligible, eux-mêmes partagés par l'obscurité et la clarté. (Echange entre Socrate, Glaucon et Adimante, frères de Platon)

Il en ressort un tableau où quatre régions se succèdent:

Région du Visible	D. Région des images (ombres, reflets...) connues par conjecture. Images des choses sensibles.	Opinion
	C. Région des choses physiques et corps vivants connus par croyance. Choses sensibles.	
Région de l'intelligible	B. Région des êtres mathématiques connus par pensée discursive.	Science
	A. Région des Idées ou "principes" connus par science	

A prendre strictement, la région des choses physique est exclue de la science et la région des êtres mathématiques est hybride. Cependant, il est possible de valoriser les *lois* mathématiques elles-mêmes, sans oublier leur statut intermédiaire. Platon insiste bien sur le statut d'apprentissage de la dialectique des mathématiques, sur la possibilité d'y procéder par intelligibilité, et finalement sur leur nécessité, raison pour laquelle on considèrera qu'elles peuvent être connues par science. “ Que nul n'entre ici s'il n'est géomètre ” lisait-on à l'entrée de l'Académie. Les géomètres savent raisonner par hypothèses, par définitions générales, par déductions universellement valides.

Ceci établi, elles entraînent “ vers le haut ” une part du monde matériel et des phénomènes qui s'y déploient. Aristote insistera sur le statut « intermédiaire » et « séparé » de ce domaine pour

critiquer systématiquement la doctrine platonicienne de la science. On soulignera que cette thèse justifie pleinement que les mathématiques ont un rôle à jouer dans la connaissance du monde matériel et que l'on ait pu parler de programme de mathématisation du réel ou de la nature chez Platon. (Cf. *République*, VII, 533a-534a, p.292).

Remarque : Galilée, Kepler notamment, mèneront leur entreprise de transformation du système du monde et de la connaissance que nous pouvons en avoir, au nom d'un *retour à Platon*.

Il existe bien des passages où l'adéquation des mathématiques à certaines classes de phénomènes se trouve fortement valorisée (ces phénomènes relèvent de l'astronomie, l'optique et la musique).

Le mythe d'Er, qui clos la *République* (X, 614 a sq. On y rencontre Er, soldat tué au combat qui aurait eu le privilège d'observer la machinerie céleste puis de revenir à la vie de telle sorte qu'il puisse porter témoignage de ce qu'il a contemplé de l'architecture du monde) et surtout le mythe du *Timée* (où l'on est instruit de la fabrication de l'âme puis du corps du Monde par le Démon, qui œuvre à la manière d'un artisan), installent la connaissance des *lois de l'astronomie* dans la philosophie platonicienne.

Maurice Caveing insiste sur cet aspect des relations entre les régions du savoir chez Platon, en astronomie comme pour l'harmonie musicale :

L'astronomie est la théorie mathématique qui, à partir de la géométrie de la sphère (et de la théorie des proportions), détermine quels mouvements circulaires sont susceptibles de rendre compte des apparences, c'est-à-dire de sauver les phénomènes. Elle a donc pour tâche de construire des modèles cinématiques. Le son est l'effet sensible d'un mouvement physique qui a son siège dans l'air. L'harmonie est la théorie mathématique qui, à partir de l'arithmétique des rapports, détermine quels intervalles produisent un effet musical, c'est-à-dire quels rapports de nombres entiers procurent les consonances et les accords. Elle a pour tâche de construire des modèles de gammes " (*Platon et les mathématiques*, p.18).

On pourra présenter les choses ainsi:

- la géométrie idéale a un pendant dans la région C, l'astronomie qui se connaît par la géométrie de la sphère et du cercle.

- l'arithmétique idéale a un pendant dans la même région; l'harmonie qui, à partir de l'arithmétique des rapports détermine les intervalles produisant des effets musicaux.

La différence au sein de ces deux couples respectifs tient à la présence du mouvement, ou plus exactement du changement dans chacun des seconds termes des couples.

On retiendra donc ceci : si des lois existent relativement aux phénomènes, elles ne se découvrent pas par un examen direct de ceux-ci ni par le témoignage des sens à leur sujet. Au sens strict, ce qui est changeant n'est pas objet de science, mais d'opinion (fut-elle droite, ou même objet de connaissance discursive). Il s'agit de découvrir, par spéculation rationnelle, des lois abstraites qui correspondent aux idées, aux formes (soit le plan du créateur) dont ces " phénomènes " sont l'apparence. L'intermédiaire entre les idées et les phénomènes est justement la science mathématique ; c'est elle qui pourra nous dire le vrai –c'est-à-dire nous faire contempler les idées – correspondantes aux apparences de ce monde.

Pierre Duhem écrit ceci :

« Pour acquérir quelque connaissance de ces réalités permanentes (les essences spécifiques), il y a un raisonnement bâtard, intermédiaire entre la connaissance rationnelle et la connaissance sensible, c'est le raisonnement géométrique. Lorsqu'aux qualités tangibles et visibles des corps concrets, il aura substitué les propriétés physiques de certaines figures, il (Platon) aura la conviction qu'il contemple quelque chose de l'absolue réalité des essences spécifiques » (P. Duhem, *Le système du monde*, I, p. 46).

Il est donc nécessaire, tant du point de vue de la progression proprement philosophique (vers les principes premiers) que du point de vue de la connaissance des choses, d'approfondir les mathématiques pour elles-mêmes. La notion fondamentale de *logos* (le rapport) est intensément présente dans le platonisme : c'est elle qui préside aux mélanges fondamentaux des genres de l'être (le même, l'autre et le milieu ou encore le divisible, l'indivisible ; ou encore les zones du sensible et de l'intelligible ainsi que leurs intermédiaires ; c'est encore la théorie des rapports qui explique les structures du monde, de son âme et de son corps.

Il convient aussi de rappeler qu'au sein de l'Académie de Platon fut complètement transformée la doctrine pythagoricienne des rapports et des proportions. Il était apparu que les seuls rapports de nombres (entiers) ne suffisaient pas à exprimer les rapports des choses (y compris de certaines très immédiates comme la diagonale du carré et son côté). Le domaine d'intelligibilité des rapports pythagoricien est étendu et d'une certaine manière, la " crise des irrationnelles " est dénouée (on trouve ses traces dans le *Théétète*. Cf. ici, la démonstration de l'irrationalité de $\sqrt{2}$. *Premiers analytiques* I, 23, 41a).

Comme l'écrit Ch. Mugler (in Taton 1, p 256) :

" Eudoxe, par sa nouvelle conception du *logos* mathématique, ramènera l'irrationnel dans le champ des notions stables ". Il est à peu près certain que Platon aie contribué à cette extension d'intelligibilité. Le *logos* n'est plus enchaîné à un modèle selon les nombres entiers. Il est une possibilité, entre des homogènes, de manifester des proportionnalités. (*Parménide* 140 b-d ; *Hippias majeur*, 303 b ; *Lois*, VII, 819d-820b ; *Epinomis* 990c-991a)

L'univers matériel (du moins certains de ses constituants) est donc en ce sens *soumis à des lois* et, partant, susceptible de connaissance rationnelle. On a donc souvent soutenu que la science (et singulièrement l'astronomie) était, chez Platon, très générale et ne s'occupait pas du détail.

Comme le note Julia Annas (in Dictionnaire *Le savoir grec*)

« Platon le répète (surtout dans *La République*), la connaissance qui l'intéresse, toute abstraite qu'elle est, doit aboutir au gouvernement du monde réel » (p.741)... Dans le *Philèbe*, la méthode mathématique et les mathématiques demeurent importantes parce qu'elles ont le pouvoir de faire progresser les arts et les techniques et aussi comme modes de pensée supérieur à toute manière empirique » (p.742).

Ici la remarque sur Le Platonisme de Galilée et le " retour à Platon ". (Archimède-Platon versus Euclide-Aristote). Ou encore, comme le dit Ernst Mach « Dans sa caverne, avec ses ombres, l'homme n'en est pas moins un fameux astronome ».

ASTRONOMIE PLATONICIENNE

L'ordre des choses et des changements est tel, en raison d'un plan et d'un but général du démiurge. Cette vision téléologique délivre un monde qui résulte de la fécondation de la matière par les idées, elles-mêmes soumises à l'action organisatrice de la pensée divine.

Au-delà des difficultés d'interprétation et des variantes selon les passages considérés (dans *La République*, *Le Timée*, *Les lois* et *l'Épinomis*), ce qui est important est que la structure du cosmos correspond à un principe ou une loi finale. Il résulte du plan divin qui permet d'y découvrir (par voie mathématique) une intelligibilité. Le cosmos est donc connaissable et ordonné. C'est un cosmos géométrique.

Je m'arrête surtout au *Timée*

Nous devons être attentifs à la longue mise en scène qui introduit l'exposé. Timée, Hermogate et Critias discutent avec Socrate. C'est la suite d'un « banquet oratoire » commencé la veille et qui se poursuivra. Récit dans le récit où interviennent les anciens sages égyptiens (prêtres) ayant transmis la doctrine à Solon qui lui-même l'a transmis à Critias l'ancien qui l'a enseigné à Critias le jeune, à Timée et Hermogate.

Timée va parler car c'est « celui d'entre nous qui est le plus versé en astronomie et a fourni le plus de travail pour pénétrer la nature de l'Univers » (27a)

La géométrie des solides réguliers livre les secrets de la composition des éléments matériels, comme la géométrie du cercle et de la sphère livre les secrets des phénomènes célestes.

La distinction de ces deux moments platoniciens est très claire dans le *Timée*. La construction du cosmos est celle de l'âme du monde puis du corps du monde.

Le démiurge lui-même prépare et forge l'âme du monde, pour y faire régner les principes des mouvements fondamentaux (rotation de la sphère des étoiles, puis celles des astres, suivis de la situation de la terre)

La construction de l'organisation de la matière selon les polyèdres est celle du corps du monde, cette organisation, faite à partir d'objets dont a disposé le démiurge, est réalisée par l'âme du monde, qui agit sur la nécessité faite de polyèdres et sur la matière primordiale.

« Et naturellement aussi ils sont ajustés suivant des rapports de proportion, parce que le dieu quant à lui a partout réalisé avec exactitude les proportions qu'entretiennent leurs nombres, leurs mouvements et leurs autres propriétés, dans la mesure où la nécessité le permettait en s'y prêtant volontiers ou en se laissant persuader » (*Timée* 56c).

Une sphère parfaite (celle du *Même*) est posée comme limite du monde. Et l'âme, où Dieu, va la mettre en mouvement.

“ La figure donnée par Dieu à l'Univers est la plus parfaite, celle qui est toujours et partout semblable à elle-même; partant, la plus belle, celle de la sphère. A ce monde sphérique, il a attribué le mouvement qui lui convient le mieux : le circulaire ” (*Timée*, 33-34 On peut citer plus longuement).

La thèse de la sphéricité (systématiquement associée au mouvement qui lui convient, la rotation uniforme) est le leitmotiv de ce cosmos. Associée à la première sphère, mais distincte d'elle, une série de sphères concentriques, emboîtées les unes dans les autres, permet le mouvement respectif des planètes qui y sont accrochées ; les planètes sont elles aussi sphériques. On trouve donc chez Platon, le fond général de la cosmologie des sphères homocentriques.

Tel est donc le schéma de formation du monde sensible, qui est un Dieu, ou plutôt qui représente un Dieu éternel. *Timée* (32 sq.) Celui-ci façonne un monde « à son image »

Revenons sur les principes qui ont permis cette architecture (35 a) :

L'âme du monde est obtenue par mélange de trois notions : l'Être, le Même et l'Autre (voir Luc Brisson, p. 36). Le Même « Être indivisible et qui reste toujours le même » et l'Autre « Être divisible qui devient dans les corps ».

Le mélange du Même et de l'Autre, qui est une troisième forme d'être, peut être mobilisé pour concevoir deux autres ingrédients de cette création :

la nécessité (anagké) sorte de causalité mécanique qui offre une certaine résistance au travail du démiurge (une certaine limitation),

le matériau (khora): réceptacle, porte-empreinte, matériau sans aucune forme, espace qui reçoit les corps ; il est dit qu'il « participe de l'intelligible d'une façon particulièrement déconcertante » (*Timée*, 51 a). La *khora* est donc ce de quoi et ce en quoi est fait le monde sensible. Ce matériau est dit encore « réceptacle du devenir ».

Tout l'étant est constitué de mélange de ces trois genres d'être.

Selon Boèce (et Nicomaque) « le monde est l'œuvre d'un Dieu ...dont l'intention première , en créant l'Univers aurait été d'ordonner et de rendre harmonieux ce qui ne l'était pas, à savoir la matière primordiale ($\chi\omega\rho\alpha$) (*Timée*, 29a, 30a-b, 35b, 36b, 36^e, 37a, 56c et *République*,VII, 522c-531c)

Le processus de fabrication commence par la formation d'une double bande, la première homogène sera dite celle du Même ; l'autre divisée selon des proportions d'une grande précision (*cf. Timée* 36 b,c) sera dite celle de l'Autre.

On (Duhem par exemple) a pu interpréter l'espace du cosmos, entre les deux bandes du Même et de l'Autre, comme justement ce mélange, cette troisième façon d'être.

La nature « mélangée » de l'âme du Monde la situe comme être intermédiaire, et à ce titre, très adéquate aux mathématiques dont c'est précisément aussi le statut.

Les deux bandes de départ sont jointes puis recourbées en cerceaux parfaits, obliques l'un sur l'autre et animées d'un mouvement de rotation uniforme.

La révolution extérieure, celle du Même est sans division, elle a la prééminence

L'intérieure est divisée « à six reprises pour former sept cercles inégaux» (36 d) animés de mouvements bien déterminés :

« Il prescrit que ces cercles aillent en sens inverse les uns des autres avec des vitesses différentes les unes par rapport aux autres ...mais suivant un mouvement réglé » (36d). Voir les annexes 2 à 4 in Luc Brisson, p.284 sq.

Remarque importante :

le cercle du même (celui des étoiles) est associé à la connaissance « par intellection et science » (37c),

le cercle de l'autre et ses divisions est associé à la connaissance « par opinions et croyances, fermes et vraies ». (*id.*).

De plus, ce vivant créé, forgé est *dérivé* du vivant éternel et modèle (le Dieu) et son mode d'éternité n'est qu'une représentation de la première ; ce mode est « ce que nous appelons le temps » (37d).

C'est pour réaliser ce temps que sont alors créés les astres « qui sont apparus pour définir et conserver les nombres du temps » (38c). C'est ici l'occasion pour Platon de présenter le thème de la « grande année » qui est la vraie mesure du temps, il est clairement évoqué (39d, p.130-131).

La terre au centre (selon certains auteurs, van der Waerden, en 40 b-d, on aurait une terre en rotation sur son axe ; ce n'est pas l'avis de Brisson) ; viennent dans l'ordre la lune, le Soleil, Vénus, Mercure, Mars, Jupiter et Saturne.(38c,d). Cet ordre est celui qu'auront adopté Platon Eudoxe, Aristote, et avant eux, Anaxagore et les pythagoriciens. Il sera abandonné à partir de Ptolémée pour l'ordre Lune, Mercure, Venus, Soleil, Mars, Jupiter, Saturne. (J.J. Szczeciniarz, *Copernic et la révolution copernicienne*, Flammarion, 1998, p.206)

Remarque importante :

La recherche des lieux et des raisons de l'installation de plusieurs des astres est dite *laborieuse* et jugée *accessoire*. « Peut-être trouverons-nous le loisir de faire l'exposé qu'ils méritent » (38e).

Les astres sont ainsi emportés par un double mouvement (sans préjuger de complications supplémentaires à venir): celui du Même qui entraîne le tout et celui qui –variable de l'une à l'autre des planètes- leur est assigné par l'Autre. La combinaison des deux produit des trajectoires complexes :

« Aussi, en raison du mouvement du Même, les corps qui ont la révolution la plus rapide semblaient-ils être rattrapés par les plus lents, alors qu'en fait ils les rattrapaient. En effet, entraînant sur son axe l'ensemble des cercles que ces corps décrivent, le mouvement du Même leur donnait l'apparence d'un hélice, étant donné que, dans deux plans, ces corps devaient avancer en sens inverse simultanément » (39a).

De ceci résulte pour les astres, des « courses errantes qui sont prodigieusement nombreuses et extraordinairement variées » (39d). Très important :

« Or décrire les danses de ces mêmes corps célestes, leur juxtaposition les unes avec les autres, déterminer les rétrogradations et les progressions de leurs courses circulaires les unes par rapport aux autres, dire quand elles se trouvent en conjonction, lesquelles de ces divinités se mettent les unes devant les autres et combien se trouvent à l'opposite, montrer lesquelles se font l'une à l'autre écran et au bout de quel temps chacune se cache à nos yeux pour de nouveau reparaître, provoquant ainsi l'effroi et fournissant des présages sur les événements à venir aux gens qui ne sont point capables de les prévoir grâce au calcul, expliquer tout cela, ce serait peine perdue, si on n'avait pas sous les yeux une représentation mécanique des mouvements considérés » (40 c,d, cf. p.132)

Il faut enfin ajouter à ceci les rotations axiales des planètes.

Dans *La République*, (livre X, chap. 3, 614b-617) mythe d'Er, on a quelques précisions concernant les ordres des planètes.

Er, soldat pamphylien mort au combat, son corps ne s'altère pas et il ressuscite au 12^e jour. Il fait le récit de son séjour en tant que mort. Les âmes, après leur séjour au ciel ou sous terre, vont –en quatre jours- dans un « endroit » où elles contemplant le cosmos.

Une lumière traverse le ciel et la terre. Cette lumière « est ce qui assemble et lie le ciel unissant ensemble sa révolution tout entière, à la façon du bandage des trières » (615 b)

« Ils virent d'autre part, tendu à partir des extrémités, le fuseau de la Nécessité, par le moyen duquel la rotation est imprimée à toutes les révolutions »

Vient la description du fameux *peson* (615d) Trad. Robin, Pléiade.

« pour l'aspect extérieur, cette nature était exactement celle des pesons d'ici bas mais il faut prêter attention aux éléments dont, disait-il (Er) il était composé et de la façon que voici : supposons que, dans un unique grand peson, taillé en creux, se trouve, exactement emboîtés,

adapté, un second peson pareil, plus petit, à la manière de ces récipients qui s'emboîtent les uns dans les autres ; puis de la sorte un troisième encore, un quatrième, quatre autres enfin. Huit, c'était en effet le nombre total des pesons enchâssés les uns dans les autres... »

Suit un passage très dense et complexe avec plusieurs ordres des cerceaux ou sphères planétaires.

Il faut considérer quatre ordres : succession des planètes, rang des distances entre les sphères de circulation, rang des couleurs, rang des vitesses de révolution. (Voir le tableau établi par Robert Baccou, note 769, p.487 de son édition de *La République*).

« Il est certain que Platon a emprunté la plupart de ces données aux astronomes de son temps. Mais il les combine, ce semble, de façon très libre pour obtenir certaines relations numériques [...] Il est permis de supposer que, par ces combinaisons symétriques, Platon a voulu montrer que dans le système céleste, tout est réglé selon un ordre et un équilibre parfaits. Qu'il s'inspire ici des doctrines pythagoriciennes, il est à peine besoin de le signaler. Mais il est pleinement d'accord avec les principes qu'il a posé au VII^e livre (cf. les remarques p. 18, dans « pourquoi enseigner l'astronomie ? », *République*, VII, 529), et la méthode *a priori* qu'il applique est bien celle que doit suivre, selon lui, le véritable astronome. » (*Id.* et plus de détails).

On aura observé que le cosmos platonicien est animiste : ces astres sont vivants et ils participent de l'animation générale universelle. Leurs mouvements ne diffèrent pas de ceux de l'intelligence. Lire encore *Timée* (38c-39a) ou *Epinomis* (985 sq.).

Remarque sur les passages cosmologiques du *Phédon*, 110-112, avec une *terre supérieure, séjour des bienheureux*.*

Remarques sur le corps du monde et les solides réguliers

Les pythagoriciens connaissaient-ils les cinq polyèdres réguliers, le tétraèdre, le cube, l'icosaèdre, l'octaèdre et le dodécaèdre (selon Eudème de Rhodes, oui). On croit qu'elle est due à Théétète qui en aurait, le premier, donné la démonstration et la construction. En tout cas, elle est exposée tout au long au cours du livre XIII des *Eléments*. (cf. la démonstration).

Le caractère le plus efficient de ces solides est alors la forme des surfaces, les *limites*. Chez Euclide, on trouve les deux importantes définitions suivantes : (I, 13) : *Une frontière est ce qui est limite de quelque chose*. Et (I,14) *Une figure est ce qui est contenu par quelque ou quelques frontières*. La forme est décisive pour constituer les éléments et pas une hypothétique matière distincte selon les cinq solides. Les *limites* sont décomposées en triangles élémentaires de deux sortes : isocèles (dans les faces carrées) et *scalène* dans les autres. Ce sont les ultimes éléments de l'Univers. Et les lois de celui-ci découlent de leurs propriétés géométriques.

Les quatre éléments d'Empédocle correspondent à quatre d'entre eux

Le tétraèdre est la figure élémentaire du feu, le plus subtil, le plus léger, le plus piquant de tous les corps.

L'octaèdre est celle de l'air, l'icosaèdre de l'eau, le cube enfin, celle de la terre.

Cette théorie est délicate et sujette à des interprétations variées (les figures élémentaires pourraient bien correspondre aux divers états de la matière). Le détail des compositions et décomposition est affaire de spécialistes. Ce qui ne l'est pas est l'idée selon laquelle la forme géométrique et les conjonctions qu'elle permet commandent à la substance matérielle et à ses composés, qui commande donc aux qualités des corps (exemple *Timée*, 55d). On a pu rapprocher ceci des doctrines atomistes démocritéennes dans lesquelles l'adaptation des atomes entre eux, commandé par des considérations géométriques, peut jouer un rôle analogue.

Cependant 1) pas de plan général organisateur et créateur chez Démocrite. Les atomes sont éternels.

2) Ils ont toute sorte de forme et de taille, plus variées en tout cas que les cinq polyèdres.

Le cas du “ cinquième élément ” est bien intéressant

« Il restait une seule et dernière combinaison : Dieu s'en est servi pour le tout, quand il a dessiné l'arrangement final » (*Timée*, 55c), ou, traduction Brisson : « il restait une seule construction, la cinquième ; le dieu s'en est servi pour l'univers, lorsqu'il y peignit les figures animales ».

Propriétés remarquables avec ses douze faces pentagonales ; il se rapproche de la sphère, solide parfait qui enferme le cosmos. C'est là une des origines de la notion d'Ether, ou quintessence.

On connaît deux fragments pythagoriciens de Philolaos où cette idée est présente :

Un, selon Aetius (*Présoc.* p.497, XV) :

Pour Pythagore, il existe cinq figures de volumes, qu'ils appellent encore mathématiques : le cube qui, selon lui, a produit la terre ; la pyramide qui a produit le feu ; l'octaèdre qui a produit l'air ; l'icosaèdre qui a produit l'eau et le dodécaèdre qui a produit la sphère de l'univers. (*Opinions*, II, vi,5)

L'autre de Théon de Smyrne (*Présoc.*, p.506, XII)

Les corps de la sphère sont cinq : le feu, l'eau, la terre et l'air, qui sont contenus dans la sphère, auquel s'ajoute un cinquième, la coque (l'Ether?) de la sphère. (*Commentaires*, ed. Hiller, 18, 5)

Des couches correspondants aux Eléments remplissent ce cosmos et délimitent deux régions : sublunaire et supra-lunaire. Les trois premières couches, jusqu'à la lune, correspondent à la Terre, l'Eau, et l'air. Ce monde est dominé par les apparences. Au delà, lieu du feu, associé aux idées et aux formes.

Avec l'Epinomis, on a un cinquième élément l'éther, entre l'air et le feu, (981c-984d)

Si l'idée générale de la machinerie céleste est stable, les difficultés réelles qu'elle présente étaient bien connues de Platon. Nous le voyons dans deux passages notamment : le mythe d'Er, (*République* X, 616-617, avec les axes *en cône*) et aussi dans *Timée* où, à propos de mercure et vénus, il écrit qu'ils

“Reçoivent une impulsion de direction contraire à la sienne (du soleil). De là vient que le soleil, l'astre du matin (Vénus) et celui d'Hermès, se rattrapent tour à tour, et sont rattrapés les uns par les autres, suivant une loi constante ”.

SAUVEZ LES PHENOMENES ! UN PROGRAMME PLATONICIEN ?

Des principes suprêmes le Même, l'Autre, genres de l'être. Un dogme esthétique et métaphysique, la circularité et la régularité. Le savoir produit par ces réflexions est de l'ordre de la science ; il vise les réalités supérieures et les idées.

D'autre part : des observations : le nombre des astres, les mouvements apparents. Quelles sont plus précisément ces apparences ?

« Les apparences, c'est l'alternance du jour et de la nuit, l'alternance des saisons, la variation de durée des jours et des nuits au cours de l'année, le mouvement quotidien des étoiles, la double révolution du soleil, en un jour le long des cercles parallèles, en un an le long du cercle oblique de l'écliptique (cf. dessin); c'est aussi le mouvement compliqué des planètes avec leurs stations et apparentes rétrogradations ».

Il s'agit de concilier les deux et le magnifique du programme réside justement là. Concilier veut dire comprendre les seconds par les premiers. Un genre de savoir y est adéquat : la géométrie et les proportions.

Ces mouvements complexes relèvent de lois constantes. Comment les connaître : c'est un programme qu'a laissé Platon. En tout cas, c'est ainsi qu'il a été transmis. Comme on l'a vu, et comme encore dans *Timée* 33-34, le dogme de la sphéricité et de la circularité est absolu. Le mouvement des astres doit nécessairement relever de tels mouvements et de telles formes.

Au sens strict et traditionnels, les phénomènes sont les mouvements des planètes. Il s'agit de faire coïncider les principes rationnels, spéculatifs, architectoniques et certains, avec les phénomènes, c'est-à-dire les effets de ces véritables mouvements.

Ces divers mouvements conçus par Platon suffisent-ils à rendre compte de la marche apparente des astres ? La réponse est non, et Platon le savait : connaître les lieux et les raisons « sans en omettre » est une tâche loin d'être réalisée. On en voit un exemple dans les sortes de compléments qu'il propose dans la *République* (X, 616-617) où l'on reconnaît la double tendance : se rapprocher des observations astronomiques connues de son temps et puiser leur intelligibilité dans des propriétés arithmétiques d'inspiration pythagoricienne.

On peut les faire coïncider en en connaissant l'enchaînement des causes efficientes. Mais cela ne suffit point, voici qui n'est pas platonicien, car la vérité des choses ne provient pas de ce que l'on peut voir d'elles, mais des idées qui leur sont idéalement associées, auxquelles elles participent.

Mais alors, les cercles et sphères du démiurge, celles de *Timée* et de la *République* ne sont-elles que des constructions de l'esprit, des hypothèses ? Il y a un aspect très technique et spécialisé dans cette question : les bords des *pesons* de la *République* ont-ils une certaine largeur ? Si oui, selon van der Waerden par exemple, ceci laisse la place pour y placer des épicycles.

Il ne paraît pas possible de répondre par l'affirmative, de faire de Platon un positiviste. Il semble bien que les constructions platoniciennes visent la réalité. Mais quelle réalité ? Ne perdons pas de vue les niveaux de réalité : il y a une hiérarchie de ce que nous percevons, nous voyons jusqu'à l'idée, la forme supérieure, le modèle ultime contemplé par le Dieu créateur lui-même. Ce que défend Platon, c'est que cette réalité supérieure est sous-jacente (par nature située au delà de) aux phénomènes. Ceux-ci peuvent être occasion de pénétrer celle-là. Comme le dira plus tard Ptolémée « les choses ne sont pas telles qu'elles sont vues ». Mais il y a plus : cette réalité n'est pas concrète, n'est pas matérielle : il ne s'agit pas de crier victoire en prétendant avoir saisi une vraie trajectoire, une vraie sphère matérielle associée à une planète : elle ne peut être qu'une image de l'action et de l'association des principes ultimes à l'œuvre : la vraie réalité, c'est le plan du démiurge, ses raisons et les effets de son éternité parfaite. La réalité ultime est idéale ; en ce sens les trajectoires, les sphères demeurent des représentations. En d'autres termes, comme l'écrit Luc Brisson dans son introduction

« Pour Platon, la cosmologie doit avant tout résoudre un problème décisif qui repose sur cette conviction universellement répandue en Grèce ancienne : il n'y a pas de réalité véritable dans le changement incessant...dès lors... à quelles conditions le monde sensible peut-il devenir connaissable ? » (p. 14)

La clé est dans le rapport « original/copie », le premier étant idéal, immuable le second sensible, soumis au changement. Le rapport peut être partiellement découvert par les traces qui montrent bien que la copie est copie de l'original, c'est-à-dire par l'exhibition de régularité, de stabilité, de symétrie au sein même du monde physique, du cosmos créé. Or c'est la tâche et la possibilité qu'offrent les mathématiques.

Pourquoi enseigner l'astronomie

Dans la *République*, *Les Lois* et *l'Épinomide*, Platon montre comment l'Astronomie doit être enseignée.

Au livre VII de *La République*, Socrate converse avec Glaucon. « Et après l'étude de la géométrie, ne placerons-nous pas l'Astronomie ? » (527). Glaucon acquiesce car elle serait utile au laboureur, au voyageur et même au général. Socrate le reprend :

« Je ne puis admettre qu'une étude dirige l'âme en haut, à moins qu'elle n'ait pour objet ce qui est et ne peut pas être vu. Qu'un homme regarde en l'air avec ses yeux grands ouverts ou qu'il regarde la terre les yeux baissés, si l'objet de son étude est quelque chose qui tombe sous les sens, je ne dirais pas qu'il apprend, car il n'y a pas de vraie science (epistémée) de ces choses-là et je ne dirais pas que son âme regarde en haut ; je penserais qu'elle regarde en bas » (528).

Quelle est donc cette astronomie qui regarde en haut, les choses qui ne se voient pas ? Prenons le soleil : ce qui se voit, ce sont les variations compliquées et irrégulières de l'astre du jour ; cet arc de spirale qui, d'un tropique à l'autre, s'enroule sur la sphère céleste ; c'est une vérité inférieure, qui vient des sens. Ce qui ne se voit pas, c'est l'admirable décomposition de cette trajectoire selon les deux rotations : la première sur l'équateur du monde, d'orient en occident ; la seconde, sur l'écliptique, en un an, d'orient en occident.

« La géométrie va ici, bien au delà ; son raisonnement découvre ce que la vue n'aurait pu reconnaître ; débrouillant l'enroulement compliqué de la spirale où la seule observation voyait la trajectoire du soleil, elle y reconnaît le résultat de la composition de deux rotations uniformes ; en saisissant cette loi simple, elle atteint une vérité d'un autre ordre » (Duhem, *La cosmologie de Platon*, L'aube du savoir, Herman, p. 16-17).

« On doit considérer les ornements du ciel comme les plus beaux et les plus parfaits des objets de leur ordre, mais, puisqu'ils appartiennent au monde visible, ils sont bien inférieurs aux vrais ornements, aux mouvements selon lesquels la pure vitesse et la pure lenteur, dans le vrai nombre et toutes les vraies figures, se meuvent en relation l'une avec l'autre, et meuvent ce qui est en elles ; or ces choses sont perçues par l'intelligence et la pensée discursive et non par la vue » (*République* VII, 529, p. 288 Baccou).

Duhem écrit

« Ainsi, la véritable astronomie est celle qui, par raisonnement géométrique, découvre les combinaisons cinématiques simples dont le démiurge suprême a usé pour produire les entrelacs compliqués des mouvements astronomiques visibles. Ces mouvements composants méritent seuls d'être appelés réels et vrais » (*id.* 17-18).

Cette astronomie véritable et géométrique est cependant insuffisante. Son but véritable est la connaissance des dieux : elle y est toutefois nécessaire car elle seule peut montrer ce qu'il en est des réalités permanentes : dans la fixité des mouvements célestes, il voit une preuve de l'existence des esprits divins qui sont unis aux corps des astres ; les lois reconnus par l'astronomie géométrique lui enseignent comment les dieux doivent être honorés.

On peut ainsi considérer qu'il y a finalement trois sortes d'astronomie :

L'astronomie d'observation, qui n'est pas véritable, qui révèle les astres errants, en exhibant leurs irrégularités.

L'astronomie géométrique, qui réduit les faits sensibles et visibles aux figures de la géométrie, celle-ci préparant à la véritable astronomie, dite théologique, celle qui aidera à pénétrer et contempler le plan divin.

Tel est le cadre fondamental de l'astronomie platonicienne.

EUDOXE ET CALIPPE

On a assez dit que Platon n'était pas véritablement astronome. Il semble cependant que son enseignement oral ait été bien plus complet que les écrits que nous avons. La voie compliquée qui nous l'a transmis est la suivante : Eudoxe de Cnide suivit ses enseignements, et les consigna Eudème de Rhodes, élève d'Aristote les a inscrits dans son *Histoire de l'astronomie*

Le philosophe Sosigène, maître d'Alexandre d'Aphrodise (II^e siècle ap. J.C.) a recopié le texte précédent

Simplicius (néo-platonicien du V^e siècle) les restitue dans son commentaire du *de caelo*.

Voici le problème, tel que Platon l'aurait donc posé :

“Platon admet en principe que les corps célestes se meuvent d'un mouvement circulaire, uniforme et constamment régulier ; il pose alors aux mathématiciens ce problème [...] quels sont les mouvements circulaires, uniformes et parfaitement réguliers qu'il convient de prendre pour hypothèses, afin que l'on puisse sauver les apparences présentées par les planètes ” (in Duhem, p.3 et *Aube du savoir*, p.28). Ce texte est considéré comme fondamental aussi par G. Aujac.

Remarque de vocabulaire : *phénomènes ou apparences* et, au dessous, plus fondamentalement, ou au dessus du point de vue de la dignité du savoir, les *fondements ou hypothèses* (voc. Encore employé chez Descartes).

L'astronome et géomètre Géméus de Rhodes (stoïcien du I^e siècle ap. JC) indique, selon Simplicius que la question était posée dans des termes proches chez les pythagoriciens : « dans toute l'astronomie... circulaires et uniformes » (cité in Duhem, *id.* p. 29).

Platon semble avoir été strict sur un point supplémentaire : les mouvements circulaires devaient avoir tous le même centre, c.a.d. le centre de la terre (enjeu important par la suite).

Le système des sphères qui va en résulter soulève une question, formulée par Duhem

« Ces sphères homocentriques, Platon les regardait-il comme réellement existantes au sein de la substance céleste ? N'y voyait-il, au contraire, comme Théon de Smyrne (père d'Hypathie) semble l'insinuer, que des représentations propres à seconder la raison du secours de l'imagination ? Entre ces deux alternatives, il serait malaisé de choisir en s'autorisant de textes précis ; mais il serait bien étrange que Platon n'eût pas mis ces globes solides au nombre des réalités permanentes que la géométrie nous révèle » (Duhem, *id.*, p.31). J'en suis bien d'accord.

Les successeurs paraissent avoir surtout concentré leurs efforts sur la résolution formelle, géométrique du problème. « Le premier des Grecs qui tenta la solution du problème posé par Platon fut Eudoxe de Cnide » (selon Simplicius). Traité d'Eudoxe *Sur les vitesses*, perdu mais, transmis par la filière citée et aussi par les notes d'Aristote dans *Métaphysique XI*. Travaux historiques de G. Schiapparelli (Milan, canaux de Mars), Th.-Henri Martin et Paul Tannery.

Dans ce système, chaque planète a son propre sous-système, indépendant des autres, isolé en quelque sorte, sans prééminence. Il faut trois ou quatre sphères emboîtées par planète. Elles ont donc même centre et sont en rotation de la façon suivante : l'axe de rotation de la sphère intérieure est fixé à la suivante ; celle-ci est en rotation autour d'un autre axe lui-même fixé sur la suivante etc. La planète est fixée sur l'équateur de la sphère intérieure.

La sphère S_1 , la plus extérieure tourne, comme la sphère des étoiles, en 24 heures, dans le sens dit « rétrograde », d'orient en occident

La sphère S_2 , immédiatement intérieure, tourne dans le sens opposé (sens direct), son plan équatorial est le plan de l'écliptique. La durée de révolution est différente (un peu moins d'un mois pour la lune, un an pour le soleil). C'est la durée de parcours du cercle écliptique. Il correspond à une *année planétaire*.

Jusque là c'est le système « trop simple de Platon », avec lequel on n'obtient que la « position moyenne » de la planète. La « position vraie » réclame d'autres combinaisons. C'est le rôle du « modèle planétaire ».

Deux autres sphères

S_3 tourne sur un axe situé dans le plan de l'écliptique, perpendiculaire au précédent. Un tour en une *révolution synodique* : retour des alignements Terre-Soleil-planète

S_4 porte, sur son équateur, la planète et son axe est peu incliné sur le précédent ; l'inclinaison dépend de chaque planète ; la vitesse est la même que S_3 , mais inverse.

Ces sphères ne sont pas accessibles à nos perceptions, à la vue.

Les deux premières restituent le mouvement diurne des étoiles et la longue oscillation de la planète par rapport aux étoiles, dans l'année. La lune et le soleil n'ont que trois sphères en raison de mouvements plus simples (on se demande même pourquoi le soleil n'en a pas que deux : idée d'un plan écliptique, *a priori*, distinct de celui, pourtant coïncident, du soleil).

Les deux dernières sont plus compliquées : elles doivent expliquer le mouvement en latitude, au dessus et au dessous du plan de l'écliptique et aussi les stations et rétrogradations. La combinaison des deux rotations, indépendamment de S_1 et S_2 donne un hyppopède. Le point double est la « position moyenne ». On obtient les oscillations de latitude et si on combine avec la rotation de S_2 , on a aussi les stations et rétrogradations. Voir ici les schémas de North, p.72-76. Cette courbe a eu une très grande importance, astronomique et géométrique. Géométriquement, elle correspond à l'intersection d'un cylindre et d'une sphère.

Les résultats de ce système de 27 sphères sont inégaux : Les modèles de Jupiter et Saturne sont satisfaisants, passables pour Mercure et très mauvais pour Vénus (? ce n'est pas le cas selon Duhem) et Mars. En fait le système ne dispose que de deux paramètres fondamentaux que l'on peut faire varier : la vitesse « dans et de » l'hyppopède et la taille de celle-ci. Ce n'est pas rien : la vitesse dans et de l'hyppopède, en termes modernes correspondent aux vitesses angulaires de la terre et de la planète considérée par rapport au soleil et la taille de l'hyppopède correspond au rapport des dimensions de l'orbite de la planète à celle de la terre. C'est donc un « vrai » système quantifié qui est ici proposé et conçu.

Calippe

Le modèle, la théorie, les hypothèses étaient prises en défaut : que faire ? Une révolution, un changement de théorie ou des aménagements. La réponse réformiste fut adoptée par Calippe de Cyzique, sans doute élève d'Eudoxe. Il se rend à Athènes (troisième siècle), il se joint à Aristote et, avec celui-ci corrige et améliore le système d'Eudoxe. Selon Simplicius, il augmente le nombre de sphères : deux de plus pour la lune et le soleil, et une de plus pour Mars, Venus et Mercure. Les sphères supplémentaires du soleil devant rendre compte de l'inégalité des saisons, dont Eudoxe ne tenait pas compte. Le nombre des sphères est alors porté à 34.

ARISTOTE

Le stagirite arrive à Athènes en 367 à 17 ans ; il s'éloigne et revient en 335 et fonde l'Académie. Son système du monde est entièrement déterminé par des considérations philosophiques. On peut dire rapidement qu'il modifie le système d'Eudoxe-Calippe, mais en réalité il va surtout en modifier la nature profonde. On l'a vu, les racines des précédentes théories étaient surtout géométriques, ce qui se voit bien avec la thèse de *l'indépendance des modèles planétaires* ; chacune étant « découplée » des autres ; sa logique propre étant la reconstitution abstraite de la bonne trajectoire. Aristote va vouloir repenser un monde physique où tout se tient et s'enchaîne : les modèles, les sphères doivent fonctionner « ensemble ». Il faut donc revenir sur quelques thèses physiques du philosophe.

Certes enseigne Aristote, il n'y a de science que des choses universelles et, en conséquences, les sens ne nous donnent la science de rien puisqu'ils ne nous font connaître que des choses singulières. Il est ici, bien proche de Platon. *Citer ici la première page de la Physique* sur les choses claires et connues par nature versus les claires et connues par nous, ce qui engage une « méthode du général au particulier. En fait, il s'en éloigne considérablement car, fondamentalement, notre accès aux choses universelles n'est possible qu'à partir et à travers les singulières. Ainsi, écrit-il dans les *seconds analytiques*

« Il est clair aussi que si un sens vient à faire défaut, nécessairement une science disparaît, qu'il est impossible d'acquérir. Nous n'apprenons, en effet, que par induction ou par démonstration. Or, la démonstration [81b] se fait à partir de principes universels, et l'induction, de cas particuliers. Mais il est impossible d'acquérir la connaissance des universels autrement que par induction, puisque même ce qu'on appelle les résultats de l'abstraction ne peuvent être rendus accessibles que par l'induction, en ce que, à chaque genre, appartiennent, en vertu de la nature propre de chacun, certaines propriétés qui peuvent être traitées comme séparées, même si en fait elles ne le sont pas. Mais induire est impossible pour qui n'a pas la sensation : car c'est aux cas particuliers que s'applique la sensation ; et pour eux, il ne peut pas y avoir de science, puisqu'on ne peut la tirer d'universels sans induction, ni l'obtenir par induction sans la sensation. (Livre I, ch. XXVII, 81 a-b)

Voir la traduction de Duhem, bien plus aisée à comprendre. C'est le fameux *nihil est in intellectu quod non prius fuerit in sensu*.

Remarque : penser au magnétisme pour lequel nous n'avons aucun sens.

On pense à la critique faite aux pythagoriciens qui font jaillir le savoir de principes et non du sensible. Une controverse essentielle et parfaitement générale de l'épistémologie est ici présentée. Elle est par exemple exprimée dans ce passage du *De Caelo* :

[Ceux qu'on appelle les Pythagoriciens] disent en effet qu'il y a du feu au centre, alors que la terre, étant un astre parmi les autres etc.

Ne cherchant pas des raisonnements et des explications causales en rapport avec les faits observés, au contraire, ils adaptent les faits observés à certains de leurs raisonnements et de leurs opinions, en s'efforçant d'harmoniser l'ensemble. D'ailleurs il y a beaucoup d'autres gens qui partageraient leur opinion selon laquelle on n'a pas besoin d'attribuer à la terre la place centrale, tirant leur conviction non pas des faits observés, mais plutôt des raisonnements.

(*De caelo*, II, XIII, 293 a 18)

Texte précieux: le rapport des faits observés aux explications causales est complexe. La porte n'est pas fermée à ceci : la connaissance scientifique s'appuie sur des explications causales et

des raisonnements, mais ceux-ci doivent être « en rapport avec les faits observés ». Il n'est pas dit que ce sont ces faits qui produisent les explications et les raisonnements.

L'universel n'existe que dans des objets singuliers et ne peut en être distingué que par abstraction ; cette abstraction ne nie pas, ne congédie pas, ne diminue pas la réalité de l'objet singulier ; elle ne fait que séparer tel de ses attributs (la couleur d'un cheval singulier pour abstraire le concept cheval, la « bronzéité » d'une boule pour en abstraire la sphère). Pour cela, l'observation de nombreux cas singuliers est nécessaire « par l'observation d'un grand nombre d'objets singuliers, l'universel est mis en évidence » (*id.* livre II, ch. XV). Ce n'est pas l'intuition platonicienne, réellement détachée de la connaissance sensible qui livre la connaissance des vérités éternelles, c'est l'induction qui les abstrait, grâce à la mémoire.

La grande nouveauté de la philosophie de la nature aristotélicienne est dans l'établissement de la physique comme science : savoir assuré des choses corruptibles et soumises au changement. Il convient, pour ces choses changeantes et corruptibles, de leur fournir des principes adéquats, qui eux-aussi naissent, changent et meurent. Ici, polémique anti-platonicienne. Exemple : il est vain de donner comme principe du feu qui chauffe les corps, les fond, les brûle, de lui donner comme substance une pure figure géométrique, le tétraèdre

« Cet effort pour transformer les corps simples en figures géométriques est absolument déraisonnable » (*De caelo*, livre III, ch. VIII).

Il y a une science des choses qui changent parce qu'il y a des principes de ces choses : cette science est la physique.

Elle étudie l'être « dont la substance contient le principe du mouvement ou de l'arrêt du mouvement qui se produit en elle...ses spéculations auront pour objet l'être qui peut être mû ». Important : elle ne l'étudie pas seulement en tant qu'il est mouvement pur, mais aussi et surtout, en tant qu'il est inséparable de la matière.

Cette physique, supérieure à la mathématique car elle porte davantage sur la connaissance des choses, sur leur être (qui est aussi matériel) est cependant surpassée par une autre science qui porte sur un objet à la foi immuable, éternel, distinct de la matière, à savoir le *moteur premier* qui est cause de lui-même, *causa sui*. Les scolastiques chrétiens y verront le concept du Dieu tout puissant et incréé. Cette science supérieure est la théologie ou philosophie première. Elle n'étudie pas l'être en tant qu'il est soumis au changement et lié à la matière, mais en tant qu'être, elle examine ce que c'est que l'être. On y accèdera, non pas en tournant le dos, l'opposant à la physique, mais grâce à une généralisation de l'objet qu'elle considère : qu'y a-t-il de commun à toutes ces choses changeantes et matérielles, sinon leur être. On a chez Aristote une transformation du concept d'être qui le libère du simple « l'être est et le non être n'est pas ». Au contraire enseigne Aristote, « l'être se dit de diverses manières » : l'être accompli, en entéléchie, l'être en puissance, l'être en devenir. Exemple canonique de la statue.

Physique, fin du chap. 2 et au début du 3, Aristote argumente contre l'unicité de l'étant (et donc de ses principes).

L'étant se dit de plusieurs façons (les traductions d'*ousia* en témoignent : *étance* par Stevens, il est *substance* chez Pellegrin, ou encore *existence* ou *étant premier*, *existence*. L'Un lui-même se dit de diverses façons : le continu, l'indivisible, le tout etc.

Physique, Livre II, Chapitre II,

Aristote va, en conséquence déterminer une distinction radicale entre la science du géomètre et celle du physicien.

Le physicien étudie l'essence des choses et leurs configurations. Le mathématicien étudie les configurations (ces attributs) mais pas *en tant qu'attribués* à ces étants naturels, « il les sépare, car elles sont séparables par la pensée ». Ce sont des fictions exactes, mais n'atteignant pas l'être des choses.

Thèse reprise par exemple dans la *Métaphysique* :

Nous voyons le mathématicien faire porter ses investigations sur des abstractions ; il considère, en effet, son objet en faisant abstraction de tous ses caractères sensibles, telles que la pesanteur et la légèreté, la dureté et son contraire, ainsi que la chaleur et le froid et tous autres couples contraires de l'ordre sensible ; il conserve seulement la quantité et le continu à une, à deux ou à trois dimensions, avec les attributs de ces objets en tant qu'ils sont affectés de quantité et de continu, et il ne les étudie point sous d'autres rapports . (*Méta. XI, ch III, 1061 a*).

Ainsi est établie une décisive distinction entre la fonction et la tâche du géomètre et celle du physicien. Il convient de partir des observations et il convient, par des moyens mathématiques d'en découvrir la raison. Entre la science d'observation qui constate la réalité des phénomènes physiques et la science qui fait usage des raisonnements mathématiques, il y a une subordination. L'optique subordonne la géométrie, mais cette subordination de la science d'observation par rapport à la géométrie ne fait qu'en annoncer une autre :

« La subordination que l'optique présente par rapport à la géométrie, une autre doctrine la présente par rapport à l'optique, savoir la doctrine qui traite de l'arc-en-ciel ; en cette doctrine, il appartient au physicien d'observer ce qui est en réalité : à celui qui traite d'optique, il appartient d'en donner l'explication, soit à l'aide des principes qui lui sont propres (la nature de la lumière), soit à l'aide de ceux qu'il emprunte aux mathématiques » (Duhem , p.55,56).

La physique subordonne l'optique, comme celle-ci la géométrie.

C'est une rupture par rapport à Platon : le géomètre ne traite pas d'autres êtres doués de plus de réalité que les êtres sensibles. Ces deux sciences considèrent les mêmes êtres, mais selon des points de vue différents.

Cette situation délicate est aussi vraie en astronomie.

L'astronomie, en dépit de sa forme géométrique, demeure une science physique. Il n'y a pas d'astronomie des objets intermédiaires, des astres géométrisés si l'on veut.

La connaissance des choses matérielles peut donc être de deux sortes : où elle concerne ce que les sens nous livrent ; alors elle est certaine, mais elle est du fait de son objet, fort limitée, elle est un constat, une description d'apparences. Si elle veut saisir le pourquoi des choses et aller au delà de ce qui « se voit », elle doit forger des principes hypothétiques qui sont bien plus puissants mais moins certains. Elle est un « système de suppositions qui sont simplement possibles » (Duhem).

La substance céleste et ses mouvements

Une chose en mouvement c'est, pour Aristote : une matière, une forme de départ (en acte) et une forme en devenir (en puissance). Le changement résulte du désir de changement de forme. Parmi les changements (mouvements) qui sont de quatre sortes, la génération ou la corruption, la

dilatation ou contraction, l'altération et le mouvement local. Ce dernier a la primauté car il peut persister et dans *Physique* VIII ch. VII), il établit que le plus parfait de ces mouvements est le circulaire (mouvement sans changement).

- Principes premiers du cosmos

L'univers est un fini en conclusion d'une longue analyse de l'infini et de son impossibilité à être en acte (*Physique*, livre III, ch. IV, V et VI et *de caelo* livre I, ch. V, VI et VII).

Il a une surface-limite qui en est la frontière et au delà de laquelle il n'y a rien, pas même de vide. Le vide est en effet un lieu qui peut recevoir des corps ; or aucun corps ne peut être produit en dehors de l'Univers ; il y aurait alors une puissance sans actualisation possible.

« L'univers n'est pas en quelque lieu que ce soit ...pour qu'une chose soit quelque part, il faut non seulement que cette chose ait une existence propre, mais encore, qu'il existe, hors d'elle, une autre chose au sein de laquelle elle soit contenue. Mais au delà de l'Univers et du Tout, il n'y a rien qui soit au dehors de l'Univers » (*De caelo*, livre I, ch. VII).

Quel est le mouvement local qui peut se poursuivre identiquement, en un espace de dimensions finies ? Le circulaire, le mouvement de rotation. Résultat appréciable :

« aucune transformation ne peut être perpétuelle et toujours identique à elle-même, si ce n'est le mouvement circulaire » (*Phys.* VIII, ch. VIII).

- Les mouvements simples, qui sont de deux sortes :

le rectiligne (fini) et le circulaire sont nécessairement des mouvements de quelques corps sinon il ne s'agirait que de formes idéales, chimériques. Ils sont donc les mouvements naturels de corps simples. Outre donc les corps habituels, comme les pierres qui tombent (et qui sont justement affectées du mouvement droit, rectiligne fini), il existe donc un corps affecté d'un mouvement circulaire simple et éternel et non affecté d'autre mouvement (altération, génération, dilatation).

Mais le mouvement qui a la suprématie sur les autres doit être le mouvement d'un corps simple dont la nature surpasse celle des autres ; or, d'une part, le mouvement circulaire a la primauté sur le mouvement rectiligne ; d'autre part, il existe des corps simples dont le mouvement rectiligne est le mouvement naturel...Il faut donc que le mouvement de rotation soit le mouvement propre d'un certain corps simple...Il résulte évidemment de là qu'il existe une certaine essence corporelle, différente des substances qui sont autour de nous, supérieure à toutes ces substances et plus divines qu'elles...Quiconque tirera déduction de tout ce que nous venons de dire arrivera à croire qu'outre les corps qui sont ici bas, autour de nous, il existe un autre corps, distinct de ceux-là et dont la nature est d'autant plus noble que ce corps diffère plus de ceux qui sont ici. (*De caelo*, I, II, 269 a)

Remarque sur la supériorité du mouvement : droit ou courbe. Kepler contre Galilée. D'Arcy Thomson.

Ce corps supérieur qui n'est ni la terre, ni le feu, ni l'air, ni l'eau, les anciens l'ont nommé éther car il court sans cesse et pour l'éternité » (*De caelo*, I, III).

Dans le vocabulaire d'Aristote, c'est plutôt le *corps premier*.

Aux corps célestes est donc attribuée une *cinquième essence* qu'il décrit avec soin : elle n'est pas accessible à la corruption ou à la génération, elle ne résulte pas de la transmutation des autres éléments simples et ne les génère pas non plus.

En développant cette doctrine de la matière des cieux, Aristote élève une infranchissable barrière entre la matière *d'en bas* et celle *d'en haut*. Remarque, cette séparation n'est pas présente (ou juste esquissée) chez les Pythagoriciens et Platon.

La substance du ciel ne change pas : elle ne va donc pas tantôt vite, tantôt lentement et elle est affectée du mouvement de rotation uniforme dans un ciel sphérique :

« La figure qui occupe le premier rang entre les figures convient au corps qui a la primauté sur les autres corps ; or le premier des corps est celui qui est mû par la circulation suprême ; ce corps là sera donc sphérique. Il en sera de même de celui qui lui est contigu, car ce qui est contigu à une surface sphérique est sphérique. Il en sera donc de même des choses qui se trouvent en la concavité de ces divers corps sphériques ; des choses en effet qui sont contenues dans une cavité sphérique et en touchant la surface interne, prennent nécessairement en leur ensemble, une figure sphérique ; or les choses qui se trouvent au dessous de la sphère des astres errants sont contiguës à cette sphère qui se trouve au-dessus d'elles » (*De caelo*, Livre II, chap. IV).

- Nous avons une structure générale nette :

Donc une sphère ultime, lieu du monde et une succession de sphères continues correspondant aux diverses planètes et faites de la substance éthérée céleste. Celles-ci sont enchâssées dans leur sphère et elles ne tournent pas sur elles-mêmes.

Ce sont les cercles qui se meuvent, alors que les astres restent au repos et sont transportés parce qu'ils sont attachés aux cercles (289 b 30)

En effet selon le chapitre 7 du livre II du *de caelo*, la substance des astres enchâssés est la même que celle des sphères et elles n'ont pas de mouvement autonome de rotation sur elles-mêmes.

Il est raisonnable [de penser que] chaque chose soit composée des réalités au sein desquelles elle se trouve. (II, 7, 289 a 10)

Pellegrin fait bien remarquer (II, 4, note 21) que, conformément à 287a6, les sphères supralunaires sont continues entre elles alors que les supra et la sub lunaire sont seulement contiguës car elles ne font que se toucher.

Sur continuité : avoir une limite commune ; contigüité : avoir des limites qui se touchent. Exemple une pierre sur son ciment (pierre et ciment sont contigus ; mais les parties sup et inf de la pierre sont continues.). Problème : comment se meuvent-elles séparément si elles ont une limite commune ?

Pas mal de problèmes se posent : pourquoi et comment y a-t-il différenciation (entre diverses sphères, entre planètes et sphères porteuses...) alors que la substance est une, parfaite, éternelle, immuable etc. ?

La situation des astres (II, 10)

Ils n'ont pas la même vitesse. Ils sont emportés sur leur propre cercle d'un mouvement inverse à celui du ciel (291a 30).

La doctrine du mouvement des sphères et astres est pleine de difficultés. Ils sont à la fois *dominés* (*kratein*) par le mouvement premier (de la sphère du ciel), mais dans un sens opposé. Il existe un système de sphères compensatrices qui « inversent » cet entraînement.

Les passages difficiles où A. suggère que chaque astre dispose de plusieurs sphères qui collaborent pour assurer ses mouvements complexes. Notamment ses mouvements au dessus et au dessous de l'écliptiques.

Dans le même texte (II, 12) il est dit que les astres ne sont pas « absolument dépourvus d'âme. Or il faut les concevoir comme participant à l'action, c'est-à-dire à la vie » (292 a, 20) . « L'activité des astres est comparable à celle des animaux et des plantes » (292 b, 1)

- L'intelligence des sphères

Il faut renvoyer à *Métaphysique* Lambda, 8 (*Méta XII, 8*). Traduction Barthelemy Saint Hilaire, 1879.

Donc, il est évident qu'il faut nécessairement qu'il y ait autant de substances que de planètes, et que ces substances soient, par leur nature, éternelles, immobiles, en soi, sans étendue ni grandeur, d'après les raisons que nous en avons précédemment données. [1073b]

Quant au nombre de ces translations, il n'y a qu'à le demander à cette partie des sciences mathématiques qui se rapproche le plus de la philosophie, c'est-à-dire, à l'astronomie. En effet, l'astronomie observe et étudie une substance sensible, mais éternelle, tandis que les autres sciences mathématiques n'étudient point de substance, témoin l'arithmétique et la géométrie.

Que le nombre des mouvements dont ces corps sont animés soit plus considérable que le nombre de ces corps mêmes, c'est ce dont on peut s'assurer avec la moindre attention, puisque chacun des astres qui errent dans l'espace a plus d'un mouvement. Quel est précisément le nombre de ces mouvements divers? C'est ce que nous allons, à notre tour, essayer d'éclaircir, afin de faire mieux comprendre les assertions de quelques mathématiciens, et de fournir à l'esprit un nombre déterminé, auquel il puisse se fixer avec quelque précision.

Eudoxe a cru que le soleil et la lune faisaient chacun leur révolution dans trois sphères distinctes. La première de ces sphères, selon lui, est celle des étoiles fixes; la seconde est celle qui passe par le milieu du zodiaque; et la troisième, celle qui se dirige obliquement dans la largeur du zodiaque.

Quant aux planètes, Eudoxe leur assignait à chacune quatre sphères. (total 26 sphères)...

Callippe donnait aux sphères la même position que leur donnait Eudoxe, c'est-à-dire qu'il les classait de même pour l'ordre des distances. Quant au nombre de ces sphères, il en accordait le même nombre qu'Eudoxe à Jupiter et à Saturne; mais il prétendait qu'il fallait ajouter deux sphères à celles de la lune et du soleil, pour bien représenter les phénomènes. Il n'en ajoutait qu'une seule pour chacune des autres planètes. (total 33 sphères)

En outre, pour que toutes les sphères réunies rendissent bien compte des phénomènes observés, il croyait qu'il était nécessaire [1074a] qu'à chaque planète il y eût d'autres sphères en nombre égal, moins une, allant en sens inverse, et rétablissant la première sphère dans sa même position, relativement à l'astre toujours placé au-dessous. C'était à cette seule condition, suivant lui, que le mouvement des planètes pouvait s'expliquer complètement...

Le nombre de toutes ces sphères, tant de celles qui ont le mouvement régulier que de celles qui vont en sens opposé, sera en tout de cinquante-cinq.

Voilà donc quel est le nombre des sphères; et il paraît tout à fait rationnel de supposer que les substances, et les principes immobiles et sensibles, sont en nombre égal. Quant à démontrer que ce soit là ce qui est nécessairement vrai, nous laissons ce soin à de plus forts que nous. Mais, s'il est impossible qu'un mouvement puisse avoir lieu sans contribuer au mouvement d'un astre, et si l'on est forcé de croire que toute nature et toute substance immuable et en soi, atteint toujours la meilleure fin possible, il faut affirmer que, en dehors des substances dont il s'agit, il n'y a pas d'autre nature possible, et que le nombre des substances qui vient d'être indiqué est absolument nécessaire.

La note importante que le traducteur Tricot a rédigée doit être citée : (*Méta*, ed. Vrin, p. 182)

Les complications apportées par Aristote ont inspirées par le désir d'expliquer les mouvements réels des corps célestes. Les théories d'Eudoxe et de Calippe ne constituaient, en effet, que des hypothèses purement géométriques, et elles ne tenaient pas compte de l'influence réciproque des divers systèmes. Or, les sphères concentriques composant l'Univers se trouvant, en raison de l'inexistence du vide, en contact l'une avec l'autre, la sphère qui transporte un corps céleste, entraînera dans son mouvement de rotation la sphère extérieure du système intérieur. D'où la nécessité, pour Aristote de supposer des *Sphères compensatrices*, mues en sens contraire. Il arrive ainsi à un total de 55 sphères.

- Statut et difficulté de la sphère inférieure.

Une sphère inférieure « au dessous de la sphère des astres ». Difficulté : pourquoi ne tourne-t-elle pas ? Parce que le mouvement qui y règne est le mouvement droit (gravité) ; parce qu'elle est –ça se voit- lieu de génération et de corruption.

On voit ceci en (II, 13, 296 a). L'argument est le suivant :

Si le mouvement qui régnait sur terre était la rotation, les parties y conviendraient, or, on le voit les parties se dirigent en ligne droite vers le sol, ou vers le haut ; bref, elles conviennent au mouvement droit, ergo, la terre elle-même y convient.

Donc elle ne tourne pas. Recours aussi en (II 14) à des arguments plus empiriques : les objections balistiques (296 b 20).

Il faut trouver des principes adaptés à ces faits. Les deux régions, la doctrine du mouvement-changement et de la substance informée. Ces deux principes rendent différente la physique de la terre et du ciel.

D'ailleurs, il n'est pas sûr que l'astronomie soit une partie de la physique. Les deux livres distincts, mais sans doute contigus montrent les difficultés.

Mais, il y a une autre difficulté : la vaste sphère du monde est-elle parfaite alors qu'une de ses parties n'est pas mue circulairement ? N'est-ce pas un défaut ?

La réponse (II, III, 286 a) est délicate : une sphère a une partie immobile, à savoir son centre. Oui mais, est-ce vraiment une partie ? Si c'est juste un point, on peut lui accorder l'immobilité, sinon, c'est un défaut que de ne pas tourner.

Il en ressort que la région terrestre –dite centre du cosmos- emprunte au point géométrique son immobilité, mais ceci lui confère une réelle indignité, imperfection, qui sera reprise par des arguments topologiques.

Très intéressante critique des arguments de mouvement pour comprendre le cosmos, par Galilée. Voir *Dialogue* première journée, (Seuil, p. 53) :

Aristote adapte les préceptes de l'architecture à l'édifice du monde et non l'édifice aux préceptes. (p.53)

- Mais comment sont-ils en mouvement ?

Sans moteur, il n'y a pas de mouvement possible. L'actualisation de la matière est impulsée en dehors d'elle ; la matière inanimée n'est pas « auto-motrice » . *Physique* (VII, I)

« Tout ce qui est en mouvement est nécessairement mû par quelque chose. Si donc il n'a pas en lui-même le principe de son mouvement –comme les êtres vivants- il est évidemment mû par un autre ». (repris en 288a 27, *de caelo*)

Les sphères sont des intelligences, mais subordonnées à la première sphère, leur mouvement dépend du premier mouvement, dont il faut chercher le moteur, soit le premier.

Le mouvement de la sphère supérieure étant éternel, rapide et régulier, (sinon il faudrait que « quelque chose soit né de la confusion universelle, du non-être », *Méta.* XII, 7) le moteur doit l'être : il faut concevoir un être qui soit immatériel (sinon, il serait « du monde lui-même »), il doit être acte pur.

Lecture de *Métaphysique* XII, 7, 1072a-b, in Tricot, II, p. 171 ; voir aussi *De caelo*, II, 6.

Conclusion

Que donc, il n'existe qu'un seul ciel, qu'il soit ingénérable et éternel, et, de plus, qu'il soit animé d'un mouvement régulier, nous l'avons assez exposé. (*De caelo*, II, 6, 289 a)

Cf. passages soulignés

Duhem commente ainsi : Le premier moteur meut ...éternelle » (p.69). Tout ceci est difficile et fait écrire à Pierre Pellegrin

« la nature totale, système clos des réalités automotrices (avec les vivants ou les vivants animant des inanimés) tient son mouvement d'en dehors d'elle-même. Le premier moteur immobile meut le « premier ciel », mais n'est lui-même ni mû, ni matériel. Il est « acte pur », c'est-à-dire qu'il ne contient aucune potentialité, rien qu'il ait à réaliser. Les corps célestes, éternels eux-mêmes sont entachés d'une certaine potentialité, qui se traduit par un changement, ne serait-ce que translation dans l'espace. Doctrine difficile que celle d'un moteur incorporel qui meut une sphère corporelle qu'il n'a pas créé, et envers laquelle, du fait de sa propre complétude, il ne peut éprouver aucun intérêt. La solution d'Aristote soulève autant de difficultés qu'elle n'en résout : les cieus se meuvent parce qu'ils sont animés d'un mouvement de désir envers le premier moteur. Le sur-naturel est ainsi nécessaire à l'existence et à la cohérence de la nature » (P. Pellegrin, *Aristote*, in Dict. *Le savoir grec*, p. 611).

Autre problème : le mouvement des autres sphères. Aristote a établi la substance animée, éternelle, immatérielle qui meut le premier ciel, celui des étoiles. Il sait pourtant que bien d'autres mouvements des objets célestes ne s'y réduisent pas (à cette simple et unique rotation). Faut-il alors introduire d'autres substances motrices, d'autres moteurs, et combien, et de quelle nature ?

Lecture de *Métaphysique* XII, 8, 1073-1074b, in Tricot, p.177-185

Passage de grande importance à tous points de vue. Polythéisme ? Rôle de l'astronomie mathématique comme intermédiaire ; introduction nécessaire des sphères compensatrices pour bâtir une astronomie physicienne.

Cf. passages soulignés. Avec la note 2, p. 183-185 de Tricot.

Explication des « sphères compensatrices ». Surtout p.181 Tricot.

ARISTARQUE DE SAMOS ET HERACLITE DU PONT

« Héraclite du Pont par exemple, qui fut le disciple de Platon et suivit les leçons d'Aristote, expliquait par la rotation de la terre en un jour, d'ouest en est, autour de l'axe des pôles, l'alternance du jour et de la nuit. Dans cette hypothèse, le ciel des fixes reste immobile, la terre

tourne autour de son axe, les planètes écrivent des révolutions circulaires, qui d'ailleurs ne se font pas forcément autour du centre du monde ; certains textes (ex . Chalcidius, Vitruve) conduisent à penser en effet qu'Héraclite du Pont admettait l'héliocentrisme des deux planètes inférieures, Mercure et Venus ». Poursuivre la citation page 21 –22, depuis « Au reste, Héraclite du Pont ...qui en résultent » (Germaine Aujac, AAA Copernic, p. 21).

« Une révolution peut en cacher une autre »

Ils proposent des systèmes partiellement ou totalement héliocentriques. Ces modèles sont rejetés. Refus d'une « révolution ? » c'est une première question. Annonce d'une autre révolution (cachée au sein du géocentrisme) : celle de l'astronomie circulaire.

Il faut savoir le statut qu'Aristarque, puis Hipparque donnaient à leurs systèmes.

L'affaire Aristarque :

En 1644 paraît à Paris, un petit volume, de 148 pages, écrit en latin et intitulé *Du système du monde d'Aristarque de Samos, avec des notes ajoutées par M. de Roberval*. Ce traité se présente comme la traduction anonyme, d'un texte d'Aristarque de Samos (auteur du IIIe siècle avant notre ère), transmis par un manuscrit arabe. Roberval était un mathématicien, un physicien et un astronome de premier ordre, un des premiers personnages des 'académies savantes' de Paris qui précédèrent et préparèrent la fondation de l'Académie royale des sciences en 1669. Il aurait accepté d'améliorer le style du traité et de l'annoter conformément aux découvertes astronomiques récentes.

En plein XVIIe siècle, alors que la guerre entre les systèmes géocentrique et héliocentrique fait rage, que vient faire cet auteur vieux de 1900 ans et comment peut-il occuper pareille place dans la polémique ? D'autant que d'Aristarque de Samos, qui fut l'élève du troisième chef du lycée d'Aristote, Straton, ne nous est parvenue qu'une œuvre brève mais remarquable, *Les distances de la Lune et du Soleil*.

Le subterfuge de Roberval est rapidement découvert et quelques mois après sa publication, chacun sait que c'est lui - le professeur royal - qui a rédigé ce pastiche. Peut-être par prudence puisque le copernicanisme était officiellement interdit d'enseignement par l'église, sans doute pour donner le poids de l'autorité d'un *ancien* à la défense du nouveau système. L'*Aristarque* est, en fait, une claire défense de Galilée. Tout lecteur informé sait, en 1644, que se réclamer du samien équivaut à se dire copernicien, et même partisan de Galilée. Celui-ci a bien associé l'ancien héliocentriste à Copernic, lorsqu'il a proclamé [son] « admiration sans limite face à un Aristarque et à un Copernic chez qui la raison a pu faire une telle violence aux sens jusqu'à devenir, malgré les sens, maîtresse de leur croyance ». L'affaire est entendue, chez les partisans comme chez les adversaires du nouveau système : juste après la publication du *Dialogue* de Galilée, en 1633, un jésuite traditionaliste (en fait défenseur du système de Tycho), Libert Fromond avait combattu l'héliocentrisme dans un livre intitulé *L'anti-Aristarque*. On doit cependant rappeler que Copernic avait renoncé curieusement à toute référence explicite à Aristarque. Quoiqu'il en soit, la réplique de Roberval, est donc sans équivoque :

Voici donc ce petit ouvrage mis en style clair, sinon élégant ; mes notes sont courtes, mais toutes favorables : car je n'ai pu découvrir par moi-même, ni chez les adversaires du système, rien qui fût de nature à l'ébranler. Pour une apologie, vous n'en trouverez point ; nul besoin en effet, ni pour les savants, ni pour le vulgaire, de faire l'apologie d'un livre qu'Archimède, prince des géomètres, l'ayant lu, approuva et adopta au point de conformer son calcul de l'*Arénaire* à

l'opinion de l'auteur ; d'un livre, dis-je, au sujet duquel et à raison de ce système, Aristarque, traîné par Cléanthe devant l'Aéropage sous l'accusation de sacrilège, fut renvoyé absous avec force louanges par ces illustres juges, et l'accusateur, confondu sous les risées.

L'Héliocentrisme oublié

Tout ceci est vrai ; il y eut, dans l'antiquité, un astronome dont chacun s'accorde à admirer la valeur, pour imaginer, exposer et défendre un système dans lequel la Terre était une planète comme les autres animée de deux mouvements principaux : la rotation diurne autour de son axe, (ce qui économise la révolution quotidienne de la sphère des fixes) et la révolution annuelle autour du Soleil ; la lune, dans le système d'Aristarque, était un satellite de la Terre.

Bref, on avait, chez les grecs du III^e siècle avant J.C., un équivalent du système de Copernic (c'est le titre du livre de Thomas Heath, *le Copernic grec*). Si l'ouvrage où était exposé le système, intitulé *Les hypothèses* est bel et bien perdu (le subterfuge de Roberval n'y fait rien), les sources anciennes sont concordantes ; Archimède notamment, qui fut contemporain d'Aristarque, expose dans *l'Arénaire* (avec plus de neutralité que ne le dit Roberval), cette cosmologie héliocentriste. On a aussi plusieurs confirmations (en particulier un récit transmis par Plutarque) qu'une accusation officielle fut lancée contre Aristarque et qu'elle tourna à la confusion de son auteur Cléanthe.

Il n'est pas facile de répondre aux deux questions qui viennent immédiatement à l'esprit : Comment Aristarque a-t-il pu avoir l'idée d'un pareil dispositif ? et pourquoi, cette idée juste et géniale n'a-t-elle eu aucun succès ?

Nombreuses interprétations

A- Terrible aveuglement dogmatique, régression scientifique. L'obscurantisme contre la raison.

C'est la thèse de Koestler

Il construit un chapitre entier de son livre pour établir une perspective générale : dans l'ordre il examine, Les ioniens, puis Philolaos, puis Héraclite et Aristarque (le Copernic grec) pour ensuite évoquer *Platon et Aristote*. Il élabore de vastes perspectives : de Thalès à Philolaos, l'éveil de la raison, avec Héraclite et Aristarque, le triomphe de la science, et avec Platon et Aristote, l'effondrement dans l'obscurité métaphysique et dogmatique. Il évoque ainsi *une hibernation de quinze siècles*. De ce point de vue, il est utile de suivre certains travaux de grande précision comme l'article de Marie-Thérèse d'Alverny « *Survivances du « système d'Héraclite » au moyen-âge* » (AAA Copernic, p. 39-50), où l'on voit que ces idées continuent d'être discutées, illustrées, évaluées, même si elles sont minoritaires.

Pour Koestler (et aussi Thomas Heath) Aristarque est le *Copernic grec ou de l'antiquité*. Mais, écrit Koestler « malgré cela, on rejeta sa juste hypothèse en faveur d'un monstrueux système où nous ressentons aujourd'hui un affront fait à l'intelligence humaine, et qui régna souverainement pendant quinze cent ans. Les raisons de cet aveuglement ne se dévoileront que peu à peu, car nous rencontrons ici un des exemples les plus étonnants des détours et des déviations des *progrès de la science*. » (p.53). Dans ces raisons, on lira « la peur du changement, le mépris et la haine des concepts d'évolution et de mobilité » (p.60).

B- Une théorie hors de l'horizon rationnel de l'époque. Un accident intellectuel.

C'est assez le point de vue de Thomas Kuhn, pour lequel « il n'y avait aucune bonne raison de prendre Aristarque au sérieux » *La structure des révolutions scientifiques* (trad. Fr. Flammarion

1983). Cette théorie heurtait un « géocentrisme spontané », elle s'opposait aux objections physiques extrêmement convaincantes, elle avait contre elle la parallaxe et une taille du monde invraisemblable (inimaginable ?). Il est donc normal que les grands savants et astronomes l'aient rejetée (Archimède, Hipparque, Ptolémée).

Première remarque, on ne sait pas bien quelle était la doctrine : sphères, cercles, hypothèses géométrique, réalité physique ?

Un autre argument semble neutralisé : selon les auteurs, le système n'apportait pas d'aide Supplémentaire à l'observation ; selon d'autre, comme Lakatos, « le *modèle grossier* de Copernic (et à vrai dire d'Aristarque) avait déjà un pouvoir de prédiction supérieur à celui de son rival ptoléméen » (177).

Quel était son statut ?

Plutarque dit « *Aristarque a proposé cette théorie comme hypothèse et Séleucos (son unique élève) l'a affirmée comme vérité* ». Le texte est important car il confirme le désir et la distinction que faisaient les grecs entre une simple calculatoire et l'hypothèse physiquement vraie : la révélation de la vérité. Mais est-ce bien ainsi ?

David Furley indique ainsi que « Malheureusement, nous ne savons à peu près rien de ce qu'Aristarque faisait de cette thèse, et les quelques bribes qui ont survécu de son œuvre ne nous sont sur ce point d'aucune utilité ; cela pourrait bien n'avoir été qu'un hypothèse exploratoire » (*Le savoir grec*. p.327)

Des repères pour comprendre

Pour.

1-Lorsque Aristarque propose ses *hypothèses*, la cosmologie des sphères est en crise : elle n'arrive décidément pas à expliquer les variations d'éclat et de diamètre des planètes et donc les probables variations de distances. Aristarque est justement le spécialiste - presque l'inventeur - des méthodes de calcul des distances spatiales (calcul des distances, Terre-Soleil-Lune avec le cas du triangle rectangle, cf. in Taton). La solution des épicycles, excentriques et de l'équant est encore à venir : la solution héliocentrique apparaît, dans ces conditions, géométriquement satisfaisante.

2- En outre, les pythagoriciens (on pense surtout à Philolaos) avaient déjà suggéré le mouvement de la Terre. Si l'on ajoute la thèse (discutée, on l'a vu) selon laquelle Aristarque voyait son système comme un 'modèle géométrique' possible et performant plutôt que comme une description de la réalité physique du cosmos, on voit que son œuvre - loin d'être une extravagance - s'inscrivait assez logiquement dans l'ensemble de la réflexion astronomique des anciens grecs.

C'est exactement le point de vue qui a été défendu par Imre Lakatos. Dans « Histoire et méthodologie des sciences » (trad. Fr. PUF, 1994), il défend que l'heuristique platonicienne est prise en défaut quasi systématiquement très tôt : « après l'abandon des sphères homocentriques, chaque modification du programme géostatique l'écarta un peu plus de l'heuristique platonicienne » (p.167). Il en tire argument qu' « il n'est donc pas étonnant qu'à un stade ancien de ce développement, des astronomes comme Héraclite et Aristarque aient déjà commencé à expérimenter des systèmes partiellement ou totalement héliocentriques » (p.168)

Il critique T. Kuhn qui prétend « qu'il n'y avait aucune bonne raison de prendre Aristarque au sérieux » *La structure des révolutions scientifiques* (trad. Fr. Flammarion 1983) ; Il est « évident qu'il y en avait » affirme-t-il.

3- Il soutient que « le *modèle grossier* de Copernic (et à vrai dire d'Aristarque) avait déjà un pouvoir de prédiction supérieur à celui de son rival ptoléméen » (177)

4-Galilée y voyait un succès de la raison sur la croyance (le vocabulaire est précis : *raison versus crédulité* (cf. Platon): « mon admiration n'a plus de borne lorsque je vois comment leur raison fut capable, chez Aristarque et chez Copernic, de faire si bien violence à leurs sens que, malgré ceux-ci, elle s'est rendue maîtresse de leur crédulité » (cité par Combie, in Koyré, EHPS, p.83). Ce serait là un concentré de super platonisme : voir la vérité derrière ce qui « se voit ».

Contre. Il est certain que si la thèse d'Aristarque doit être prise comme une thèse philosophique et physique, alors elle est confrontée à des difficultés redoublées.

1-Les arguments d'Aristote contre le mouvement de la Terre sont scientifiques, mécaniques et rationnels ; ils étaient puissants et convaincants.

2-Germaine Aujac évoque le fait que les « calculs qui auraient pu la rendre utile » étaient absents et aussi les arguments physiques, en citant (note 8, p.22, cf p.26), un texte de Ptolémée.

3-Ce système devait aussi faire face à la considérable objection de la parallaxe des étoiles : les angles Terre, étoile fixe, Soleil ne semblaient pas pouvoir rester constants si la Terre accomplissait une aussi formidable révolution, or aucune variation ne pu être mesurée.

Présentation de la parallaxe des étoiles :

L'objection devait résister jusqu'à l'époque post copernicienne. La fameuse expression selon laquelle que « le cercle de l'orbite terrestre a la même raison au cercle des fixes que le centre de la sphère a à sa surface » (cf. in North, p. 86 et la longue argumentation de Szczeciniarz, p xx).

4-Enfin, les mentalités étaient spontanément géocentriques et, en somme, cette extraordinaire suggestion arriva beaucoup trop tôt . Ceci aurait été impie (cf Cléanthe).

Gerald Toomer écrit ainsi « Quoique cette hypothèse pût s'admettre d'un point de vue purement mathématique, elle s'opposait à la physique ancienne et impliquait aussi nécessairement un éloignement inimaginable des étoiles fixes par rapport à la Terre (puisque leurs positions relatives restaient inchangées tout au long de sa révolution annuelle). Tout cela explique que l'hypothèse héliocentrique ne fut jamais soutenue sérieusement par les astronomes antiques » (*Astronomie*, Le savoir grec, p. 307).

Analyse nuancée d'un échec.

A. Koyré in (*EHPS*, p.90-91)

« Entre les deux (Hipparque et Ptolémée), se place un intermède extraordinaire ; un génie de premier ordre, Aristarque de Samos, pose comme hypothèse explicative le double mouvement de la terre autour du soleil et sur elle-même. Il est assez curieux qu'il n'ait pas été suivi.

Aristarque n'a pas eu de succès et on ne sait pas pourquoi. On a dit parfois que l'idée du mouvement de la terre contredisait trop fortement les conceptions religieuses des grecs. Je pense que ce sont plutôt d'autres raisons qui ont déterminé l'insuccès d'Aristarque, les mêmes sans doute qui, depuis Aristote et Ptolémée, et même jusqu'à Copernic, s'opposent à toute hypothèse non géocentrique. C'est l'invincibilité des objections physiques contre le mouvement de la terre etc. [...] l'esprit scientifique » (Koyré, EHPS, p.90-91).

Ce qui me frappe est ceci : je comprends les objections contre et les raisons de l'abandon ; cependant, d'un point de vue internaliste, il n'y avait pas de raison de la réfuter. En quoi la taille du monde est-elle plus inimaginable alors que sous Copernic ? En quoi les objections balistiques

sont-elles plus fortes alors que sous Copernic ? Les arguments de Lakatos sont puissants en en sens.

John North a bien raison de dire que la circulation de Mercure et Venus autour du Soleil est bien plus aisée à soutenir, en contexte circulaire (épicyclique ou excentrique) qu'en contexte sphérique (J. North, *id.*, p.85)

L'astronomie circulaire

La gloire d'Athènes commence à faiblir, Alexandrie à briller ; la philosophie et la science hellènes sont en plein essor. Platon, Aristote les deux étoiles majeures de cette culture ont laissé à leurs successeurs la tâche de mieux connaître la nature et l'organisation du monde. En ce troisième siècle avant notre ère, justement, l'un des piliers de cette science grecque vacille : le modèle astronomique. Les sphères emboîtées d'Eudoxe et de Calippe ne permettent pas comprendre pourquoi le diamètre apparent de certaines planètes varie aussi considérablement, ce qui est bien le signe que leur distance à la terre est elle-même changeante. D'autres épines viendront bientôt déchirer les sphères emboîtées jusqu'à sembler devoir les détruire.

Cinq siècles de préparation

Une œuvre grandiose, l'un de ces chefs d'œuvres immenses qui ne marquent pas seulement leur siècle, mais presque leur millénaire est dès lors en gestation. Il faudra cinq cents ans pour qu'elle mûrisse et elle sera tant admirée que la brillante civilisation arabe l'appellera tout simplement *La Grande*, ou *al Majesti*, ce que les chrétiens énonceront *l'Almageste*. Ce traité rédigé par Claude Ptolémée entre 142 et 146 de notre ère, sous le règne d'Antonin, n'est que l'étape finale d'une construction qui en comporte trois.

La première débute en effet vers le troisième siècle avant notre ère, avec - certainement - Apollonius de Perge et sans doute des Pythagoriciens anonymes. C'est le moment des premiers doutes sérieux, des intuitions fulgurantes, des hypothèses audacieuses. Il faut ajouter qu'elle nous est particulièrement mal connue : textes perdus de longtemps, témoignages rares et délicats à reconstituer de manière fiable.

La seconde période s'ouvre sur une grande figure, Hipparque de Nicée ; proche dans le temps des pionniers de la première étape, il transforme la théorie encore bien vague, bien mal assurée en une solide doctrine et lui assure ses premiers succès et découvertes.

On sait très peu de chose de son existence, sinon les dates de son activité astronomique : depuis l'équinoxe d'automne du 26 septembre 147 av. J.C. et la dernière celle de la position de la Lune le 7 juillet 127. Pline l'ancien nous explique l'importance du catalogue d'Hipparque :

« Il osa ainsi faire quelque chose qui serait téméraire même pour un dieu : à savoir, compter le nombre des étoiles à l'intention de ses successeurs et réviser nommément la liste des constellations. Pour ce faire, il inventa des instruments qui permettaient d'indiquer leurs diverses positions et leurs grandeurs, de façon que l'on pût découvrir facilement, non seulement si certains astres périssaient et naissaient mais encore si l'un ou l'autre changeait de position, ou était en mouvement, et aussi s'ils croissaient ou décroissaient en grandeur. Il laissa ainsi le ciel en héritage à l'humanité, si l'on avait pu trouver quelqu'un qui eût été en mesure de revendiquer cet héritage ». (Pline, *Histoire naturelle*, II, 25, 95).

Ce catalogue d'Hipparque ne nous est pas parvenu. Son existence nous est notamment connue par Ptolémée qui ne cache pas sa dette à l'égard d'Hipparque. Il donnait la position de 850 étoiles (longitudes et latitudes).

Les observations d'Hipparque l'ont conduit à la découverte d'une donnée astronomique capitale : la précession des équinoxes. Les positions des points ne sont pas constantes par rapport aux étoiles fixes : elles se déplacent d'est en ouest de 50 secondes angulaires par an.

C'est en comparant ses observations avec celles faites 160 ans auparavant par deux astronomes (Aristille (vers 300 av. J.C) et Timocharis (300 av. J. C.)) qu'Hipparque a montré le changement de position des points équinoxiaux. Il a même donné une valeur de la vitesse de ce changement : considérant un mouvement uniforme, Hipparque conclut à un déplacement d'1 degré tous les 100 ans, c'est-à-dire 36 secondes angulaires tous les ans.

Un long temps presque silencieux, une patiente et intense accumulation d'arguments et de données conduit à la troisième étape, au couronnement de la nouvelle astronomie réalisée surtout par Claude Ptolémée.

Trois problèmes

L'astronomie des sphères restait sans réponse devant trois questions : pourquoi la taille des planètes varie-t-elle ? Pourquoi les planètes marquent-elles des stations et rétrogradations d'amplitude variable dans leur course générale vers l'orient ? Pourquoi la marche du Soleil lui-même sur l'écliptique est-elle inégale entraînant l'inégalité des saisons ?

Sans doute est-ce cette dernière irrégularité qui déclencha le processus et fit jaillir l'étincelle. Il était en effet possible, simplement, naturellement, conformément aux principes platoniciens, de forger une solution à ce problème là. Si le Soleil parcourt uniformément un cercle (sur une sphère) dont le centre est la terre, l'affaire est sans solution ; mais si le centre du cercle est quelque peu distant de la terre, le nœud est immédiatement débrouillé. Tel est le concept fondamental de l'*excentrique*. (ici il est fixe).

Un schéma précis est donné in Gapaillard, p.71

Deux arcs de cercle de même longueur, vus de la Terre, ne correspondent pas à des angles égaux ; voici pourquoi, selon que le soleil est proche de la terre (lorsqu'il est à son *périgée*), il semble évidemment plus grand mais aussi plus rapide que lorsqu'il est plus éloigné de nous (à son *apogée*) où il apparaît à la fois plus petit et plus lent.

Les conséquences de ce phénomène sont importantes : inégalité des saisons mais aussi *précession des équinoxes* : leur position, par rapport aux étoiles se décale un peu chaque année, si bien qu'il y a deux sortes d'année : l'année *sidérale* qui est le temps mis par le soleil, vu de la terre pour retrouver sa position par rapport aux étoiles et l'année *tropique* qui est le temps entre deux équinoxes de printemps. Celle-ci est plus courte que la première (environ 20' et 24 secondes). C'est toute l'affaire des calendriers qui redéfinit l'année civile au plus près de l'année tropique.

Chaque médaille a son revers et la simplicité, l'efficacité de ce cercle excentré, de cet excentrique, se paie d'un prix fort : la terre n'est plus au centre de la rotation solaire, autant dire du monde et le soleil ne tourne plus qu'autour d'un point géométrique, autant dire autour d'un rien ! Toute conception physicienne de cette situation est forcément en difficulté (le « lieu naturel » ou le centre de force, où le centre d'attraction). Quoiqu'il en soit, la solution, simple pour le soleil, puisqu'il y a un excentrique fixe, a peu à peu prévalu sous l'influence - vraisemblablement - des pythagoriciens. Le modèle du soleil est bien établi par Hipparque et c'est à peu de chose le même que reprendra Ptolémée.

L'épicycle

Une remarque doit être faite ici qui sera commentée plus tard : un cercle *épicycle* donne le *même* résultat.

Cette idée géométrique tend, tout naturellement à être généralisée et adoptée pour affronter la question de l'éloignement variable des planètes. Restait la question des stations et rétrogradations des autres planètes. Un nouveau cercle céleste va fournir une solution : l'*épicycle*. On peut, pour l'aborder, mettre de côté l'*excentrique*. Cf. schéma, de la feuille jointe.

La présentation donnée ici est évidemment extrêmement simplificatrice : les modèles *déférents et épicycles* doivent être distingués et modifiés selon qu'il s'agit d'une planète inférieure ou supérieure ; la double rotation peut expliquer les mouvements et anomalies en longitude, mais pas les déplacements transversaux par rapport à l'écliptique. La hauteur des planètes par rapport au plan de l'écliptique reste mal représentée par ce modèle.

A qui doit-on cette doctrine ? Peut-être à Théon de Smyrne (IV^{ème} av. JC), ou encore à Adraste d'Aphrodise (IV^{ème} av. JC.) ; elle est en tout cas, assez bien établie (en tout cas sous sa forme *épicyclique*) à la fin du III^{ème} av. JC. par le grand mathématicien Apollonius de Perge, l'« inventeur » des coniques (-260 ; -180). Théon indique que Platon la connaissait (Duhem, p. 83). A lire le *Timée* ou *La république*, ceci est faux.

Des hypothèses équivalentes

La grande figure qui domine la seconde étape de l'astronomie circulaire géocentrique est celle d'un mathématicien remarquable et un observateur infatigable, Hipparque de Nicée (161-127 av. JC) dont l'œuvre nous est connue par l'exposé qu'en a fait Ptolémée. A son actif, portons sans plus tarder ce splendide *catalogue des étoiles* où il a rassemblé des données d'observation concernant quelque 800 étoiles ; le repérage précis de l'apogée et du périhélie du soleil est aussi dû à Hipparque. Elle est lourde d'une autre conséquence : la *précession des équinoxes* : leur position, par rapport aux étoiles se décale un peu chaque année, si bien qu'il y a deux sortes d'année : l'année *sidérale* qui est le temps mis par le soleil, vu de la terre pour retrouver sa position par rapport aux étoiles et l'année *tropicque* qui est le temps entre deux équinoxes de printemps. Celle-ci est plus courte que la première (environ 20' et 24 secondes).

C'est toute l'affaire des calendriers qui redéfinit l'année civile au plus près de l'année tropique.

Le « théorème d'Hipparque ». L'équivalence des hypothèses.

L'astronome bithynien développa avec soin deux *modèles* : celui du soleil et celui de la lune, en les considérant de manière indépendante et autonome. Il utilise aussi un excentrique pour la lune.

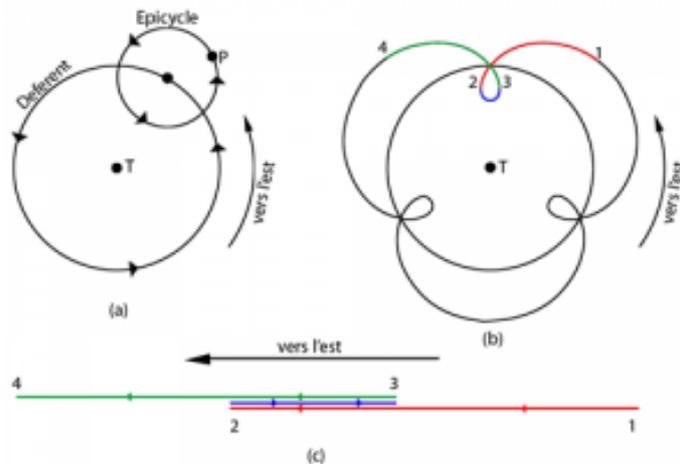
L'Epicycle

Hipparque utilise une autre hypothèse géométrique, un autre dispositif possible, l'épicycle. On peut remplacer le décentrage, l'excentrique par un petit cercle sur le grand : l'épicycle.

Dans sa forme la plus générale, voici en quoi consiste le modèle épicyclique : A chaque planète correspond un cercle *déférent*, tracé dans le plan de l'écliptique et ayant la terre comme centre. Un certain point C décrit ce cercle *déférent* d'un mouvement uniforme ; un tour correspond à la

durée de révolution zodiacale de la planète. Mais ce point ne représente pas la planète, il est - lui-même - le centre d'un cercle *épicycle* que parcourt la planète d'un mouvement uniforme. La planète est donc entraînée, relativement à la terre, par deux mouvements circulaires combinés, comme dans ces manèges où une nacelle tourne sur elle-même alors qu'elle est entraînée toute entière dans un vaste mouvement circulaire.

Voici que ce grand manège explique assez bien les stations et rétrogradations dans le zodiaque : vue de la terre, la planète semble bien s'arrêter, reculer, puis repartir dans sa direction principale.



L'équivalence des deux systèmes.

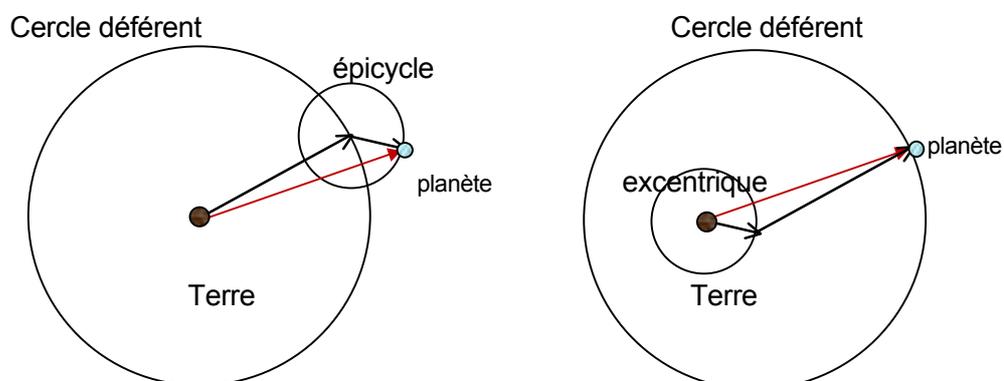
En réglant convenablement le rayon et la vitesse des rotations, on obtient la même position de S par rapport à T. Telle est la méthode de l'épicycle, équivalent à l'excentrique. (Cf. Gapaillard, p.72)

Schéma de l'équivalence épicycle-excentrique :

1. Un point parcourt un *petit* cercle autour de T, à la vitesse α et P décrit un *grand* cercle autour de C, à la vitesse β

2. Un point parcourt un *grand* cercle autour de T, à la vitesse β et P décrit un *petit* cercle autour de C, à la vitesse α

Le résultat apparent est le même.



Les stations et rétrogradations reçoivent une explication, en principe.

Commentaires

Il fallait, dans ces deux cas, et en reprenant les méthodes géométriques de l'épicycle, du déférent et de l'excentrique, régler avec le maximum d'exactitude les différents paramètres qui *sauveraient les apparences* : le rapport des rayons des différents cercles, leur vitesse de rotation. Pour le soleil et la lune, le succès est au rendez-vous et les modèles d'Hipparque seront suivis de près par Ptolémée.

Comme toute solution, celle-ci apporte avec elle de nouveaux problèmes ; ceux que suggèrent les travaux d'Hipparque ne sont pas mineurs. On en évoquera deux :

Si elle convient pour le soleil et la lune, la théorie ne suffit pas pour les mouvements des planètes ;

Les phénomènes, les hypothèses et les modèles

La lune, vue de la terre, est animée de certains mouvements : ces mouvements apparents, ce sont les phénomènes, ce que nous pouvons voir et mesurer. La lune, dans les cieux, parcourt certaine trajectoire réelle relativement au centre de la terre et aux étoiles fixes, cette trajectoire est en elle-même plus objective que les apparences données par les observations ; il y a plus et pour se conformer à une forte conviction, elle parcourt à vitesse uniforme des cercles déterminés qui existent dans les cieux et qui sont plus fondamentalement encore la vérité de ses mouvements, ce qu'on appelle alors et pour longtemps la *nature des choses*.

Connaître ces cercles, c'est connaître les véritables mouvements de l'astre, c'est connaître les véritables causes des phénomènes, des apparences.

Les doctrines du *déférent*, de l'*épicycle*, de l'*excentrique* sont les réponses à cette recherche des causes des mouvements apparents. Or voici ce que découvre Hipparque : deux modèles complètement différents, incompatibles l'un avec l'autre (c'est-à-dire, ne pouvant être vrais ensembles), expliquent aussi bien l'un que l'autre les phénomènes de la lune ; la situation est la même pour le soleil, de manière encore plus simple comme on l'a vu puisque l'excentrique est fixe.

Il y avait donc deux représentations contradictoires qui s'adaptaient à la même collection de faits d'observation ; les deux théories ne peuvent être des explications véritables en même temps. Une sorte de preuve est ainsi administrée du statut profondément distinct de la connaissance géométrique et de la connaissance physique des lois de la nature et des phénomènes. (Imaginons le type de situation pour des doctrines comme la théorie ondulatoire ou émissionniste de la lumière ou les deux fluides électriques).

Ainsi écrit Pierre Duhem, en citant largement Théon de Smyrne :

« Hipparque ... astronomiques » (Voir *Sauver les phénomènes*, p. 6-1).

On n'aura dès lors plus de moyen de connaître la vérité ! Si deux hypothèses sont tout aussi valables, comment pourrions-nous décider que l'une est la véritable ? Et pourquoi ne pas imaginer qu'il en existe encore une autre, ou plusieurs que nous n'avons pas imaginées ? Une cascade de questions fondamentales prend ici sa source et deux immenses courants de la pensée scientifique se dessinent :

Selon la première de ces orientations, le savant, le physicien, l'astronome doit renoncer à dire comment sont les choses 'en vérité', il doit abandonner la recherche des 'causes ultimes' des phénomènes ; sa tâche est de produire des hypothèses qui peuvent être justes, qui permettent de

décrire, de prévoir, de connaître les phénomènes. La science ne les explique pas, elle les représente. Appelons-la *phénoméniste* ou même conventionnaliste.

La seconde orientation est plus *réaliste* : elle poursuit la quête de la véritable explication des choses. Les épicycles mais aussi les excentriques fournissent deux bons modèles du soleil ou de la lune ; soit, mais l'un des deux est le bon et il convient de découvrir lequel. Pour cela, nous pouvons emprunter différentes voies :

La première, *a priori* partira d'arguments très généraux comme « le monde fonctionne selon la simplicité maximale », ou « il correspond à tel plan divin », ou encore « la beauté est le critère de la vérité » etc.

La seconde voie consistera à imaginer des expériences qui invalideront une des hypothèses candidates et retiendront donc, comme vraie, celle qui n'aura pas été invalidée. C'est la doctrine de l'*experimentum crucis*, théorisée par Francis Bacon de Verulam.

Cette immense discussion n'a jamais été close et se poursuit aujourd'hui dans à peu près tous les domaines de la science. Il est remarquable de pouvoir en situer précisément un de ses principaux moments originaires : le théorème d'Hipparque selon lequel les mouvements apparents de la lune, ou du soleil s'expliquent tout aussi bien par la doctrine des épicycles que par celle des excentriques.

On doit aussi noter que, lors de cette discussion, on trouve une évocation - purement hypothétique - faite par Posidonius (-135 ; -51) de l'équivalence possible des systèmes géocentriques et héliocentrique. On imagine l'importance de cette discussion 16 siècles plus tard.

« Souvent le physicien s'attachera... des cercles obliques » (in Duhem, p.10-11) Texte tiré des *Météorologiques*, reproduit par Géminus et transmis par Simplicius dans son commentaire des quatre premiers livres de la physique d'Aristote.

Sur l'adéquation selon la nature des choses ou par accident, cf Duhem, p.110-111.

Ptolémée (2^e siècle ap. JC)

La géométrie du ciel, avec Hipparque et ses successeurs avait énormément progressé, les mesures et les observations de même ; les outils de l'astronome étaient donc de plus en plus puissants et performants. Mais, si le soleil et la lune correspondaient à un modèle efficace (et même à deux), les planètes résistaient. Les phénomènes de variation des rétrogradations selon la période zodiacale en particulier ne s'expliquaient bien, ni par l'excentrique, ni par l'épicycle.

Claude Ptolémée va réaliser une de ces magistrales synthèses dont rêve la science. Comme l'écrit Pierre Duhem, « Ptolémée atteint son objectif aussi parfaitement qu'il est donné à un esprit humain de réaliser un idéal ».

Un passage de son introduction mérite de s'y arrêter :

« Ces hypothèses qu'il était nécessaire de poser tout d'abord, en vue de certaines parties de notre enseignement et des conséquences qui en découlent, il nous suffira de les avoir présentées, jusqu'à un certain point, comme en des résumés, car elles seront établies et confirmées d'une manière pleinement satisfaisante, par l'accord que présenteront, avec les apparences, les conséquences qui en seront déduites plus tard ». (Livre I, chap. VII, cité par Duhem, p. 94).

Très important : position épistémologique extrêmement *lisible* par nous, aujourd'hui : des hypothèses dont la validation vient largement de la puissance des conséquences qui en

découlent : un indispensable courant *a priori-a posteriori*. Les savoirs *a posteriori* n'étant possibles, ou accessibles que parce que sont adoptées des thèses *a priori* ; celles-ci n'étant, à leur tour valide qu'en raison de ces savoirs.

Comme tous les grands savants, il est à la fois un héritier et un initiateur. Héritier d'Apollonius, d'Hipparque, il reprend le modèle du soleil - en préférant la solution épicyclique - et de la lune. Il est sensible à l' « équivalence des hypothèses » : ainsi note-t-il :

« Nous suivrons, pour cette démonstration (il s'agit de résoudre les *deux* inégalités de la lune) la méthode dont nous voyons qu'Hipparque s'est servi... Nous pourrions également expliquer la première inégalité, soit par l'épicycle, soit par l'excentrique, mais comme nous avons deux inégalités, nous jugeons plus convenable d'employer l'une des hypothèses pour la première inégalité et l'autre pour la seconde » (cité par Duhem, p. 86).

Il en règle les détails avec précision et exactitude. Il mobilise et développe les moyens mathématiques de ses prédécesseurs ; en particulier la trigonométrie, la mathématique des angles dont on ne sait pas assez qu'elle est née dans et pour les cieux.

Puis il s'attaque à Vénus ! Ptolémée se fait alors iconoclaste. Il introduit dans le modèle un nouveau dispositif géométrique qui - comme à l'habitude - résout admirablement des problèmes mais au prix d'affirmations et de thèses difficilement acceptables.

Ses postulats de départ sont pourtant d'un grand classicisme : Le ciel est sphérique, il se meut d'un mouvement de rotation ; la terre est sphérique ; elle est immobile au centre du monde.

L'équant rompt l'uniformité

La nouveauté qu'introduit Ptolémée est *l'équant*, système géométrique superbe qu'il faut tenter de présenter aussi simplement que possible :

Ptolémée emploie à la fois un cercle déférent excentré (donc un cercle excentrique) et un cercle épicycle. Normalement, le centre du cercle excentrique est animé d'un mouvement uniforme par rapport au centre du déférent : en un même intervalle de temps, le même arc de cercle déférent est décrit. Cette contrainte implique que les rétrogradations apparentes sont d'égale longueur - ce qui n'est pas conforme aux observations - Ptolémée s'en libère en imaginant un autre point, dit *équant* distinct de la terre et distinct du centre du cercle déférent : c'est autour de ce point imaginaire que l'uniformité angulaire du mouvement de la planète est respectée. Une conséquence immédiate de ce système est que la rotation du rayon (centre de l'épicycle-centre du déférent), n'est plus uniforme.

(Photocopie des pages 160-161 de Verdet)

« Le cercle équant est une merveille géométrique ; c'est une calamité physique ou doctrinale : le mouvement uniforme est écorné. » . Cet artifice est rapidement critiqué comme contrevenant aux principes de circularité simple, en particulier, il sera violemment rejeté par les astronomes arabes. Dans son Résumé d'Astronomie, Ibn-al-Haitham s'élève contre ceux qui, pour rendre compte des mouvements célestes « construisent des démonstrations abstraites... cercles fictifs » (in Duhem, p. 29-30).

Il est d'ailleurs possible d'imaginer une autre équivalence avec deux épicycles au lieu de l'équant. Tel est donc l'artifice par lequel Ptolémée est parvenu à sauver les mouvements apparents de Vénus, avec une exactitude jugée suffisante pendant de longs siècles.

Le modèle de Vénus ayant cédé devant l'équant, l'astronome d'Alexandrie ne s'arrête pas et comme il l'explique « pour les trois autres planètes, celle de Harès, celle de Zeus et celle de

Chronos, nous avons trouvé que l'hypothèse du mouvement était unique , et qu'elle était semblable à celle que nous avons conçue pour l'astre d'Aphrodite ».

Le problème est très sérieux le principe platonicien de la rotation uniforme des cercles est remis en cause!

Reproduire la page 41 de *L'image du monde*.

L'édifice ptoléméen est imposant ; le niveau mathématique atteint est un sommet ; que l'on songe aux délicates constructions géométriques qu'il s'agit de maîtriser pour rendre compte de mouvements irréguliers de mieux en mieux connus ; que l'on songe notamment à un aspect des choses que l'on a passé sous silence pour simplifier l'affaire : les cercles des modèles ne sont pas véritablement coplanaires mais ont bien une certaine inclinaison *variable* les uns par rapport aux autres (c'est-à-dire que le cercle épicycle a une légère inclinaison par rapport au déférent !) et celui-ci en a une par rapport à l'écliptique. La géométrie et la trigonométrie doivent être en mesure de restituer ces mouvements relatifs tels qu'ils sont dans l'espace et pas seulement dans un plan ! Tout ceci, Ptolémée l'a fait et seule, l'œuvre de Copernic rivalisera de virtuosité géométrique avec l'*Almageste*.

Le résultat est si remarquable qu'il fait écrire à Bernard Cohen dans *Les origines de la physique moderne*,

« Avec des épicycles et un déférent (et un équant), les astronomes pourraient décrire presque tous les mouvements planétaires observés tout en restant dans le cadre du système de Ptolémée ». (p.44)

Les hypothèses planétaires

Il faut ajouter que les modèles des planètes sont géométriquement indépendants : ils peuvent être modifiés et *activés* sans jouer les uns sur les autres. Le modèle est valable à *une homothétie près*. On peut multiplier la taille par k sans changer sa validité.

On doit à Ptolémée un autre grand ouvrage *Les hypothèses planétaires*. La *composition mathématique* est une astronomie, *les hypothèses* constitue une cosmologie. Pourquoi ?

Une coïncidence ? Cherchant quelques données « en distance », Ptolémée établit $64 R_t$ comme distance *maximum* de la terre à la lune qu'il adopte comme distance *minimum* entre la terre et Mercure (le modèle voisin) La doctrine des épicycles lui livre alors $166 R_t$ comme distance maximale ; prise à son tour pour distance minimale Terre-Vénus (modèle suivant), qui impose à son tour comme distance maximale $1079 R_t$. Or, Vénus est proche du soleil et celui-ci avait été estimé éloigné de $1160 R_t$ de la terre. Cette correspondance donne une orientation *réaliste* aux modèles et à leurs agencements. Ptolémée s'engage dans l'analyse de la contiguïté des lieux des planètes et dans l'agencement physique des astres.

« Bien que cette description physique du monde ne repose sur aucune considération scientifique, elle présente l'avantage de mettre de l'ordre là où l'*Almageste* laisse beaucoup de latitude quand à la configuration d'ensemble des domaines d'évolution des différentes planètes. Les empiètements possibles entre les différents modèles sont supprimés. Le système figé qui en résulte où les planètes sont sagement rangées les unes à côté des autres sans ménager d'espace inutile entre leur domaine d'évolution, donne de l'univers une image rassurante et facile à décrire. Bien plus que les abstractions géométriques complexes de l'*Almageste*, c'est cette disposition du monde qui a frappé les esprits et qui constitue le *système*

de Ptolémée, dont la littérature a multiplié les représentations simplifiées » (Gapaillard, p. 77-78).

On trouve la thèse de l'humilité, de la modestie de la raison humaine face à celle de Dieu : gardons-nous de juger de la simplicité pour Dieu, selon ce qu'elle apparaît pour nous

« les dieux assurément ont un plus sûr jugement ; mais pour nous, il faut nous contenter d'atteindre seulement l'à-peu-près de ces choses car nous sommes des hommes [...] en sorte que nous parlons selon la vraisemblance et que les discours que nous tenons ressemblent à des fables ». Texte de Proclus, thèse aussi prêtée à Ptolémée par Duhem (cf. p.23)

ERATOSTHENE

Lorsque le roi Ptolémée III Evergète d'Alexandrie s'avisa de trouver un précepteur pour son fils, le futur Ptolémée IV Philopator, il s'adressa à l'un des principaux savants athéniens, Eratosthène originaire de Cyrène où il était né en -275. Mathématicien, astronome, géographe, philosophe, mais aussi grammairien, poète et historien, il est le plus remarquable représentant de ce que pouvait produire la grande culture grecque. Son départ d'Athènes pour Alexandrie, à la fin du troisième siècle avant J.C. symbolise bien le passage de témoin entre ces deux centres de culture et de puissance politique : dorénavant, le sceptre est bien chez les héritiers directs du grand Alexandre ; Euclide, Archimède, Eratosthène, Hipparque etc. sont des hellènes alexandrins. En plus de sa fonction de précepteur du prince, Eratosthène va diriger le fabuleux musée et la bibliothèque d'Alexandrie, qui contient jusqu'à 700 000 ouvrages.

Déjà, les Ecritures sacrées

Eratosthène a eu des ennemis posthumes. Hipparque lui reprochait surtout un manque de rigueur dans ses mesures et observations géographiques et astronomiques. Plus grave est l'accusation de l'historien Strabon. Littéraire, grammairien et poète, Eratosthène aimait Homère, mais il critiquait fermement ceux qui considéraient l'auteur de *Illiade* comme infaillible et qui cherchaient obstinément à concilier les récits homériques (sacrés) concernant le ciel ou la géographie avec les découvertes récentes. C'est justement cette liberté critique contre les dogmatiques que Strabon n'aimait pas chez Eratosthène.

UN SAVOIR ENCYCLOPEDIQUE

Comment choisir, parmi tant de talents, celui qui dira le mieux ce que fut, et ce que fit Eratosthène. Il était l'ami d'Archimède avec qui il discutait de géométrie et d'arithmétique ; une méthode de tri pour sélectionner les nombres premiers a été baptisée *crible d'Eratosthène*. Il semble avoir été l'un des premiers à émettre une théorie des marées en associant les effets océaniques (au delà des colonnes d'Hercules, à la sortie de la Méditerranée) et les courants alternatifs du détroit de Messine et en montrant que ce mouvement bi-quotidien semble lié à la position de la lune. Notre connaissance des auteurs anciens, de certaines légendes (comme celle de l'oracle de Delos), la description des mentalités à l'époque hellénistique lui doit aussi beaucoup, mais il est un savoir dont la paternité lui revient en propre ; c'est lui qui a vraiment créé la géographie mathématique.

LA GEOGRAPHIE MATHEMATIQUE

Depuis que la sphéricité de la terre était établie et reconnue par le monde savant (seuls les atomistes épicuriens partageaient l'opinion de la foule ignorante contre cette théorie), donc depuis le quatrième siècle, une nouvelle définition de la géographie s'était imposée, soutenue notamment par Aristote. Plus tard, le plus éminent des astronomes géographes, Claude Ptolémée, la présenterait ainsi : *Faire la lumière sur la forme et la grandeur de la Terre et sur sa*

situation par rapport à la sphère céleste, pour qu'on puisse déterminer l'étendue et la constitution de la partie que nous connaissons ; sous quels parallèles célestes sont situés les divers lieux. D'où l'on déduit les longueurs des jours et des nuits, les étoiles visibles au zénith et celles qui se trouvent toujours, soit au-dessus, soit au-dessous de l'horizon, enfin, tout ce qui est contenu dans la notion de lieu habité.

C'est une belle et solide tradition qui associe étroitement la découverte de la forme sphérique à l'essor de la géographie ; d'Argenville, l'un des rédacteurs de l'Encyclopédie, avec Diderot et d'Alembert, note qu'*après avoir reconnu la rondeur de la terre, on se servit de ce moyen pour connaître sa grandeur ; et le changement des latitudes et des hauteurs, soit du pôle, soit des astres, servit à connaître l'étendue de notre globe, en en mesurant une petite partie.*

LA MESURE DU RAYON TERRESTRE

L'idée exploitée par Eratosthène est - en principe - d'une simplicité enfantine : soit une portion de cercle

OAB ; si on connaît la mesure de l'angle α et celle de l'arc AB, il est immédiat d'en déduire la

mesure du rayon. On a $r = \frac{L}{\alpha}$.

L'application de ceci au globe terrestre est une autre affaire. Envisageons quelques unes des difficultés qui se présentent alors :

Les deux points A et B doivent être situés sur un même méridien, sous peine de n'avoir pas un *grand cercle* de la sphère terrestre. Il faut aussi que ces deux points soient assez distants pour espérer atteindre une bonne précision. Eratosthène choisit les villes d'Alexandrie et de Syène (aujourd'hui Assouan) qu'il jugeait conformes à ce premier impératif.

Il fallait connaître la distance entre les deux villes ; le choix semblait judicieux puisque les arpenteurs égyptiens avaient souvent dû évaluer les distances séparant ces deux cités arrosées par le Nil.

Reste le plus difficile, la mesure de l'angle α . C'est au soleil de la révéler : on considère ses rayons comme parallèles (ce qui est parfaitement raisonnable, même avec les estimations très réduites des distances interplanétaires d'alors). Assouan s'avère - à un troisième titre - être un bon choix : en effet, cette ville est sur le tropique du cancer et, au solstice d'été, les rayons du soleil frappent Assouan à la verticale. Comme l'indique le schéma ci-dessous, il 'suffisait' donc de mesurer l'angle des rayons solaires, au solstice d'été, à Alexandrie. Pour des raisons géométriques élémentaires, cet angle a aussi pour mesure α . Eratosthène utilisa certainement un *Gnomon* pour le calculer.

On connaît les mesures qu'obtint notre géographe astronome : α fut estimé à $1/50^\circ$ de grand cercle ; la distance entre Alexandrie et Syène fut trouvée très légèrement supérieure à 5 000 stades ; la conclusion était immédiate : le cercle méridien vaut 50 fois 5 000 stades, soit 250 000 stades (les textes anciens précisent en donnant 252 000 stades). Comme le stade égyptien vaut 157,5 m, la circonférence de la terre est déduite par Eratosthène avec l'incroyable précision de 39 690 km (pour 40 074 km de circonférence équatoriale 'réelle').

La chance est parfois au rendez-vous du génie : elle servit Eratosthène dont les mesures étaient doublement erronées : Alexandrie et Syène ne sont pas sur le même méridien (il s'en faut de plus de 200 km et 5 346 stades (au lieu de 5 000) les séparent ; il se trouve que ces deux erreurs, au lieu de s'amplifier l'une l'autre, se corrigent et s'annulent. Hipparque avait peut-être raison de critiquer le manque de précision des mesures d'Eratosthène, mais l'idée fondamentale de ce dernier, l'association de la géométrie, de la géographie et de l'astronomie est si admirable que les reproches s'y échouent sans pouvoir l'altérer.

Le Gnomon

C'est un instrument qui sert à mesurer la longueur des ombres et les hauteurs du Soleil. Il peut s'agir tout simplement d'une règle très droite et plantée bien verticalement. L'ombre la plus courte de la journée correspond à midi, la plus courte de l'année au solstice d'été et la plus longue, le solstice d'hivers. Le théorème de Thales et les règles de la trigonométrie permettent d'en déduire bien des rapports. Il a été immédiatement employé en astronomie ; il était fixé sur un support en demi-cercle qui, correctement gradué, servait aussi de quadrant solaire.