

AU XVII^E SIECLE, UNE PHYSIQUE NOUVELLE POUR UN NOUVEAU MONDE.

PLAN DU COURS

INTRODUCTION, DE 1542 A 1687

PREMIER CHAPITRE : LE SYSTEME DU MONDE

Ce qu'a accompli Copernic

Le *Néo-copernicianisme*

La cosmologie cartésienne, avec une note sur Pascal.

Note sur la synthèse newtonienne.

DEUXIEME CHAPITRE : LE MOUVEMENT DES CORPS MATERIELS.

Théories antérieures.

Chute des graves

Inertie. Galilée, Descartes et *al.*

TROISIEME CHAPITRE : LUMIERE ET REFRACTION

Huygens

Descartes

Leibniz

Newton

QUATRIEME CHAPITRE : LE VIDE

La querelle du vide

Les conceptions de l'espace.

Epistémologie du XVIIe : *a priori versus* phénoménisme.

Quelques thèmes généraux : social studies. Mathématisation. Paradigme physique.

INTRODUCTION. DE 1543 A 1689

DEUX LIVRES,

Le *De Revolutionibus Orbium Coelestium* de Nicolas Copernic, publié en 1543 à Nuremberg.

Les *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* publiés à Londres par Isaac Newton. Traduction française par Emilie du Châtelet en 1756.

Ces deux livres encadrent ce qu'on a coutume d'appeler « la science classique » (cf. Dictionnaire flammarion).

Ce segment historique et conceptuel est associé à l'expression « Révolution Scientifique » qui suggère au moins deux problèmes, un problème de rythme et le problème de l'unité de la science.

Le premier est bien posé par les positions très distinctes de P. Duhem et A. Koyré et par la suggestion de T. Kuhn.

Le second est difficile. On a assisté au triomphe du paradigme physique et même astronomique. Est-ce une victoire justifiée et jusque à quand ?

LE CONCEPT DE REVOLUTION SCIENTIFIQUE

Cette expression est devenue incontournable pour se forger une idée des allures adoptées par les sciences au cours de leur histoire. Elle est incontournable, notamment parce qu'elle s'est avérée assez riche pour alimenter la réflexion et la controverse sur le sujet. Il faut commencer par clarifier les deux sens de l'expression « révolution scientifique ». On s'occupera essentiellement du premier.

La *Révolution scientifique du XVII^e siècle*.

On dispose d'une part d'un concept historique qui concerne « la révolution scientifique du XVII^e ». Le principal créateur en est Alexandre Koyré qui l'expose et l'utilise notamment dans ses *Etudes galiléennes*, écrites en 1939.

[Une des plus importantes, si ce n'est la plus importante depuis l'invention du Cosmos par la pensée grecque, mutation de l'intellect humain¹ fut certainement la révolution scientifique du dix-septième siècle, profonde transformation intellectuelle dont la physique moderne ou plus exactement classique, fut à la fois l'expression et le fruit.²

La terminologie est susceptible de variation et il arrive à Koyré de nommer cette transformation « révolution galiléo-cartésienne »³. Il précise d'ailleurs que si « elle est née avec et dans les œuvres de Galileo Galilei [elle] s'est achevée dans celles d'Albert Einstein »⁴.

Je ne décrirai pas ici en long les conceptions et les arguments de Koyré qui sont bien connus. Disons seulement que, si l'on devait caractériser les axes qui, selon Koyré, structurent cette révolution, on en mentionnerait trois : le traitement mathématique des théories et des expérimentations, le modèle épistémologique de la physique et le rejet radical du positivisme, en faveur d'une visée réaliste⁵.

Peut-être a-t-on moins commenté les prises de positions très hostiles de Koyré envers le positivisme. Il ne vise pas tant Auguste Comte qu'une attitude générale et fort ancienne qui, selon lui, est un renoncement.

¹ Notion que Koyré dit avoir emprunté à Gaston Bachelard, in NES.

² *Etudes galiléennes*, p. 12

³ Koyré, « Galilée et la révolution scientifique du XVII^e siècle », dans *Etudes d'histoire...*, p. 196.

⁴ A. Koyré, *Galilée et la révolution scientifique*, p. 197.

⁵ Pour une présentation brève et dense de ces trois points, on pourra relire son article classique « les origines de la science moderne », dans *Etudes d'histoire de la pensée scientifique*.

Le positivisme est fils de l'échec et du renoncement. Il est né de l'astronomie grecque et sa meilleure expression est le système de Ptolémée. Le positivisme fut conçu et développé, non pas par les philosophes du XIII^e siècle (ici, c'est notamment Guillaume d'Ockham et la méthode nominaliste qui sont visés), mais par les astronomes grecs qui [...] se trouvèrent dans l'incapacité de pénétrer le mystère des mouvements vrais des corps célestes, et qui, en conséquence, limitèrent leurs ambitions à *un sauvetage des phénomènes*, c'est-à-dire à un traitement purement formel des données de l'observation. Traitement qui leur permettait de faire des prédictions valables, mais dont le prix était l'acceptation d'un divorce définitif entre la théorie mathématique et la réalité sous-jacente. [...] C'est cette conception –qui n'est nullement progressive comme semble le croire M. Crombie, mais au contraire rétrograde au plus haut point– que les positivistes du XIV^e siècle, assez proches en cela de ceux du XIX^e et du XX^e qui ont seulement remplacé la résignation par la fatuité... Et c'est par révolte contre ce défaitisme traditionnel que la science moderne, de Copernic à Galilée et à Newton, a mené sa révolution contre l'empirisme stérile des Aristotéliens, révolution qui est basée sur la conviction profonde que les mathématiques sont plus qu'un moyen formel d'ordonner les faits et sont la clé même de la compréhension de la Nature.⁶

On doit donc observer que la position philosophique réaliste de Koyré, son opposition globale au positivisme, constitue le socle de l'élaboration de sa *Révolution scientifique* qui constitue une percée décisive, physico-mathématique, vers la « réalité sous jacente ».

On doit d'autre part souligner que Koyré voit dans cette révolution une vraie discontinuité :

La science née de ses efforts et de ses découvertes (Galilée, mais aussi Descartes) *ne suit pas* l'inspiration des « précurseurs parisiens de Galilée » ; elle se place immédiatement à un niveau tout autre (voilà la discontinuité), le niveau que j'aimerais appeler archimédien⁷.

Alexandre Koyré ne dit pas que cette Révolution scientifique du XVII^e siècle fut absolument la seule quoique, à ma connaissance, les allusions qu'il fait à d'autres épisodes révolutionnaires de l'Histoire des sciences soient discrètes et assez rares. On rencontre dans ses écrits l'idée –assez générale– selon laquelle les « idées scientifiques » ont une histoire faite « d'évolution (et de révolutions) [...] sur la voie de l'intellection du réel. »⁸. Il est question de « mutation intellectuelle », au sens que Gaston Bachelard a donné à cette locution dans le *Nouvel Esprit Scientifique*. Outre celle du XVII^e siècle, Koyré en évoque deux autres, celle de « l'invention du Cosmos par la pensée grecque » (*Ét. Gal.* p. 12) et « la révolution scientifique des dix dernières années » (c'est-à-dire dans le courant des années 1920-1930).

Très rapide mention du second sens de l'expression *Révolution scientifique*.

Un élargissement considérable de perspective a été proposé par T. Kuhn en 1962⁹ dans le classique ouvrage *La Structure des révolutions scientifiques*, et ceci est réalisé à partir d'un modèle, celui de « la » révolution copernicienne (étudiée en 1957 par Kuhn) »¹⁰.

Continuisme versus Révolution ?

Il est juste de voir en P. Duhem un des principaux tenants d'une interprétation selon laquelle les théories nouvelles sont toujours étroitement liées à celles qui les ont précédées –ce qu'on nomme vision continuiste - Mais la théorie de Pierre Duhem est-elle incompatible avec le schéma que –peu après lui- proposera Thomas Kuhn ? Certainement pas. Il n'est que de relire *La théorie physique* pour s'en convaincre et saisir tout ce dernier lui doit. Tant il est vrai

⁶ Koyré, « Les origines de la science moderne », dans *Études d'histoire de la pensée scientifique*, p. 81-82.

⁷ Koyré, « Galilée et Platon », 1943, trad. Dans *Études d'histoire de la pensée scientifique*, p. 172

⁸ *Études galiléennes*. p. 11

⁹ On trouvera une présentation, part exemple dans Br. p. 96-97

¹⁰ Pour Kuhn, « Koyré montre la voie, montre ce qu'il faut faire ». (cf. livre de James A. Marcum

que la reconnaissance de la continuité en histoire des sciences ne réfute pas le concept de Révolution scientifique, au sens de changement radical de paradigme.

Les théoriciens de la continuité ont parfois eu tort de croire qu'ils devaient dénoncer comme non pertinent le concept de révolution ; on l'a dit, P. Duhem, champion du continuisme se croit parfois obligé de l'invalider:

La science mécanique et physique, dont s'enorgueillissent à bon droit les temps modernes, découle, par une suite ininterrompue de perfectionnements à peine sensibles, les doctrines professées au sein des écoles du Moyen-âge ; les prétendues révolutions intellectuelles n'ont été le plus souvent que des évolutions lentes et longuement préparées ; les soi-disant renaissances, que des réactions fréquemment injustes et stériles ; le respect de la tradition est une condition essentielle du progrès scientifique¹¹.

Duhem relie étroitement et soigneusement les apports de Jordanus de Nemore sur le principe du levier droit et les vastes théories modernes de statique rationnelle :

D'une part en un manuscrit du XIII^e siècle[l'historien] déchiffre quelques lignes d'une écriture gothique presque effacée [...] d'autre part il feuillette de vastes traités composés au XIX^e siècle. (En ces traités, la méthode des déplacements virtuels...). Quel disparate entre la minuscule démonstration de Jordanus et les imposantes doctrines des Laplace, Gibbs et Helmholtz ! Et cependant, les doctrines étaient en puissance dans cette démonstration. L'histoire nous a permis de suivre pas à pas les efforts par lesquels elles se sont développées à partir de cette humble semence. Ce contraste entre le germe extrêmement petit et extrêmement simple et l'être achevé, très grand et très compliqué, le naturaliste le contemple chaque fois qu'il suit le développement d'une plante ou d'un animal quelque peu élevé en organisation. *L'origine de la statique*, in Br. p.115.

Une analogie très *duhémienne* est celle de la larve et du papillon : « Le vol gracieux du papillon aux ailes chatoyantes a fait oublier les lentes et pénibles reptations de l'humble et sombre chenille » (in Br. p.113).

C'est tout-à-fait autre chose, mais dans une stricte hérédité. Les modèles biologiques servent à Duhem : celui du développement et de croissance des plantes par exemple.

Que répondrez-vous à la question « l'histoire de la vie d'un *bombyx* xxxx est-elle continue ou révolutionnaire ? Et celle d'un épi de blé ?

EXAMEN DES DOMAINES.

Pour se faire une idée bien fondée de l'ampleur et de la nature de ce qui se passe alors, on n'a pas d'autre moyen que d'examiner d'assez près les divers aspects de l'activité scientifique.

Proposition : description des grandes lignes de cet ensemble d'événements. Je choisis 5 dimensions, ayant chacune ses aspects intellectuels, technologiques et institutionnels :

1.Le système du monde ou cosmologie. Il est entendu depuis les ioniens, Pythagore et Platon que c'est un monde ordonné. Comment fonctionne-t-il ? de quoi sont faits les astres ? a-t-il des limites ? Que peut-on en connaître ?

2.Les conceptions de la matière. Le vide existe-t-il ? Atomes insécables ou matière fondamentalement homogène (le débat intensément engagé depuis Aristote versus Démocrite). Que sait-on des éléments fondamentaux (les quatre éléments, l'alchimie). Les théories de la lumière.

3.La mécanique et la dynamique : " ignorer le mouvement, c'est ignorer la nature ". Quels principes gouvernent le mouvements des corps, et en particulier celui de la chute des

¹¹Les origines de la statique, in Br. p. 93

graves ? Y a-t-il des principes de conservations, des principes architectoniques (une nature économe, un principe d'économie) ?

4. Les mathématiques : elles ont toujours eu une place éminente comme prototype du savoir certain et discursif. Cette science devient candidate à être la langue principale, voire unique pour comprendre les phénomènes. C'est le message galiléen du *Saggiatore*.

5. La physiologie. Comment doit-on envisager l'étude des êtres vivants ? Vitalisme versus réductionnisme.

REMARQUES GENERALES

On dispose d'une accumulation de lois physiques, astronomiques, mécaniques, optiques, statique des fluides, balistiques, physiologiques et surtout d'un mode d'expression et de rationalisation de ces phénomènes qui semble devoir être performant : les mathématiques.

On est face à l'émergence d'un nouveau lieu : le laboratoire où sont reproduits et imaginés des phénomènes plus riches, plus complexes (le vide, l'optique, les plans inclinés, les observatoires astronomiques, les salles de dissections...).

On obtient de considérables retombées technologiques : la mesure du temps, la navigation, la cartographie, les télescopes, thermomètres, machines à poulies, éclairages et effets optiques etc.

Tout ceci s'accompagne un peu partout de la création d'institutions savantes : Cercle Mersenne, Académie *dei lincei*, Royal Society de Londres, Académie Royale des Sciences de Paris, de Berlin etc. Des revues *Acta eruditorum*, *Philosophical transactions* etc.

Il convient d'être attentif aux racines de ces idées et pratiques nouvelles : l'héliocentrisme a eu des précédents (Aristarque, Nicolas de Cues...), l'algèbre a mûri chez les arabes du XII^e siècle, la variation instantanée a été théorisée chez les scolastiques de Paris et d'Oxford au XIV^e siècle et les noms de Nicola Oresme, de Bradwardine, de Buridan doivent revenir à la lumière ; l'optique géométrique avait été très poussée par Alhazen, pour ne rien dire de l'atomisme. Des arguments puissants en faveur du continuisme existent (Pierre Duhem).

Le dogmatisme en philosophie et en science n'est pas éteint et Descartes apparaît à beaucoup comme le fondateur d'une nouvelle science métaphysique, et donc dogmatique.

LE SYSTEME DU MONDE

NICOLAS COPERNIC (1473-1543)

BIOGRAPHIE

Nicolas Copernic est né le 13 février 1473 à Thorn, (Thorun). Un humaniste : études à Cracovie puis Italie, Bologne, Rome, Padoue. Retour en Warmie en 1503. Il s'est procuré des instruments d'observation et la grande idée mûrit lentement, mais sûrement.

Quelques rares bibliothèques de par le monde possèdent ce joyau, sorti de chez l'imprimeur, en mai 1543 dont un à Brest. C'est sur son lit de mort que son auteur, Nicolas Copernic, reçoit le premier exemplaire imprimé du *De revolutionibus orbium coelestium libri sex* (« Six livres sur les révolutions des orbes célestes »).

LE COMENTARIOLUS

Si le mûrissement du nouveau système est lent et progressif, dès 1510 ou au plus tard en 1512, (selon Szece., 1506) il est en possession des grandes lignes du nouveau modèle. Il a en effet rédigé, à cette date, un *Comentariolus*, bref, schématique et fort clair qui dévoile l'architecture du chef d'œuvre à venir.

Ainsi qu'il l'écrira dans sa préface au *De revolutionibus*, il lui faudra quatre fois neuf ans de patience avant la publication du grand traité.

Une chose est de concevoir les grandes lignes du système, une autre d'accumuler, d'organiser, d'étayer l'ensemble des données, des arguments et des calculs sans lesquels l'intuition de départ - si remarquable fut-elle - resterait sans effet.

Copernic a travaillé seul, longtemps isolé et sans disciples. Le plus remarquable est qu'il n'a pas de véritables précurseurs. Bien entendu, certains ont déjà souligné les insuffisances du système géocentrique ptoléméen ; certains, comme Nicolas de Cues, ont imaginé un monde infini, mais, ni celui-ci, ni Léonard de Vinci, ni aucun des grands savants de la renaissance n'ont précisément préparé le terrain à la révolution copernicienne. Il faut remonter jusqu'à Aristarque de Samos. Quelques précisions : on attribue le mvt de la Terre à des pythagoriciens (Philolaos, Héraclite du Pont). Des latins du XIV^e ont examiné les arguments en ce sens (Jean Buridan, Thémon le Juif et Nicole Oresme), sans qu'aucun d'eux ne l'accepte.

LA GENESE DU TRAITE : MAL CONNUE

Un excellent géomètre, comme l'était Copernic, est parfaitement à même de saisir que des modèles géométriques distincts et bien choisis sont aussi valables pour rendre compte des mouvements apparents des planètes et du Soleil. Cette idée fut discutée dans l'antiquité, par Hipparque, par Aristarque ou Archimède.

A partir du *Comentariolus*, il fallait donc construire une théorie complète, aussi puissante, mathématiquement, que l'avait été l'*Almageste* de Ptolémée. Le *De revolutionibus* devait être un traité de géométrie sphérique, une recension des données d'observations récentes, une exposition détaillée des mouvements complexes des astres (précession des équinoxes, durée de l'année etc.), tout ceci devant former un ensemble cohérent. Il lui fallut vingt ans (jusqu'en 1632) pour y parvenir.

Le premier livre présente les principes généraux, les livres suivants exposent les outils mathématiques utilisés (trigonométrie notamment, puis les concepts techniques nécessaires aux divers modèles et ces derniers.

Le jeune Joachim Rheticus, élève de Melanchton de Wittemberg, arriva à Frauenburg et, enthousiaste partisan de la théorie copernicienne, en rédigea et publia un excellent résumé

en 1540, la *Narratio prima*. Le succès fut immédiat et le maître s'inclina : le manuscrit du *De revolutionibus*, confié à Rheticus fut remis à Johannes Petreius, imprimeur de Nuremberg.

DES THESES TRADITIONNELLES

L'astronomie de Copernic présente tout d'abord quelques traits qui la rattache étroitement aux doctrines traditionnelles, aux dogmes aristotéliens ou -dans une autre mesure - à la tradition ptoléméenne.

- Son monde semble bel et bien fini

Il est perçu comme limité par une grande sphère matérielle, la sphère des étoiles fixes (quoique cette thèse soit très discutée et son contraire envisagée). Certes, le cosmos de Copernic est beaucoup plus grand que celui des astronomes traditionnels, il est même *immensum*, non mesurable, mais il n'est pas infini, ou indéfini, comme l'avait suggéré Nicolas de Cues et comme le défendront Giordano Bruno ou Descartes. Les planètes sont incrustées, serties dans des sortes de sphères matérielles, les orbes célestes qui les soutiennent et rappellent fortement les sphères cristallines de la tradition. Enfin, certitude des certitudes, tout ceci est sphérique, circulaire, parfaitement rond.

Cette perspective est reprise, d'entrée de jeu, dans le chapitre 1, livre 1 (voir citations)

Copernic suggère que la concavité de l'enveloppe du monde est bien sphérique et contiguë à la sphère des fixes mais que sa convexité est inconnue, peut-être même infinie (c'est anti-aristotélien) (Lerner 100). Qu'en est-il *ad extra* ? Nul ne le sait. Place aux arguments théologiques et métaphysiques.

Il considère longuement et de manière consistante la possibilité de l'infinité de l'Univers. Ce n'est pas un thème affirmé ; il introduit une incertitude, et celle-ci suffit pour la démonstration.

- Le règne de la circularité et de la rotation uniforme

Reprise de l'idée de la rotation comme mouvement qui s'engendre lui-même. Il convient à la forme parfaite et toujours identique à elle-même, la sphère ou le cercle. Telle est la loi, le principe de l'astronomie que Copernic partage avec les anciens.

« Le mouvement propre d'une sphère est de se mouvoir en cercle ; par cet acte même, elle exprime sa forme, celle du corps le plus simple sur lequel on ne peut trouver ni commencement ni fin, ni non plus distinguer entre l'un et l'autre, lorsque la sphère passant par les mêmes points, dans son mouvement, revient sur elle-même...et plus loin ...Il est indigne de supposer quelque chose de tel (une rotation non uniforme) dans les êtres constitués dans l'ordre le meilleur» (livre I, chap. IV, *in* Szcz., p. 154 et p. 158).

Même idée à la fin du livre I.

« Nous sommes en tout cas certains que la Terre est limitée par une surface sphérique. Pourquoi donc hésiterions-nous plus longtemps à lui attribuer la mobilité s'accordant par sa nature avec sa forme ? » (*De revolutionibus*, I, VIII).

Argument du mouvement simple accordé à une forme simple. Si donc, le mouvement diurne est naturellement associé à la terre dès lors qu'elle a une forme sphérique et aussi le mouvement annuel parce qu'elle est placée sur une vraie sphère, ceci entraîne que les formes sphériques et les mouvements soient vraiment réguliers et il faut éliminer toute « non-uniformité », comme l'équant.

On se souvient que Ptolémée avait eu recours à un point géométrique fort discuté, l'équant, pour sauver les apparences des mouvements planétaires. Belle solution géométrique, l'équant contrevenait à ces principes. Copernic s'élève contre cet accroc fait à l'uniformité du mouvement circulaire et veut s'en passer.

La place du mouvement circulaire des sphères est si éminente chez Copernic qu'en réalité, la terre, en mouvement, ne quitte pas son lieu. « Une grande partie de l'argumentation copernicienne a consisté à montrer que le mouvement de la Terre ne la faisait pas sortir de

son lieu naturel » & note 91 « On ne doit donc pas dire que la Terre est lancée dans l'espace. Elle reste en mouvement de rotation dans son lieu » (Szc. p. 123). Comment ne pas penser à Descartes « la terre est immobile *en son ciel* ».

LES PRINCIPALES SIMPLIFICATIONS GENEREES PAR LE NOUVEAU SYSTEME.

Donc, Soleil, Mercure, Venus, Terre-Lune, Mars, Jupiter, Saturne.

- La sphère des fixes est immobile

Première simplification : la sphère des étoiles n'a plus à tourner en 24 heures. Elle avait été examinée par Buridan et Oresme au nom du principe « d'économie des opérations de la nature, accepté –selon lui- par tous les philosophes » (Lerner 87) argument repris par Copernic. (il le sera par Galilée, Gassendi, Laplace, Flammarion etc.)

- Les stations et rétrogradations sont expliquées

Cette audacieuse hypothèse réalise d'un coup une formidable simplification de principe des apparences astronomiques. L'écheveau des stations et rétrogradations se trouve démêlé d'un simple geste : la Terre, et donc l'observateur, est elle-même en mouvement. Rhéticus, le principal disciple, écrit ainsi que

Les planètes sont observées chaque année comme animées d'un mouvement droit ou rétrograde, comme stationnaires, comme proches ou éloignées de la terre etc. Tous ces phénomènes, comme mon maître le montre, peuvent être expliqués par un mouvement régulier de la Terre sphérique autour du Soleil dans une orbite appelée par lui-même le grand orbe.

(Schéma explicatif à insérer ici). *Photocopier Gapaillard p.104*

D'abord testé et précisé pour Mercure et Venus, l'idée est généralisée.

- Un ensemble cohérent

Le tout est devenu harmonieux au lieu d'être monstrueux comme dans le précédent système. Copernic est très net sur ce point dans l'épître au Pape (cf. citations).

OBJECTIONS INHERENTES AU NOUVEAU SYSTEME

- Le monde a-t-il un centre ?

Dans le modèle de Copernic, le centre du monde existe toujours, mais il n'a plus le même sens : non seulement il est passé de la Terre au Soleil, mais encore, il a perdu son privilège physique. Les corps graves ne tombent pas verticalement sur terre parce qu'ils se dirigent naturellement - comme dans la doctrine aristotélicienne - vers le centre du monde.

On observe ainsi la séparation entre le *centre du monde* (le soleil) et le *centre des graves* (la terre). Cette situation est difficile pour Copernic qui doit admettre le nouveau statut de la lune, satellite de la terre avec nouveau centre.

La question du ou des centres de rotation des diverses planètes est ainsi renouvelé. Les planètes sont presque toutes excentrées. « Tous les mouvements planétaires ne peuvent être pensés que par rapport à des centres physiques divers » (p. 152).

- Le monde est un *immensum*. Deux conséquences

Toute hypothèse héliocentrique entraîne la terre dans un immense circuit annuel autour du soleil : il semble alors peu concevable que les variations de position dues à ce voyage énorme ne soient pas observables, par rapport aux étoiles fixes. L'angle qui repère la position de la terre devrait subir une variation, qu'on nomme la parallaxe. Or, aucune observation de parallaxe ne put être mise en évidence et ce fait a constitué une objection sérieuse contre le système. Copernic a beau agrandir formidablement la taille du cosmos (en le multipliant par 200), il a beau repousser au loin les étoiles fixes, de manière à diminuer la

parallaxe, il y a là une source de scepticisme à l'encontre de son hypothèse. Tycho Brahé en fera un obstacle rédhibitoire.

On remarque, qu'avec une limite « observable » de parallaxe de $0,1^\circ$ (en admettant qu'une variation inférieure ne puisse être vue), les fixes sont renvoyées à environ 4 000 000 rayons terrestres. On admettait alors 20 000 r.t. La différence semble extraordinaire, invraisemblable par exemple pour Tycho Brahé trente ans plus tard. Un facteur 8 millions pour le volume.

« Copernic passe outre à cette difficulté... Cela implique que l'espace entre la dernière sphère de Saturne et celle de la sphère ultime devienne immense » (p.27).

- Il existe des vides énormes entre les divers « sous systèmes ».

Associé à cette question, se pose le pb de l'abandon du Monde comme *plenum*. Le cosmos ptoléméen est tel que la sphère convexe (maximale, apogée) d'une planète inférieure coïncide (est contiguë) avec la sphère concave (minimale, périgée) de la planète supérieure (ex. Mercure et Vénus). Avec le système de Copernic et ses paramètres (donc les distances et tailles des orbes), il n'y a rien de tel ; soit plus de garantie ou d'immédiateté du plein cosmique (cf. Lerner 68-69). Notamment le « vide » énorme entre les cieux respectifs de Saturne et de Jupiter (3648rt).

Kepler insistera là dessus :

«[les naturels traditionnels croient que] de la surface inférieure de l'orbe lunaire jusqu'à la dixième sphère il n'y a pas de vide dans les orbes célestes, mais qu'un orbe est toujours en contact avec un autre orbe [Chez Copernic] aucun orbe n'est en contact avec un autre mais [...] il reste entre les divers systèmes d'immenses espaces [...] qui ne se rattachent à aucun des deux systèmes voisins.» *Le secret du monde*, chap. XIV, in Lerner, 70-71.

Une première remarque faite par Lerner :

« En introduisant dans la machinerie du monde jusqu'à lui immune de toute discontinuité, d'immenses intervalles vides sans emploi au regard des mouvements planétaires, Copernic mettait en branle un processus qui aboutira à l'éclatement de la sphère des fixes elle-même. Une issue qu'il n'avait là encore, probablement pas prévue, qu'il aurait sans doute refusée, et sur laquelle ses propres partisans seront partagés » (Lerner, 73)

- La matérialité des sphères

La question de la matérialité des sphères copernicienne est difficile.

« Il est clair –explique Scz. – qu'un mouvement planétaire ne peut se réaliser que s'il est supporté par une sphère. Pourtant on voit ici que seule compte la reproduction des apparences et que la question des supports de mouvement est passée sous silence ; certains mouvements ne peuvent pas être reproduits par des sphères. Doit-on dire alors que Copernic n'a pas été jusqu'au bout de son mouvement de dématérialisation des sphères, puisque subsistent et la sphère des fixes et le grand orbe ? Certes non, puisqu'il ne fait aucun doute qu'un mouvement ne peut être compris, pour un astronome du XVI^e que s'il est supporté par une ou des sphères » (p. 314)

Jugement délicat et même discutable de Scz. : comme s'ils étaient tous averroïstes sur cette question. Rosen pense que Copernic n'use de sphères que comme objets mathématiques sans réalité, c'est l'inverse pour le second. Lire les pages 313-314 de Scz. Sur ce point.

La sphère des fixes résiste particulièrement à l'anéantissement. Comme le dit Lerner :

« Surdéterminée métaphysiquement et théologiquement, la sphère ultime était, par définition, douée d'une forte capacité de résistance aux facteurs de déstabilisation qu'ont été –ou qu'auraient pu être de façon plus rapide- l'héliocentrisme et les observations télescopiques » (Lerner 78).

Le ciel extrême de Copernic est immobile, repoussé à une distance immense des corps mobiles et sa limite extérieure est déclarée inconnaissable.

- Les objections balistiques. Les oiseaux volent vers l'est ou l'ouest.

Copernic, prévoyant les objections balistiques, y avait partiellement répondu :

Les objets comme les nuages, les pierres, les oiseaux etc. sont des corps terrestres, ils font partie de cette planète et lui sont liés ; il est naturel qu'ils accompagnent le Tout qu'est la terre et même qu'ils tendent (pour les corps lourds) à descendre vers le sol.

« La terre est entraînée dans son mouvement circulaire non seulement avec l'élément aqueux qui lui est conjoint, mais encore une portion considérable de l'air ainsi que toutes les choses qui sont liées de la même façon avec elle » (*De revolutionibus*, I, in Szcz. p.125).

Ce mouvement *naturel* a aussi pour conséquence que ce mouvement est imperceptible : il ne saurait perturber l'ordre naturel et on ne le sent pas.

Comme on le sait, il faudra des arguments plus acérés, plus rigoureux et plus quantitatifs pour vaincre l'objection physique.

MOINS SIMPLE QU'IL N'Y PARAÎT

Malgré des qualités et des avantages exceptionnels, le système de Copernic n'a pas immédiatement convaincu la majorité des esprits. Il est sans doute normal qu'une thèse aussi nouvelle se heurte à des résistances, mais il faut bien dire aussi qu'il présentait des défauts et que son interprétation générale était indécise.

En principe, les excentriques ou les épicycles ptoléméens étaient rendus superflus dans le nouveau système puisque les stations et rétrogradations avaient reçu - du fait de l'héliocentrisme - une explication lumineuse et cohérente. L'admirable simplification de la machine céleste qui devait en résulter ne se retrouvait hélas pas, quand on examinait le détail de la théorie. Comme il refuse l'équant et puisque les trajectoires ne sont pas réellement circulaires, Copernic doit rajouter des mouvements et des cercles afin de rendre précisément compte des phénomènes et la complexité du nouveau modèle est proche de celle de l'ancien. Les centres de chaque orbe planétaire sont disjoints. Les inégalités du Soleil (différence des années tropiques et sidérales etc.) impliquent une excentricité (du soleil cette fois et non de la terre) et même une variation de cette excentricité (étude au livre III). Copernic propose même quatre « modèles « distincts » possibles pour le soleil ; modèles qui sont des combinaisons de mouvements épicycliques.

De plus, le respect des variations de latitudes (le passage des planètes au dessus et au dessous de l'écliptique) obligent à ajouter des nouveaux mouvements qui semblent artificiels placés pour sauver le mouvement de la terre.

Si la théorie de la lune est extrêmement réussie et si le mouvement lent associé à l'axe de rotation de la terre est une belle justification de la précession des équinoxes, il n'empêche, la grande simplification annoncée n'est valable que globalement, pas localement.

QUELLE ÉTAIT LA « BONNE » LECTURE DE COPERNIC ?

TROIS LECTURES

Nicolas Copernic a mis des années avant de se décider à publier le *De revolutionibus*. Finalement, il en a confié le soin à son disciple et ami Rheticus et, pour faire bonne mesure, il a lui-même soigneusement rédigé une dédicace au pape Paul III. C'est une sorte de mode d'emploi de la théorie nouvelle. En effet, la question se pose sérieusement de savoir comment on doit la recevoir. Il existe deux possibilités extrêmes :

Selon la première de ces possibilités, le traité révèle et explique le monde et les cieux tels qu'ils sont en vérité, 'selon la nature des choses'. C'est une lecture réaliste ; le *De revolutionibus* dit la réalité des mouvements célestes.

Une autre position radicale s'oppose à la précédente: nous ne savons pas ce qu'il en est réellement de l'organisation du monde, mais les astronomes mathématiciens sont en mesure d'imaginer des figures et des mouvements qui restitueraient bien les effets, les apparences, des mouvements réels des astres. Le *De Revolutionibus* serait alors une brillante hypothèse, une belle représentation des phénomènes ; elle coïnciderait 'par accident' avec la réalité - inconnue - du monde. Il y a là une forme de relativisme ou d'instrumentalisme.

Entre les deux, il y a place à des positions intermédiaires, plus nuancées.

Or, le chef d'œuvre de Copernic est rendu public sous un triple parrainage : le réalisme strict, le relativisme appuyé et le réalisme prudent.

La *Lettre au pape*.

« C'est pourquoi, lorsque je me présentais à moi-même combien absurde vont estimer cette *akroama* ceux qui savent être confirmée par le jugement des siècles l'opinion que la terre est immobile au milieu du ciel comme son centre, si par contre j'affirme que la terre se meut : je me demandais longuement si je devais faire paraître mes commentaires, écrits pour la démonstration de son mouvement ; ou au contraire s'il n'était pas mieux de suivre l'exemple des Pythagoriciens et de certains autres qui (...) avaient l'habitude de ne transmettre les mystères de la philosophie qu'à leurs amis et à leurs proches, et ce, non par écrit, mais oralement seulement. » (Trad Fernand Hallyn, « L'absurdum *akroama* de Copernic », *Bibliothèque de l'Humanisme et Renaissance*, t. 62, n° 1 (2000) pp.7-24.

« Je puis fort bien m'imaginer, Très Saint Père, que, dès que certaines gens sauront que dans ces livres que j'ai écrits sur les révolutions des sphères du monde, j'attribue à la Terre certains mouvements, ils clameront qu'il faut tout de suite nous condamner, moi et cette mienne opinion ».

Il admet qu'il y a un risque de transmettre à la foule incompétente une théorie scientifique nouvelle et difficile : le risque est la déformation et le discrédit de la science elle-même. Ce qu'il propose, c'est une thèse centrale, un noyau, un début en quelque sorte. Il a conscience de cet état des choses « Il se peut que toute absurde que paraisse maintenant au plus grand nombre ma doctrine du mouvement, elle ne doive obtenir que plus d'admiration et faveur une fois qu'on aura vu par l'édition de mes commentaires, les ténèbres de l'absurdité dissipées par les plus claires démonstrations » (p. 43). Voir le texte de la lettre.

Ce qu'il propose est « une structure unique qui soit nécessairement physique » (p.46) On reconnaît là une position quasi réaliste qui soutient surtout la thèse selon laquelle il y a des « principes vrais » dont se déduisent nécessairement des « conséquences vraies ».

Il évoque cependant la « liberté des hypothèses » :

« j'estimais qu'on me permettrait sûrement à moi aussi d'examiner si, en supposant quelques mouvements pour la terre, on pouvait trouver des explications de la révolution des orbés célestes plus solides que celles de mes prédécesseurs » (*id.* p. 53).

Il donne son plan :

« dans le premier livre, je décris la disposition des orbés en même temps que les mouvements que j'assigne à la terre, de telle sorte que ce livre contient, pour ainsi dire la constitution globale de l'Univers. Puis, dans les livres restants, je mets en relation les mouvements des autres planètes et de tous les orbés avec le mouvement de la terre de telle sorte que l'on puisse établir par là, dans quelle mesure **les mouvements et les apparences des autres planètes et orbés peuvent être sauvés.** » (*id.* p. 54). Très important : ici réalisme atténué !

La seconde version est celle de Rheticus ; un an auparavant, il a rédigé et diffusé un résumé de l'œuvre à venir en insistant sur la vérité physique du nouveau système : c'est le monde tel qu'il est que va dévoiler Nicolas Copernic. En ce sens, Rheticus est le premier grand réaliste copernicien.

La surprise vient d'un texte supplémentaire de présentation, d'une préface ajoutée mystérieusement à l'édition originale, qui exprime, on ne peut plus clairement, et avec grand talent, qu'il s'agit d'une œuvre parfaitement hypothétique, d'une imagination de géomètre. Elle a pour objet, non pas d'affirmer que la terre tourne réellement sur elle-même et autour du soleil, mais de proposer simplement et précisément une image des apparences astronomiques. La lettre était anonyme ; elle avait échappé à Rheticus. On crut ainsi longtemps que telle était l'opinion de Copernic et la curie romaine s'en trouva évidemment fort aise. C'est Jean Kepler qui démasqua l'auteur anonyme : Andreas Osiander, ami de Rheticus, théologien luthérien qui craignait les foudres des églises et des aristotéliens. Sans doute son initiative partait-elle d'un sentiment sincère, mais il n'empêche qu'il fit œuvre de faussaire et abusa Copernic, ses amis comme ses ennemis. Il faut cependant remarquer qu'il y a, dans cette lecture, bien davantage qu'une « manœuvre ».

Copernic est un véritable « savant de l'équivalence des modèles géométriques ». Cela fait-il de lui un conventionnaliste, comme le défend Osiander ? En fait non, car il considère qu'entre ces différents modèles possibles, l'un est physiquement réalisé et les autres « ne lui sont qu'équivalents ».

Les coperniciens ont-ils existé ?

LES HOSTILES ET LES PREMIERS CONVAINCUS

Les thèses venues de Frombork se répandent rapidement dans les cercles savants de l'Europe où elles font très largement l'admiration des connaisseurs. *Le second Ptolémée*, comme il est souvent appelé, est loué pour la haute valeur mathématique, technique, observationnelle de ses travaux ; mais de l'admiration à l'adhésion, il y a un pas que peu d'auteurs vont franchir dans les premières années.

Notons que des variantes de toute sorte existent alors : les tychoniens (avec sous variantes), Les premiers convaincus, peu nombreux, sont cependant de qualité. Rheticus est évidemment de ceux-là ; comme Christoph Rothmann, l'astronome du Landgrave Guillaume IV de Hesse-Cassel ; comme aussi Michael Maestlin l'un des meilleurs astronomes de son temps qui aura pour disciple Jean Kepler. Maestlin compare le compromis tychonien au « raccommodage précaire d'une vieille tige » (Lerner 118) et encore Jean Kepler, Philippe Lansbergen (1561-1632) très sérieux astronome, Jérémie Horrocks (1618-1642) et Wendelin.

En Angleterre John Field proclame, en 1556, la vérité du système héliocentriste. Thomas Digges en réfutant, dès 1576 le système ptoléméen, en traduisant partiellement le *De Revolutionibus* et en rédigeant un excellent exposé du système.

Le cas d'Erasmus Reinhold, le premier à utiliser le *De Revolutionibus* pour le calcul des tables astronomiques, les *Tables Pruteniques* (1551). Toutefois « Reinhold, bien qu'il emprunte aux *De revolutionibus* les résultats des observations de Copernic, ne se prononce ni pour ni contre le système héliocentrique de son devancier » (p. 175).

Selon ce qui est publié, il rend des hommages immenses à Copernic, sans adopter son système comme réel. Il est donc sur la « ligne Osiander ».

L'ADMIRATION DISTANTE

Erasmus Schreckenfuchs, éditeur de Ptolémée, couvre Copernic de louanges mais insiste sur l'équivalence cinématique des diverses hypothèses en compétition, comme les anglais John Dee, plutôt hésitant et Robert Recorde qui voit en l'œuvre de Copernic la résurrection des idées pythagoriciennes et d'Aristarque de Samos mais n'y adhère pas clairement.

En France, on se montre particulièrement tiède. L'attitude de Pierre Ramus est assez surprenante. Ce grand mathématicien, violemment anti-aristotélicien, esprit ouvert aurait pu s'avérer un partisan de poids ; il n'en est rien car, dit-il, il y a trop d'hypothèses physiques et métaphysiques dans la nouvelle doctrine. Certes, Copernic est admirable ; certes, ses constructions géométriques sont magnifiques, certes, il est excellent de rendre compte des phénomènes, à partir du mouvement de la terre, mais quel dommage qu'il se soit encombré de principes *a priori*, d'hypothèses invérifiables ! Ce scepticisme devant les vastes constructions théoriques - nouvelles et anciennes - est brillamment exprimé par Michel de Montaigne.

HOSTILITE TRANQUILLE DES EGLISES

Du côté des églises catholiques et réformées, on réagit sans excès. Rome ne s'émeut guère et il faut attendre le commentaire du grand mathématicien jésuite Christophe Clavius à la Sphère de Sacrobosco, en 1570, pour voir exprimées les oppositions de plusieurs passages bibliques avec le mouvement de la terre. Ceci ne l'empêche pas - professionnalisme oblige ! - de louer l'habileté de Copernic. Ni à Rome, ni à Wittemberg ou Genève, l'heure n'est encore à la répression et la fin du siècle autorise une diffusion assez discrète, technique, savante, où l'on ne voit paraître que très peu de traités coperniciens... l'idée se propage, en se modifiant ; elle va bientôt resurgir, transformée et scandaleuse.

Giordano Bruno (1548-1600) grand admirateur du chanoine critique la sphère des fixes, cette *prison qui nous enferme*..

HELIOCENTRISME ET COPERNICIANISME

Copernic défendait la circularité stricte des trajectoires planétaires, il professait l'existence de la sphère des fixes comme frontière d'un cosmos fini et même, peut-être et dans une certaine mesure, l'existence physique des orbites. Ces aspects importants de son système ne survivront pas ; idées communes au modèle ptoléméen et au sien, elles n'auront plus cours alors même que l'héliocentrisme aura triomphé. Kepler est passé par là qui a fait un sort aux trajectoires circulaires, Bruno aussi qui a défendu l'infini du monde, Galilée a plongé le cosmos dans une physique nouvelle. A partir de la fin du XVII^{ème} siècle, souvent désigné comme *siècle de la révolution copernicienne*, c'est seulement une partie de l'enseignement du génial polonais qui aura eu gain de cause. On peut bien sûr estimer que c'est la part essentielle, ce qui est peut-être juste, mais c'est certainement un copernicianisme bien éloigné de celui qu'exposait le *De Revolutionibus* qu'adoptent les savants promoteurs de la science classique. Comme le dit Szcz., « il y a un copernicianisme de Kepler, un autre de Galilée, comme il y en avait un de Tycho Brahé...Mais il y a aussi un copernicianisme de Newton » (p. 62)

LE NEO COPERNICIANISME

Entre 1543 et 1643, le système nouveau va s'imposer. Est-ce long ? Pourquoi ? Est-ce le même système ?

En fait non. Le système qui va dominer est très différent. C'est une thèse générale de la dynamique des sciences : une théorie nouvelle n'est, au début, pas suffisante ni complète.

Quelques étapes :

TYCHO BRAHE (1546-1601)

Très bien au fait du système de Copernic, il le rejeta.

La première grande ambition de Tycho vient de l'imprécision des mesures. Alors que Copernic se contentait d'une précision de l'ordre de 10' d'arc, le danois pense en secondes d'arc ! Il construira des instruments splendides, immenses, d'une précision jamais entrevue (la lunette n'est pas encore en usage).

Le château-observatoire d'Uraniborg est construit en 1576. Les moyens d'étude du ciel sont si nombreux et encombrants qu'il faut adjoindre une annexe, Stjerneborg, avec ses observatoires souterrains, son imprimerie, son laboratoire de chimie.

Vingt ans durant tout ceci fonctionnera, jusqu'à la disgrâce en 1596 et le déménagement de Tycho dans le château de Betanek en Bohême. C'est là qu'un jour de 1600 Jean Kepler rejoint Tycho pour s'occuper notamment de la trajectoire de Mars.

Les leçons de la comète de 72-74 et de la Nova de 1573. Tycho est formel : la Nova brille au delà de Saturne, dans les cieux supra-lunaires. Tycho exposa des arguments difficilement contestables dans son *de nova Stella*. Il faut cependant indiquer que Tycho soutint la thèse de l'événement *miraculeux*. (Info dans Lerner, p.21-30).

La comète aggrave la situation : il découvre qu'elle venait, elle aussi, de lieux interdits, d'au delà de la lune et qu'elle traversait des régions réputées immuables ; elle franchissait même les orbes célestes.

« Brahé pense que Dieu est intervenu dans la création de cette comète (extraordinaire), comme des autres comètes du reste [«des miracles à répétition »] » (Lerner, 44 et n.111)

C'est qu'en réalité, affirma audacieusement Tycho, ces sphères ne sont pas cristallines, ni matérielles. Les cercles, orbes et sphères de l'astronomie sont des inventions géométriques. Ainsi, deux piliers de l'astronomie traditionnelle vacillent sous les coups de Tycho : la séparation du monde en deux régions essentiellement distinctes et la substantialité des sphères célestes.

Il ne peut accepter les dimensions du Monde copernicien. Ses découvertes l'amènent à réduire le volume du Monde Ptolémén, aussi l'*immensum* copernicien lui semble inacceptable. Il est le mieux placé pour connaître la force de l'argument parallactique. Remarque : de meilleures observations peuvent contrarier le succès d'une théorie nouvelle.

Une solution mixte:

« Insatisfait de la *dispositio* ptoléméenne du monde pour des raisons essentiellement mathématiques et architectoniques, mais rejetant également l'innovation copernicienne à cause de son absurdité physique (parallaxe et objections balistiques) et de ses conséquences d'ordre théologiques, Tycho Brahé dit avoir cherché, puis trouvé un système qui ne présenterait aucun de ces inconvénients » (Lerner, 51)

Il va réveiller - avec d'importantes différences - le système mixte qu'Héraclite du Pont avait déjà envisagé : un modèle semi géocentrique dans lequel la terre, immobile, est au centre de la sphère étoilée ; les autres planètes tournent autour du soleil qui lui, tourne autour de la terre.

Au sujet de l'immobilité terrestre qui, quoiqu'on en dise est une difficulté dans le doctrine de la substance et de la forme (une sphère qui ne réalise pas sa forme naturelle), Tycho écrit ceci :

« Dieu a voulu maintenir absolument fixe au milieu du monde « le corps de la terre, paresseux, épais et impropre à tout espèce de mouvement circulaire perpétuel » (lettre à Rothmann, janvier 87, trad. Et cit. in Lerner, p.113)

Les avantages sont grands : la terre reste immobile, les stations et rétrogradations s'expliquent admirablement, les phases de Vénus aussi, la parallaxe n'est pas un problème et la physique n'a pas besoin d'être bouleversée. Voici qui explique le relatif succès du modèle tychonien qui va trouver comme ardents et efficaces promoteurs, ces artistes, ces experts en conciliation que sont les pères de la Compagnie de Jésus (fondée en 1540). Cette parade provisoire ne fera cependant que freiner quelque temps l'adoption générale de l'héliocentrisme.

La leçon essentielle.

Avec Tycho (et d'autre, Rothmann, Peucer...), les cieux solides sont dissous.

Tycho défend la dissolution de la sphère des fixes, comme lieu solide. Il pose les étoiles non fixées à une sphère, mais dispersées dans une matière fluide. Pour lui, elles sont strictement immobiles les unes par rapport aux autres. Il y a là des difficultés : comment, entraînées dans un si formidable mouvement, et « libres », peuvent-elles garder si strictement leurs distances ? « à Dieu, rien d'impossible » répond Tycho.

Comme l'écrit excellemment Lerner :

« Pour parvenir à ce résultat, il a fallu une convergence d'arguments d'ordre cinématique, optique et physique, mais aussi d'ordre scripturaire et philosophique, dont certains avaient été formulés auparavant de façon indépendante, et qui combinant pour ainsi dire leur efficacité propre dans le dernier quart du XVI^e siècle, ont permis, avant 1600, à un Brahé, à un Rothmann, ou à un Kepler d'expulser définitivement du ciel les machineries d'orbites et de sphères qui avaient fait leur apparition dans l'occident latin quelque trois siècles plus tôt » (Lerner, 66)

Kepler (1571-1630). Galilée (1564-1642)

Deux hommes - presque séparément - assurent, au début du XVII^{ème}, siècle le triomphe du copernicanisme, en le transformant profondément. Leurs tâches sont à ce point distinctes qu'il semble que l'on assiste à une sorte de *division du travail*. C'est à tel point frappant que la rencontre de Galilée et de Kepler n'aura jamais lieu.

Elève de Michael Maestlin à Tübingen, Kepler devient copernicien en 1589. Quand, exactement, Galilée a-t-il embrassé l'astronomie nouvelle ? On ne le sait pas, mais il est certain qu'en 1597, il l'est, et c'est justement dans une lettre amicale et élogieuse adressée à Kepler qu'il le proclame. Il a récemment reçu de l'astronome de Graz *Le secret du monde*, son premier grand ouvrage (1596, rééd. 1621), radicalement copernicien. Il s'y reconnaît en communion avec l'auteur, membre de cette très petite communauté des savants et philosophes héliocentristes. La réponse de Kepler est de la même eau ; il se félicite de la prise de position du mathématicien padouan et réaffirme lui aussi le prix qu'il accorde à une telle entente.

Treize ans plus tard, en 1610, c'est au tour de Kepler de louer la formidable 'percée' que vient de réaliser Galilée, grâce à la lunette astronomique qu'il a mise au point, et qui lui a permis d'exposer un monde nouveau dans son *Messager céleste*. Il le fait longuement en un beau texte d' *Entretien avec le messager céleste*.

Et pourtant, ils ne se rencontrèrent jamais, Galilée ne répondit pas - ou si peu et si tard - à la demande que lui faisait Kepler d'envoi d'une lunette astronomique. Plus sérieusement, on peut même dire qu'ils ne se comprirent pas vraiment l'un - l'autre. Un mysticisme certain chez Kepler, une certaine désinvolture en astronomie chez Galilée.

La lunette astronomique

La révolution astronomique concerne pour une bonne part l'interprétation de « ce que l'on voit » dans le ciel (cf. *La mutation du visible*, de Philippe Hamou, PUS, 1999). Avec Galilée et Kepler, on va voir un autre ciel et on va devoir reconnaître le sens de ces images nouvelles. Cet instrument révolutionnaire a joué un rôle central pour l'un, comme pour l'autre ; mais, si Galilée en fut le premier grand utilisateur, s'il sut, le premier, la mettre vraiment au point, s'il eut l'idée de *la tourner vers le ciel*, Kepler en fut le théoricien et réussit à expliquer pourquoi ce qu'elle révélait devait être assurément pris en considération. L'affaire se joue, pour Galilée, en 1609-1610. Il a réalisé l'instrument et en a immédiatement saisi l'importance extraordinaire, notamment pour des applications terre à terre, militaires par exemple. Ce qui va tout bouleverser est sa décision d'observer le ciel : il y découvre les tâches lunaires, les satellites de Jupiter, les innombrables astres de la voie lactée, bref, un monde qui n'a plus grand chose à voir avec les modèles cosmologiques antérieurs. Il se heurte cependant à de fortes objections qui concernent la fiabilité et même la légitimité de ce que donne à voir cet instrument. Les adversaires soutiennent au fond qu'il ne produit que des illusions d'optiques. Lever ces objections nécessite de comprendre comment fonctionne la lunette, de disposer d'une théorie optique valable et cette tâche dont Galilée mesure l'importance, c'est Kepler qui la réalise. En 1604, il a déjà rédigé un remarquable traité d'optique, les *Compléments à Vitellion*, (dont le sous-titre montrait assez ce qu'il avait à l'esprit : « Partie optique de l'astronomie ») qui renouvelle totalement l'optique géométrique, établit d'importants résultats sur la réflexion et la réfraction, décrit le chemin des rayons dans les lentilles (sans la loi des sinus). Quand il reçoit l'ouvrage de Galilée, en 1610, il s'empresse de surenchérir et, un an plus tard, rédige une *Dioptrique* qui enrichit et complète ses travaux précédents ; il revient sur les observations célestes galiléennes en validant ainsi les principales d'entre elles.

DEUX OBSTACLES, DEUX REPONSES

On le sait, deux obstacles d'importances se dressaient contre le modèle copernicien. Le premier concernait la description exacte des trajectoires planétaires qui n'était toujours pas satisfaisante ; le second résultait de l'impossibilité de concilier le mouvement de la terre avec la physique et la mécanique traditionnelles. On pourrait dire, un peu grossièrement, que Kepler va surmonter le premier et Galilée le second. Le formidable enrichissement que la lunette apportait aux observations rendait d'ailleurs encore plus nécessaire la résolution de ces difficultés. Kepler, au terme d'un combat intellectuel intense, réfutera la circularité des trajectoires, affirmera leur nature elliptique et donnera les trois grandes « lois de Kepler » qui quantifient ces trajectoires.

Galilée demeurera assez peu sensible à ces remarquables découvertes en restant fidèle aux 'grossières' trajectoires circulaires (voir *Galilée critique d'art*) ainsi qu'à la traditionnelle et fautive théorie des comètes, qui n'ait leur caractère de véritables objets matériels. Dans le *Saggiatore* §6, il défend que ce sont des effets de réflexion ou de réfraction dans des vapeurs, analogues à ceux que produisent les halos et les arcs-en-ciel.

En revanche, c'est lui qui saura exposer avec un génie incomparable les arguments qui ruineront le modèle géocentrique, qui réfutera définitivement la doctrine des deux régions « *sub* et *supra* lunaire ». C'est lui qui exposera qu'il n'y a qu'une seule physique, une seule mécanique, valable sur la terre et dans les cieux. C'est lui enfin qui donnera les fondements d'une théorie du mouvement entièrement nouvelle et grâce à laquelle les objections contre le mouvement de la terre seront annulées. Comme par un effet de symétrie, on peut noter le peu d'intérêt de Kepler pour ces recherches et son relatif traditionalisme quand aux idées qu'il se faisait des forces qui gouvernent le monde : il fut panpsychiste, il attribuait aux planètes des âmes motrices et au Soleil une âme sensitive grâce à laquelle cet astre contemplait le cosmos et pouvait se réjouir de sa beauté et de son harmonie. Il faut noter cependant qu'à sa mort, en 1630, Galilée n'avait encore publié, ni son *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, ni bien sûr ses *Discours sur deux sciences nouvelles*.

C'est donc une trame serrée et complexe qui forme la vision du monde respective de ces deux génies, trame dans laquelle se mêlent et s'entrecroisent les fils de la tradition et ceux

de l'innovation. Galilée et Kepler tissent cette trame différemment, en usant de fils distincts, mais la toile qu'ils créent tous les deux se révèle finalement incroyablement homogène et harmonieuse.

Quelques informations complémentaires

Les secrets dévoilés de Jean Kepler

Jean Kepler a écrit trois grands ouvrages d'astronomie qui sont autant d'occasion de mesurer les tendances, les influences extraordinairement variées - opposées même - qui se « partageaient son âme » : de la magie à la science rationnelle, de la mystique à l'observation scrupuleuse et à l'usage le plus savant des mathématiques. Voir le début du chapitre de Marie Boas Hall (*The scientific renaissance*, p.287).

Mysterium Cosmographicum, 1596

Astronomia nova, 1609

Epitome astronomia copernicae, 1617-21 avec la troisième loi, en parallèle avec les *Harmonices mundi*, 1619

Le Mysterium. Oeuvre de jeunesse. Un Dieu Géomètre. Harmonie de la géométrie et du système du monde. Cinq solides réguliers, cinq intervalles entre les planètes.

L'Astronomia

Kepler entreprend une véritable quête : l'étude exacte de la trajectoire martienne. Premier point essentiel: les plans des orbites des planètes, proches mais non identiques passent tous par le Soleil, ce qui fait disparaître plusieurs anomalies persistantes dans le modèle de Copernic. Une seconde victoire capitale est bientôt remportée : à partir de l'examen des positions de la terre par rapport au soleil, il se convainc que le temps nécessaire au parcours d'un arc de sa trajectoire (qu'il croit circulaire) est proportionnel à l'aire balayée par le rayon vecteur qui est variable puisque le Soleil n'est pas exactement au centre du cercle (*Nova astronomia*, XXXIII, p.236). Cette loi, connue comme **seconde loi de Kepler** fut découverte la première et ce, sur la base de deux 'erreurs' qui se corrigèrent l'une l'autre.

Fort de ce point d'appui, il engage le combat contre Mars. Les progrès, les difficultés, les doutes sont racontés par lui-même dans son second grand ouvrage, *L'astronomia Nova*, toute entière consacrée à la planète récalcitrante. Ce n'est qu'après beaucoup d'essais infructueux qu'il conduisit en « examinant tout, jusqu'à en devenir fou » qu'il accepta la vérité : l'orbite de Mars est une ellipse dont le soleil occupe l'un des foyers. Il réalise petit à petit que la loi est validée par l'observation et qu'elle est incompatible strictement avec une trajectoire circulaire.

« C'est clair, l'orbite de la planète n'est pas un cercle, mais passe graduellement à l'intérieur des côtés puis à nouveau s'accroît jusqu'à l'amplitude d'un cercle au perigee. La forme de ce type de trajectoire est appelée ovale » (*Astronomia Nova*, XLIV, p. 286, Boas Hall, p.304).

La solution et la victoire sont exposées chapitre LIX, p.357. Seule une ellipse parfaite convient, son foyer doit être le soleil. *Id*, Intro, p.35 :

« Par des démonstrations extrêmement laborieuses et par le moyen d'observations incessantes, j'ai découvert que la trajectoire d'une planète dans les cieux n'est pas un cercle, mais une route Ovale, parfaitement elliptique ». (cité B.H. p .306)

Un pas de géant venait d'être franchi ; toutes les données d'observation s'accordaient admirablement avec cette figure nouvelle décrite dans les cieux. En 1606, la partie était gagnée et la « première loi de Kepler » affirmait que le cas de mars était la loi générale : les planètes sont emportées par le soleil, autour de lui, selon des trajectoires elliptiques dont il occupe un des foyers.

Harmonices

Le 8 Mars 1618, selon son propre témoignage, Kepler parachevait son œuvre en proposant une troisième loi qu'il publiera dans son troisième grand traité (*Harmonices mundi*)

Le carré des périodes (T) des orbites planétaires est proportionnel au cube de leur distance moyenne au Soleil (d) : $T^2 = k \cdot d^3$.

Kepler ne révèle rien des voies qui l'ont mené à ce splendide résultat. Les recherches des historiens restent hypothétiques et la thèse la plus répandue consiste à supposer que cette proportion fut admise par tâtonnements, par approches successives : la proportion simple des distances était trop forte, celle des carrés trop faible ; la solution *sesquilatère* offrait une solution intermédiaire qui s'avéra être la bonne. Le spécialiste de Kepler, Gérard Simon, propose une solution plus séduisante : Kepler associait - comme dans l'antique tradition pythagoricienne - les mouvements planétaires et les harmonies musicales. « Il faut que les planètes chantent et qu'elles chantent en chœur » Or, sa troisième loi permet d'obtenir l'harmonie musicale céleste « Grâce à sa troisième loi » et ses théories musicales, il produit un modèle tel que « le ballet céleste soit parfait ». Voici que les harmonies venaient préciser, améliorer, parfaire le schéma trop grossier mais non pas répudié des polyèdres réguliers. C'est encore et toujours le principe du plus beau et du plus harmonieux des mondes qui permet le dévoilement de la vérité. Il faut noter que la troisième loi est reprise et exposée, sans les doctrines *harmoniques* dans l'*Epitome*, de façon très directe et mathématique.

On s'en doute, ces spéculations aux relents de pythagorisme des *Harmonices mundi* ne plurent pas à Galilée et beaucoup ont vu là une des principales raisons de la tiédeur dont ce dernier fit preuve à l'égard de Kepler. Il n'empêche, les trois lois de Kepler, reprises par Newton, vont jouer un rôle décisif dans la mise au point du système du monde classique. Les voies des découvertes scientifiques sont tortueuses, en même temps que lumineuses. L'exemple de Kepler est parmi les plus beaux de ce cheminement clair-obscur.

On a pu dire que « Paradoxalement, les idées de Kepler ne furent véritablement reconnues en premier, seulement par la génération très *rationnelle* travaillant après 1660, qui comprit qu'elles pouvaient être appliquées au système mécanique de l'univers et dégagées du contexte mystique dans lequel Kepler les avait insérées » (trad. V.J., Boas Hall, p.288)

Remarques:

1. Rompant avec les cosmologies seulement géométriques - et le modèle copernicien est de ce type - Kepler a cherché à comprendre les forces, les causes dynamiques des mouvements célestes. A la fin de sa vie, il adopta l'idée -déjà envisagée en 1609- d'une puissance issue du Soleil qui, tournant sur lui même, provoquerait une sorte d'immense tourbillon de nature magnétique ; ce tourbillon entraînant les planètes dans sa ronde. Il est fort précis et rend compte de la sorte de la forme elliptique des trajectoires comme aussi des inégalités de vitesse. Cf. le schéma de la page 303 in Boas Hall, avec explication.

Avec la disparition des orbites et des sphères matérielles qui entraînent les planètes, il faut trouver et découvrir une cause à leur trajectoire. Les voici « devant se mouvoir seules » dans un immensum vide ou à tout le moins fluide.

2. Polémique contre les tenants de l'infinité et de la multiplicité des mondes (Bruno et sa thèse selon laquelle le monde offrirait la même apparence quelle que soit l'étoile d'où on l'observerait). Kepler, paradoxalement, prend appui sur l'immense « vide » copernicien entre Saturne et les étoiles pour défendre la situation singulière, la place privilégiée et unique de notre système Etoile/planètes. Il n'y a pas de place pour des systèmes identiques pour toutes les étoiles que nous voyons (cf. détails des arguments in Lerner p.124 sq.)

Cette conviction finitiste est renforcée par la lecture du *Sidereus Nuncius*. Au fond toute complication, enrichissement de *notre* système renforce sa spécificité et sa centralité.

Le ciel de Galilée

Le *Sidereus Nuncius* de 1610

En 1610, les philosophes Cremonini à Padoue et Libri à Venise ne voient absolument rien dans la lunette galiléenne pour la bonne et simple raison qu'ils refusent d'y jeter un œil.

Moins crispés, bien d'autres voulurent y voir ; ils furent souvent déçus. Giovanni Antonio Magini, mathématicien de Bologne avait réuni, en avril 1610, une vingtaine de spectateurs ; « personne n'a vu parfaitement », écrit-il avec modération à Kepler qui, lui-même ne commence par voir dans la lunette que des taches carrées et curieusement colorées. La plus sérieuse des contestations fut écrite par Francesco Sizi, savant pisan qui avançait un argument fort contre la lunette : le grossissement des images, les effets visuels dus à cet instrument, ne s'appuyaient pas sur une théorie optique satisfaisante.

Certains enfin, plus fins, ne nièrent pas les observations galiléennes, mais ils les interprétèrent différemment que lui : les apparents reliefs lunaires étaient dus à la diversité de densité du corps lunaire. Ainsi fit Christophe Clavius, le vieux maître des savants jésuites du *Collegio romano* (qui avait confirmé les satellites médicéens).

Galilée su voir un monde nouveau ! En novembre il a une lunette qui agrandit 20 fois et en janvier 30 fois. Il su voir le relief de la lune, (fin décembre) ; il reconnu des satellites à Jupiter (Nuits du 7 au 10 janvier), il pulvérisa la voie lactée qui loin d'être une zone homogène de matière céleste est constituée d'un myriade d'étoiles. Pourquoi a-t-il pu passer les obstacles de la tradition, surmonter la résistance des arguments séculaires ? Pourquoi a-t-il fait confiance aux images de la lunette ? Il y a sans doute bien des raisons à cela. Premièrement, à la différence de bien des spectateurs sceptiques qui employèrent exceptionnellement l'instrument nouveau, il effectua des centaines d'essais, s'appliqua des jours et des nuits à bien le placer, bien le manipuler. Il savait que « sur plus de soixante télescopes qu'il a construits, quelques uns seulement étaient adéquats ». Sa confiance dans l'usage astronomique de l'appareil venait aussi des résultats très probants qu'il avait obtenu *sur terre*. Il avait pu en vérifier l'efficacité à tel point que son opposant Horkei reconnaissait que « la lunette faisait des miracles sur terre ». Or, écrit Galilée, « pourquoi la même expérience faite avec la lunette au sujet des objets terrestres ne pourra-t-elle pas nous faire ajouter foi à elle dans le cas d'objets célestes ». Cette analogie, entre terre et ciel, Galilée la défend passionnément ; mais justement, là est le problème : les traditionalistes aristotéliens la refusent ; la matière des cieux est, pour eux, différente de l'air et de la matière terrestre. Nous sommes au cœur du problème : ce qui est valable ici bas, l'est il dans le cosmos ?

Cette opposition d'attitude est intéressante puisqu'elle nous montre en fin de compte qu'il n'y a pas d'expérience simple, absolument convaincante, indiscutable en physique : les expériences - comme l'observation télescopique - ne prennent tout leur sens qu'en fonction de théories générales, de conceptions plus vastes qui nous prédisposent et déterminent largement les leçons que l'on peut tirer de l'expérience elle-même.

Il y a plus : La nature des observations galiléennes de Novembre 1609 à janvier 1610 résultent d'un programme de travail élaboré. Galilée a idée de ce qu'il cherche. D'ailleurs, ce dont il n'a pas idée, il ne le vit pas, même quand il le trouve : la planète Neptune (étude systématique des médicéennes, 28 décembre 1612-28 janvier 1613)

La publication du *Sidereus Nuncius* ou *messenger des étoiles*, en 1610, est telle qu'il imposa largement son point de vue à travers toute l'Europe savante. Anecdote de Descartes à la Flèche. Le premier grand soutien vint de Kepler.

Plus étonnant est la partie qui se joua à Rome, chez les cardinaux et les jésuites. Le 14 avril 1611, le prince Federico Cesi organise un banquet en l'honneur de Galilée, dans la villa de Mgr Malvasia : la démonstration est édifiante, la discussion tourne à l'avantage de Galilée. Le 19 avril, le tout puissant cardinal Bellarmine, supérieur des jésuites, pose cinq questions précises aux plus savants d'entre eux sur les observations du *Messenger des étoiles*. La réponse tombe, prudente, mais cependant claire : Clavius, Grienberger et leur collègues déclarent fondamentalement valides les découvertes concernant la multitude des étoiles de la voie lactée, la forme particulière de Saturne, les phases de Vénus, les satellites de Jupiter ; ils sont plus partagés sur les irrégularités lunaires mais n'excluent pas qu'elle ait un relief. Enfin, les jésuites organisent une réception très officielle en présence du héros et déclarent que le *Messenger des étoiles* annonce une nouvelle astronomie.

Sur l'infinité du monde

La position de Galilée est difficile à bien saisir.

Pas de déclaration en 1609. En 1624, réplique à Pietro Ingoli, anticopernicien « officiel » de l'Eglise :

« aucun homme au monde ne sait ni n'est en mesure de connaître par des moyens humains non seulement quelle est la figure du firmament, mais même s'il en a tout simplement une » (*in* Lerner 168).

« Je m'en remets aux sciences supérieures » (à Ingoli)

Dans le *Dialogo*, on trouve des discussions sur la « *potentia Dei absoluta* » et la « *potentia ordinata* », entre « ce qu'il aurait pu faire » et « ce qu'il a fait » ; Galilée dote Dieu d'une inclinaison (ou d'une nécessité) de créer selon des principes de simplicité et de facilité. Grand problème de la limitation dans l'acte créateur. (*cf in* Lerner, 173-174). Une des raisons de l'hostilité d'Urbain VIII.

Citer la lettre de 1639 où il « incline plutôt vers l'infinité du monde » (Lerner 175).

Sur la nature des étoiles et du soleil

En 1624, à Ingoli :

« De plus, comme je l'ai déjà dit, le soleil ne comporte aucune détermination qui nous permettrait de le séparer du troupeau des autres étoiles fixes, en sorte qu'il est parfaitement raisonnable de dire que chaque fixe est un soleil (il en déduit l'immensité du monde) [...]

- Réalisme galiléen : la preuve par les marées.

La quatrième journée du *Dialogo*.

La discussion sur la cause des marées a revêtu une importance énorme dans le débat sur la mobilité ou immobilité terrestre. Lorsqu'il écrivit son *Dialogue sur les deux grands systèmes du Monde*, Galilée en faisait un si grand cas qu'il voulu l'appeler *Traité des marées*. Il fallu l'intervention du pape lui-même pour qu'il y renonce. L'affaire était donc considérable. Le dialogue est divisé en quatre *journées*. Dans les trois premières, le savant développe une foule d'arguments astronomiques, de nature souvent géométriques, en faveur du système héliocentrique. Il y expose aussi des arguments physiques qui s'oppose à la nécessité de l'immobilité terrestre. Toutefois, démontrer que l'immobilité terrestre n'est pas nécessaire ne prouve pas que la terre se meuve ; cela établit 'seulement' que son mouvement est *possible*. Or, voici que vers la fin de la troisième journée, il avertit que « l'élément de l'eau [...] est le seul dans lequel nous pourrions déceler une trace et un indice pour savoir ce qu'il en est quant au repos ou au mouvement de la terre. »

La brève, mais décisive *quatrième journée*, consacrée aux marées devait, en effet, apporter une preuve véritable et positive du mouvement terrestre. On comprend dès lors l'enjeu, tant pour Galilée que pour le pape. Cette théorie devait être le couronnement du traité : trois journées pour dire comment la terre pouvait se mouvoir, une journée pour prouver qu'elle se mouvait effectivement !

Galilée considère le mouvement de rotation terrestre autour de son axe : s'il agissait seul, les eaux seraient poussées vers l'extérieur en raison de la force centrifuge, mais, une fois une position d'équilibre atteinte, elles ne bougeraient plus (comme dans un seau d'eau qu'on fait tourner sur lui-même). Si on considère la seule révolution autour du Soleil, la force centrifuge a un effet du même type. Séparément, donc, les deux mouvements ne provoquent pas de marées ; mais combinés ensemble, affirme Galilée, ils interagissent et ont bien un 'effet de marée'.

TROIS ŒUVRES : DESCARTES-ROBERVAL-PASCAL

1. DESCARTES

Les sentiments qu'inspire la condamnation galiléenne à Descartes sont l'étonnement, la soumission, la désapprobation et l'espoir d'un revirement inévitable. Quelques citations suffisent à établir ce point :

« Mais, j'ai appris récemment que le livre de Galilée a été brûlé et lui-même condamné à quelque amende: ce qui m'a fort étonné¹² »

« J'ai voulu entièrement supprimer le Traité que j'en avais fait, et perdre presque tout mon travail de quatre ans, pour rendre une entière obéissance à l'Eglise »¹³;

« Je n'ai point encore vu que ni le Pape, ni le concile aient ratifié cette défense, faite seulement par la congrégation des cardinaux établie pour la censure des livres» (id.). « Je ne perds pas tout à fait espérance qu'il n'en arrive ainsi qu'aux antipodes, qui avaient été quasi en même sorte condamnés autrefois, et ainsi que mon *Monde* ne puisse voir le jour avec le temps »¹⁴.

Qu'y a-t-il dans le *Monde* de Descartes qu'il a si longuement tu?

Les chapitres IX à XII sont parfaitement clairs: le Soleil, comme d'ailleurs d'autres étoiles en d'autres cieux, est le centre fixe du système du monde et les planètes tournent autour de lui, en raison des influences des différentes catégories d'élément (matière subtile ou premier élément pour le Soleil, moyenne ou second élément pour les cieux, troisième élément pour la terre et les planètes). La figure générale de ce système¹⁵ est explicite: on y voit le Soleil et les divers symboles habituels aux planètes qui en sus, tournent sur elles-mêmes. Ceci montre assez que la fiction rejoint la réalité. A partir du chapitre VI, nous sommes en présence d'un monde fabuleux, mais dans lequel tout est conforme aux exposés précédents.

Ce schéma général est si vrai que :

« s'il est faux, tous les fondements de ma philosophie le sont aussi, car il se démontre par eux, évidemment. Et il est tellement lié avec toutes les parties de mon traité que je ne l'en saurais détacher, sans rendre le reste tout défectueux »¹⁶.

Cette conviction est répétée à plusieurs reprises :

« Cette opinion [de Galilée] était dans mon traité et 'tout s'y tient'; et quoique je pensasse qu'elles fussent appuyées sur des démonstrations très certaines et très évidentes... »¹⁷.

Ajoutons encore ce passage des *Regulae* (XII, A.T.X 436) :

« De même enfin si on demande ce que nous pouvons affirmer du mouvement des astres, à partir de toutes les observations que nous possédons les concernant, il ne faut pas supposer arbitrairement, comme l'on fait les anciens, que la terre est immobile et située au centre du monde, sous prétexte que nous le croyons depuis notre enfance : il faut révoquer aussi cette opinion en doute ».

Ainsi l'affaire semble entendue: Descartes est copernicien, la Terre se meut autour du Soleil et ceci ne saurait être faux sans que tout le reste de l'œuvre ne le soit, elle aussi. Quel n'est pas l'étonnement du lecteur des Principes de la philosophie lorsqu'il parcourt la troisième partie et tombe sur l'article 19 où Descartes proclame :

« Que je nie le mouvement de la Terre avec plus de soin que Copernic et plus de vérité que Tycho » suivi de l'article 26 où il affirme: « que la Terre se repose en son ciel ».

¹² Lettre à Mersenne de novembre 1633, AT. I, p. 270.

¹³ Lettre à Mersenne de février 1634, AT. I, p. 281.

¹⁴ Lettre à Mersenne d'avril 1634, AT. I, p. 288.

¹⁵ AT. XI, p.55.

¹⁶ Lettre à Mersenne, novembre 1633, AT. I, p. 270.

¹⁷ Lettre à Mersenne, avril 1634, AT.I, p. 285.

Quel renversement! Descartes serait-il revenu à Ptolémée, ou même à Tycho? En vérité, il n'en est rien, mais c'est que Descartes a repris toute l'affaire dans le cadre d'une théorie fort différente du mouvement. Sans entrer dans le détail, lisons les intitulés des articles précédents les deux que je viens de citer:

§13: Le Soleil au nombre des étoiles fixes et la Terre au nombre des planètes.

§15: Qu'on peut utiliser de diverses hypothèses pour expliquer les phénomènes des planètes. Recours au principe de relativité des mouvements.

§16: Qu'on ne peut les expliquer tous par celle de Ptolémée.

Elle est contraire aux observations, je n'en parle point davantage.

§17: Que celles de Copernic et de Tycho ne diffèrent point, si on les considère que comme des hypothèses.[...] Néanmoins, celle de Copernic me semble quelque peu plus simple et plus claire.

Il y a là un tour de force! Le fond de l'explication est que la Terre repose en son ciel, dans la mesure où, selon l'hypothèse des éléments de matière qui font les cieux, tous ceux-ci sont emportés dans un mouvement, avec la Terre qui, ainsi, est au repos dans son ciel : c'est bien ce que nous apprend l'article 26 intitulé

« Que la Terre se repose en son ciel, mais qu'elle ne laisse pas d'être transportée par lui ».

L'apparent paradoxe est expliqué tout au long des articles 26, 27 et 28. L'auteur insiste bien pour se démarquer d'une accusation de raisonnement spécieux. Sa doctrine est valable si nous nous souvenons

« de ce qui a été dit ci-dessus touchant la nature du mouvement, à savoir, qu'à proprement parler il n'est que le transport d'un corps du voisinage de ceux qui le touchent immédiatement et que nous considérons comme en repos, dans le voisinage de quelques autres ; mais que, selon le sens commun [...] Or on ne saurait trouver dans la Terre, ni dans les autres planètes aucun mouvement selon la propre signification de ce mot etc. » (art. 28).

Remarque : voir Aristote, *De caelo*, II, 8, 289b 30 :

« Les astres sont au repos et sont transportés parcequ'ils sont attachés aux cercles ». C'est le même argument : le repos est affirmé d'un corps transporté en raison de la référence au voisinage (ici le cercle soit la sphère, là le ciel environnant).

Descartes n'est pas un copernicien, il est peut-être un néo-copernicien. Il met presque dos à dos Tycho et Copernic comme deux systèmes pour sauver les phénomènes. Deux systèmes qui ne proposent pas de cosmologie, ou alors une « cosmologie du cosmos des anciens ».

Le système de Ptolémée est hors jeu¹⁸, mais on peut feindre de se satisfaire de la thèse tychonienne, qui peut faire bonne figure si l'on ne peut adopter celle de Copernic :

« Au dessus de la lune, la matière subtile a des propriétés qui peuvent convenir à l'hypothèse de Tycho par ceux qui rejettent celle de Copernic »¹⁹.

¹⁸ Comment manœuvrer au plus près ? « Pour la censure de Rome concernant le mouvement de la Terre, je n'y vois aucune apparence; car je nie très expressément ce mouvement. Ce n'est pas seulement pour éviter la censure, à cause que je retiens le système de Copernic, mais mes raisons sont plutôt pour le système de Tycho. Or si on ne peut suivre aucun de ces deux, il faut revenir à celui de Ptolémée, à quoi je ne crois pas que l'Eglise nous oblige jamais, vu qu'il est manifestement contraire à l'expérience. Et tous les passages de l'écriture qui sont contre le mouvement de la Terre, ne regardent point le système du monde, mais seulement la façon de parler; en sorte que, prouvant comme je fais que, pour parler proprement, il faut dire que la Terre ne se meut point, en suivant le système que j'expose, je satisfais entièrement à ces passages », *lettre à xxx*, de 1644, AT.V, p. 549.

¹⁹ Lettre à Mersenne du 19 juin 1639, AT.II, p. 559.

La question est plus vaste. Descartes et son hypothèse

La troisième partie des *Principes* s'ouvre sur un argument métaphysique selon lequel nous ne pouvons surestimer la grandeur, la beauté et la perfection de la création et l'erreur viendrait d'y supposer des bornes ou des limites²⁰. Il faut donc s'attendre à un monde immense.

La longue série d'articles (de III.5 à III.47) au cours desquels Descartes va discuter des hypothèses astronomiques et exposer la sienne est caractérisée par la faible technicité de ces articles. Ils sont à la fois extrêmement précis et conformes aux connaissances les plus récentes²¹, mais dépourvus de justifications qui relèveraient de l'astronomie professionnelle ou géométrique : pas de *modèles*, de calculs, de mesures (ou juste celles qui sont nécessaires à l'admission de son système). Il faut cependant savoir que Descartes connaît fort bien cette astronomie technique et professionnelle, de terrain et de calcul (il l'a pratiquée avec Lansbergen notamment).

Très tôt, Descartes s'est préoccupé de la possibilité des dimensions indéfinies de l'Univers. Dans la lettre à Mersenne du 18 décembre 1629 il veut savoir « s'il n'y a rien de déterminé en la religion, touchant l'étendue des choses créées... » (AT.I, 86).

La question de la taille de notre système stellaire²² occupe décidément une place privilégiée. Le cartouche de l'article 7 annonce

« Qu'on peut supposer les étoiles fixes autant éloignées qu'on veut » ; elle est de grande importance. Ces quatre articles, et l'article 13 assimilant le soleil à une étoile préparent les articles 20 et 23 qui reviendront sur le même sujet et surtout les articles 40 et 41 où l'enjeu fondamental de la question est explicité.

De quoi s'agit-il ? De la très ancienne question de la parallaxe stellaire.

Comme le montre cette troisième partie des *Principes*, le *système du monde* qui doit être le plus sévèrement combattu par Descartes est celui de Tycho²³. Vraisemblablement l'explication est à chercher du côté de la Compagnie de Jésus dont plusieurs figures éminentes penchaient en faveur du système semi héliocentrique, qu'il fut de Tycho ou encore une de ses variantes comme par exemple celle du Père Riccioli²⁴. Or, Tycho Brahe s'était montré particulièrement sensible à l'argument parallactique.

L'article III.40 « renonce » à la mesure de parallaxe, sans renoncer au système en justifiant à nouveau le caractère indétectable de cette variation angulaire par les dimensions aussi grandes qu'il le faut du système du monde. Cet article confère bel et bien un rôle stratégique à l'objection de la parallaxe :

« On peut ici proposer **une** difficulté contre mon hypothèse, à savoir etc. [...] et néanmoins on n'en a rien su encore découvrir par les observations qu'on a faites. Mais il est aisé de répondre que la grande distance qui est entre la Terre et les étoiles en est cause: car je la suppose si immense, que tout le cercle que la Terre décrit autour du Soleil, à comparaison d'elle, ne doit être compté que pour un point. Ce qui semblera peut-être incroyable à ceux qui n'ont pas accoutumé leur esprit à considérer les merveilles de Dieu, et qui pensent que la Terre est la partie principale de l'univers, parce qu'elle est la demeure de l'homme, en faveur duquel ils se

²⁰ Voir *Pr* III.1

²¹ Voir Lerner, *Le monde des sphères*, vol. 2, Paris, Les Belles-Lettres, 1997 et Bucciattini, *Képler, Galilée*, Paris, Les Belles-Lettres, 2009.

²² J'appelle système stellaire l'ensemble formé par notre soleil, ses planètes et les étoiles visibles, dites fixes.

²³ Contrairement à Galilée, du moins si l'on se conforme au titre de son livre sur *Les deux principaux systèmes* ... au nombre desquels ne figure pas celui de Tycho. La réalité est sans doute plus complexe et le poids des arguments et des activités tychoniennes sur Galilée furent considérables comme le montre bien Bucciattini dans son livre *Kepler et Galilée*.

²⁴ Jean Dhombres et Patricia Radelet de Graves ont montré que des milieux savants jésuites, autour de Grégoire de Saint Vincent étaient nettement convaincus de la validité du système héliocentrique. Voir *Une mécanique donnée à voir*, Brepols, 2009, p.101 sq.

persuadent sans raison que toutes choses ont été faites; mais je suis assuré que les astronomes, qui savent déjà que la Terre, comparée au ciel, ne tient lieu que d'un point, ne le trouveront pas si étrange.(Pr. III. 40)

Quelques remarques complémentaires, très succinctes mais aussi très importantes méritent d'être avancées. Résumons-les ainsi : Descartes ne propose pas de trancher entre trois hypothèses concurrentes, de Ptolémée, de Tycho et de Copernic. Son objet est d'établir sa propre hypothèse ; elle est, en un sens général, copernicienne puisqu'héliocentrique mais elle est bien autre chose. Descartes apporte des réponses globales qui constituent, ensemble, un nouveau concept de monde ; telle est la fonction des articles 20 à 29 :

Art 20. Les étoiles sont très éloignées, au point que leurs distances à notre système sont au-delà des analogies d'éloignement entre choses terrestres.

Articles 21 à 23. Le soleil et les étoiles ont même nature.

Article 24-25. Les cieux sont liquides.

Articles 26-29. La terre et les planètes sont transportées. L'important n'est pas tant que la « terre se repose en son ciel », mais bien sûr « qu'elle ne laisse pas d'être transportée par lui » et « qu'il en est de même de toutes les planètes. » (27)²⁵.

Simone Martinet²⁶ a excellemment commenté cette thèse cartésienne:

“On sait en effet qu'à la suite de Tycho, les astronomes avaient brisé la solidité des orbes coperniciens, pour pouvoir notamment expliquer les trajectoires des comètes. Mais alors que la liquidité des cieux n'avait été admise par Tycho que comme une condition sans laquelle on ne pouvait comprendre les phénomènes, elle devient pour Descartes le postulat grâce auquel on peut expliquer le transport des planètes [...] Alors que le système tourbillonnaire [...] devient une conséquence des principes des choses matérielles qui avaient été exposés au Livre II [...] On voit donc que Descartes ne se borne pas à ratifier l'hypothèse de Copernic, mais l'intègre dans un système plus vaste [...] avant même de conférer à l'hypothèse ainsi modifiée l'évidence de la science parfaite [...] Leibniz disait que « son système du monde, quelque imaginaire qu'il soit, est pourtant si beau qu'il peut servir de modèle à ceux qui chercheront les causes véritables » (Gerhardt, IV, p.308) et d'Alembert écrivait, dans le *Discours préliminaire de l'Encyclopédie*, « Si l'on juge sans partialité ces tourbillons devenus aujourd'hui presque ridicules, on conviendra, j'ose le dire, qu'on ne pouvait alors imaginer rien de mieux ».

L'ARISTARQUE DE ROBERVAL , UN MONDE POSSIBLE

Nous devons nous arrêter à un curieux traité au statut assez particulier, connu sous le titre *l'Aristarque*. L'affaire est bien connue : en 1644 paraît à Paris, un petit volume de 148 pages intitulé *Aristarchi Samii de Mundi Systemate, partibus, & motibus ejusdem, Libellus. Adjectae sunt notae ineundem libellum* AE.P. de Roberval... Paris, Antonium Bertier, 1644.

Ce traité se présente comme la traduction anonyme, en latin, d'un texte d'Aristarque de Samos transmis par un manuscrit arabe. Sur instance du P. Mersenne et de Pierre Brulart, Roberval aurait accepté d'en améliorer le style et de l'annoter pour la placer sous l'éclairage des découvertes astronomiques récentes. D'Aristarque, qui fut l'élève du troisième chef du lycée d'Aristote, Straton, ne nous est parvenue qu'une œuvre *Les Distances de la Lune et du Soleil*. Tout Paris sait rapidement que le véritable auteur de l'Aristarque est bien Roberval.

Le traité n'a pas laissé indifférent et eut un réel impact ; en témoignent la réédition qu'en fait Mersenne en 1647 en l'intégrant au tome III de ses *Novarum Observationum*, les réactions favorables de Frenicle de Bessy, Ménage ou Dunoyer et l'hostilité inévitable de Descartes. Torricelli se montre aimablement sceptique dans une lettre à Mersenne de 1645.

²⁵ Cette thèse cartésienne fait écrire à Lerner (*Le Monde des Sphères*, II, p. 179) : « En sorte que les « cieux liquides » emporteraient la terre considérée comme en repos... exactement comme auraient pu le faire les orbes « solides » traditionnels. » Le péripatéticien Liceti soutenait quelques années avant Descartes que les planètes seraient entraînées par des orbes « fluides » comme le sont l'eau et l'air (cf note 232, p.303)

²⁶ AAA Copernic, Paris, Blanchard, 1975, p. 238-239.

L'Aristarque semble avoir été bien connu en Italie, comme l'atteste l'usage à des fins polémiques qu'en fait le jésuite Bettini en 1655²⁷. Mersenne, pour sa part, ne ménage pas ses louanges en écrivant perfidement à Descartes que

« tous lui applaudissent de ce traité comme d'une œuvre héroïque que même les anciens n'eussent pu si bien faire, quand même c'eût été Aristarque Samius ou Archimède. Et vous nous obligeriez tous de nous desiller les yeux en cela ; et même je crois, l'auteur vous en saura gré »²⁸.

Dans son Histoire de l'astronomie moderne, Jean Baptiste Delambre mentionne longuement ce texte.

« Ce système — écrit-il — un peu moins extravagant que celui des tourbillons, a fait moins de bruit, peut-être pour cette raison même, ou peut-être encore parce qu'il venait trop tard. »²⁹

Le rapprochement que fait Delambre est pertinent.

J'ai montré qu'en 1642, Roberval ne pouvait qu'être précisément au fait de la maturation cartésienne et nous avons là un argument extrêmement fort pour associer l'Aristarque aux Principia et pour lire celui-là en fonction de ceux-ci. Or, l'Aristarque est rédigé courant 1643, terminé en juillet, publié début 44.

Les conditions d'une "confrontation" sont bien réunies.

J'estime pouvoir tirer quatre enseignements de l'étude du pseudo traité d'Aristarque³⁰ :

1. Il développe une argumentation sérieuse et raisonnée en faveur du système néo-copernicien.
2. Il consiste en une libre variation sur le système du monde (ou sur les systèmes). Tel est précisément le statut que son auteur entend lui donner, sans prétendre à la vérité de la cosmologie qui y est exposée. En ce sens exact, c'est une œuvre anti-cartésienne puisqu'elle ajoute une hypothèse possible au "véritable système du monde" dont elle constitue sans doute un pastiche.
3. On y trouve convoqués ou élaborés certains des concepts principaux que Roberval emploie dans l'étude des phénomènes physiques que sont les effets barométriques, l'attraction, la lumière et même la composition des mouvements et des forces.
4. Les trois enseignements précédents font de l'*Aristarque* un manifeste significatif en faveur d'un certain scepticisme scientifique, ou phénoménisme.

Je présente ici quelques arguments en faveur de chacun de ces quatre points.

1. 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 »³¹. L'affaire est entendue, chez les partisans comme chez les adversaires du nouveau système : juste après la publication du Dialogue, en 1633, un jésuite traditionaliste (en fait défenseur

²⁷. Mario Bettini, *Appendix exfucatoria...*, Venetiis, apud Paulum Baleonium, 1655, p. 61. Sur les termes de la polémique, voir Denise Arico, « Philosophie et nouvelle science dans la polémique entre Mario Bettini et Giovan Battista Riccioli », dans *Atomisme, vide et géométrie dans l'école de Galilée, op. cit.* (à paraître).

²⁸. Mersenne à Descartes, 22 mars 1646, A.T. IV, p. 739

²⁹. Delambre (J.-B.), *Histoire de l'astronomie moderne*, 2 vol., Paris, 1821, t. II, p. 518.

³⁰. Cette étude est loin d'être terminée et j'espère avoir bientôt la possibilité de donner une traduction commentée.

³¹. *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* [Florence, 1632], 3^e journée, d'après l'édition française donnée par R. Fréreau et F. De Gandt, Paris, Seuil, 1992, p. 331.

du système de Tycho), Libert Fromont avait combattu l'héliocentrisme dans un livre intitulé *L'Anti-Aristarque*.³² La réplique de Roberval, est 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, trainé 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. »³³

On a beaucoup souligné, avec juste raison, qu'il n'y avait, dans ce traité, ni calculs, ni arrangement savants d'épicycles ou d'équants, mais seulement deux schémas. Pour exacte que soit cette observation, elle appelle deux remarques.

C'est un genre parfaitement recevable à l'époque et l'absence d'arguments techniques ne l'invalide en rien. Les points délicats et controversés reçoivent, dans l'*Aristarque* des explications générales destinées au public éclairé et non seulement aux astronomes professionnels : phases de Vénus, précession des équinoxes, apogées, trajectoires elliptiques, comètes etc.

Secondement, Roberval montrera, peu après la publication de l'*Aristarque*, qu'il est un professionnel et un technicien compétent dans le relevé et l'exploitation des données d'observations et des calculs astronomiques. Le style ne décrédibilise pas le traité, mais contribue à lui donner une large audience.

En conséquence, il convient d'écarter cet argument complètement sans valeur qui vise à discréditer a priori l'*Aristarque*. Dans l'histoire de l'astronomie, à côté de quelques rares et indispensables ouvrages de haute technicité mathématique (l'*Almageste*, le *De revolutionibus*, l'*Astronomia nova*, les *Principia* de Newton par exemple) il existe un bon nombre d'œuvres de grande importance qui ne présentent que les lignes générales ou conclusives des théories, accessibles à un public non mathématicien.

2. Roberval s'engage dans la description du fonctionnement et de la genèse du système tout entier. Le premier mot du traité, *Intelligatur*, donne le ton à tout l'ouvrage. « Prenons comme hypothèse », « admettons » ou « supposons » : cette expression est véritablement scandée au fil des 148 pages. De vastes hypothèses, nous déduisons des effets dont l'exactitude valide la possibilité, la légitimité de ces hypothèses et non — bien sûr — leur vérité.

« Supposons que le Soleil soit conçu comme puissamment chaud, ou du moins comme pourvu d'une puissante capacité de chauffer, et que la matière dont le monde est composé (à part la Terre, les astres et quelques corps qui sont tout proches de ces derniers) soit conçue comme fluide, liquide, perméable, diaphane et susceptible d'être rendue plus rare ou plus dense par une force de chaleur plus forte ou plus petite [...]. »³⁴

La matière du monde est par la suite, à plusieurs reprises, qualifiée de *liquida* et *permeabilis* (p. 38). Un point est clair : les atomes ne sont pas mentionnés et l'on a — au contraire — une matière homogène. C'est ce que confirment tous les passages du traité relatifs à la « matière du monde ». On peut ici faire un rapprochement avec la matière subtile de Descartes.

³². On verra sur ce point l'article « Aristarque », signé par William H. Stahl, du *Dictionary of Scientific biography*, New York, Charles Scribner's sons, 1981, vol. 1, p. 246-250.

³³. Dans *Préface-dédicatoire à Brûlart*. Le récit au sujet de Cléanthe le stoïcien est transmis par Plutarque. cf. D.S.B. (*ibid.*) art. « Aristarque ».

³⁴. « *Intelligatur Sol potenter calidus, vel certe potenti virtute calefaciendi praeditus. Materia autem ex qua Mundus componitur, (praeter terram, astra, & quaedam corpora ipsis proxime adjacentia, de quibus infra) esse fluida, liquida, permeabilis, diaphana, quaeque vi caloris majoris et minoris, rarior aut densior effici possit.* » (p. 1, traduction Gisèle Besson).

La seconde remarque est valable pour tout le traité : aucun principe spirituel originel n'est invoqué ; aucun Dieu créateur dont les attributs fonderaient la genèse et l'organisation du monde. En lieu et place, il y a un corps d'hypothèses possibles. C'est un choix délibéré selon lequel il n'y a pas de recours à une création divine, mais un état hypothétique originel. La cause de l'organisation et des mécanismes cosmologiques, c'est le temps :

« cela posé, tout ce dont on démontrera par la raison l'existence dans le temps, cela, il sera bien clair que c'est arrivé à cause (propter) du temps écoulé » (p. 45).

Il n'est pas possible de décrire les systèmes et l'enchaînement des phénomènes tels qu'ils sont passés en revue. Je me borne à mentionner les sous-titres du traité : Du mouvement du Soleil, Du mouvement périodique des planètes, Du mouvement diurne, De la déclinaison de la lune, Des apogées et périgées, De la précession des équinoxes, Des comètes, à quoi il convient d'ajouter une série de notes concernant les phénomènes qu'Aristarque ne pouvait pas connaître comme les satellites de Jupiter ou la forme elliptique des orbites.

Roberval se sépare radicalement des principes explicatifs cartésiens — et aussi de ceux de l'École — lorsqu'il avance quelques principes généraux d'organisation du monde. On pourrait parler de "lois de la nature" en soulignant cependant que ces principes généraux ne font aucun usage du mécanisme.

Premier principe d'organisation du Monde : le soleil, un gigantesque système qui attire la matière environnante, la chauffe et l'expulse violemment par des sortes de canaux ou tuyères. Une sorte de respiration immense et violente s'exprime par ces tuyères, qui jouent alors le rôle de réacteurs faisant tourner l'astre sur lui-même. Roberval compare le soleil à l'éolipile, chaudière sphérique inventée par Héron d'Alexandrie, pouvant tourner autour d'un axe³⁵. Le système solaire peut d'ailleurs être transporté dans les espaces infinis si la résultante des réacteurs a un moment non nul.

Second principe : la matière du monde est d'autant plus raréfiée qu'elle est chauffée. Le rôle central de la raréfaction-dilatation est d'ores et déjà présent (on la retrouvera dans les discussions sur le vide). On a ainsi des densités variables et les corps de densité égales se réunissent naturellement (comme dans la flottaison ; le système s'appuie fortement sur des considérations d'hydrostatique). Les différences de densités de la matière fluide du monde viennent de ce que le soleil chauffe inégalement les parties.

Troisième principe : il existe, dans toute la matière du monde, une certaine propriété par la force de laquelle toute cette matière se réunit en un seul corps continu dont les parties se portent les unes vers les autres dans un effort permanent pour se joindre étroitement. La tendance générale est donc à la constitution d'une forme sphérique dont le soleil occupe le centre. Cette hypothèse d'attraction universelle et mutuelle des corps est explicitement opposée à la conception d'un centre du monde vers lequel les corps se dirigeraient — « ce que croient quelques ignorants » (p. 3) :

L'action de ces principes généraux produit un mouvement général des parties du monde dont résulte la formation de sous systèmes à peu près stables, de densité et de chaleur moyennes semblables. La distance au soleil des sous systèmes planétaires évolue jusqu'à ce qu'ils trouvent une région de densité moyenne égale à la leur. Un des principes explicatifs mobilisé pour la mise en rotation des sous-systèmes est celui de la composition des mouvements.

La terre et ses environs sont organisés selon cette attraction et le poids des corps en est un effet particulier. Roberval y considère trois éléments : la terre, puis l'eau qui la recouvre en partie et comble les cavités, enfin l'air qui forme avec ces deux corps un certain système³⁶.

Les accidents du système terrestres sont présentés sous l'hypothèse de l'existence d'exhalaisons et de vapeurs auxquelles sont consacrés de longs développements qui font

³⁵. On trouve plusieurs références à l'Éolipile chez Descartes, à propos des vapeurs (5 oct. 1637, A.T. I, p. 430-431 ; 30 oct. 1638, A.T. I, p. 614 ; 3 fev. 1643, A.T. III, p. 612).

³⁶. Voir, sur ce point l'article de L. Auger, « Les idées de Roberval sur le système du monde », *Revue d'Histoire des Sciences*, t. X, 1957, p. 226-234.

immanquablement penser aux exhalaisons des Météorologiques d'Aristote. Cet hommage rendu à sa physique est repris au moins une autre fois au cours du traité (p. 112).

Il faut encore constater que ce système ne laisse pas de place au vide complet. Les allusions qu'y fait Roberval tendent plutôt à réfuter sa possibilité. En effet, l'attraction pousse la matière fluide à remplir les espaces libérés.

Descartes a violemment réagi contre l'Aristarque³⁷. Ses trois arguments principaux sont que Roberval est a priori un incapable prétentieux, que son concept d'attraction est ridicule et qu'il suppose un monde animé. Un bref commentaire du troisième argument n'est pas inutile. Roberval joue habilement de l'hypothèse d'une âme (ou de diverses âmes) du monde. En tant qu'il s'agit du texte d'Aristarque lui-même, il entre dans cette hypothèse et expose comment les divers corps animés contribuent à l'organisation du système ; puis, revêtant son identité d'éditeur moderne, il s'en dissocie en remarquant que les principes généraux (chauffage, raréfaction et attraction) suffisent à rendre compte des effets atteints, même si c'est avec une moindre précision.

Je ne crois pas que cette position corresponde à une conviction profonde chez Roberval. Qu'une activité spirituelle transcendante puisse offrir des explications causales conformes au système du monde, voilà ce qu'admet Roberval et voilà pourquoi il peut prêter à Aristarque une telle explication. Cependant ce qui lui importe surtout est de montrer que l'on peut se dispenser d'une telle hypothèse animiste, les phénomènes s'expliquant tout aussi bien sans recourir à une âme ; tel est le rôle que jouent ses notes additionnelles. Cette position constitue l'essentiel de l'Épilogue de l'Aristarque.

Une première leçon peut donc être tirée de ces remarques : un ou des Dieux ne sont pas nécessaires et peuvent donc être congédiés de la spéculation astronomique.

Voici donc un vaste système du monde tout entier fondé sur des hypothèses incertaines et non expérimentables. Systématiquement, Roberval recourt à un style hypothétique, à un subjonctif conditionnel, à des alternatives équivalentes quant à leurs effets. Son système du monde dérive en fait d'une hypothèse non démontrée mobilisant une certaine conception a priori de la matière, des éléments, des principes des mouvements des corps célestes, des exhalaisons, etc. La fonction de cette construction me semble être la suivante : ennemi de l'ancienne physique, Roberval ne veut pas pour autant se ranger sous la bannière de la nouvelle philosophie cartésienne. La doctrine du Monde cartésienne ne lui semble pas bien fondée puisqu'elle est métaphysique et a priori. Voici donc qu'il réplique par une autre fable, ni mieux ni moins bien fondée. C'est une manière de manifester le peu crédit qu'il convient d'accorder aux tourbillons cartésiens et aux lois déduites de l'immutabilité divine. Descartes propose une hypothèse globale et explicative, en voici une autre, concurrente possible, « moins extravagante » dira Delambre...

3. Le troisième enseignement que je tire de cette lecture concerne des notions qui seront mises en œuvre dans des spéculations plus "régionales" et plus sujettes à controverses expérimentales. La raréfaction mais pas le vide absolu. Il y a une profonde continuité entre le Roberval de l'Aristarque et celui des deux Narrations sur le vide. L'attraction, thèse que Roberval défendra au cours de la discussion sur la pesanteur est attractionniste. La composition des mouvements : un des principes explicatifs mobilisé pour la mise en rotation des sous-systèmes est celui de la composition des mouvements et il est assez piquant de lire "sous la plume d'Aristarque" « que les choses soient ainsi est manifeste à celui qui est informé de la doctrine de la composition des mouvements » (p. 34), doctrine plutôt anachronique pour un auteur alexandrin. Au sein de son vaste pastiche cosmologique, Roberval introduit un des concepts principaux de sa propre physique rationnelle.

4. En définitive, si Roberval ne croit pas davantage à la vérité de son grand système qu'à tout autre que l'on pourrait concevoir, il se réserve le droit d'y faire jouer certaines hypothèses qui, par ailleurs, et dans des conditions où elles peuvent être mises à l'épreuve, lui paraissent les plus aptes à "sauver les phénomènes".

³⁷. Lettre à Mersenne du 20 février 1646, A.T. IV, p. 392-393.

J'ai insisté sur la multiplication des "mises sous hypothèse" des explications avancées. Je veux ajouter qu'en de multiples occasions, souvent importantes, Roberval ouvre des alternatives en soulignant bien l'impossibilité et même l'inutilité qu'il y aurait à prétendre affirmer quelle est la bonne solution. De stellis fixis quid censendum sit difficilior est statuere (p. 20). L'hypothèse selon laquelle elles sont des soleils au centre d'autres grands systèmes, ne dépend que de pures conjectures et n'est confirmée ni par la raison, ni par l'expérience, pas plus qu'elle n'est contredite par celles-ci (p. 20-21). On a d'autres exemples de cette manière de raisonner ; ainsi par exemple lorsqu'il évoque des hypothèses alternatives possibles qui rendent compte de l'action du soleil³⁸.

Il s'agit, dans tous les cas, de montrer que les causes premières sont inaccessibles, sauf à demeurer parfaitement hypothétiques.

En conclusion, citons ce court passage d'un texte inédit où Roberval exprime son rejet violent de toute prétention à fonder la physique sur la métaphysique :

« Touchant les parties de la philosophie, la logique peut surprendre et être surprise. La morale est changeante, flatteuse et veut être flattée : elle est souvent remuée et ruinée par ses ennemis. La métaphysique est fort chymérique. La physique est toute véritable, mais elle est fort cachée ; elle ne se découvre aux hommes que par la vertu de ses effets. Elle n'est ni flatteuse, ni susceptible de flatterie. Les chymères sont anéanties par son seul aspect avec autant de facilité que les ténèbres par la lumière : elle n'est jamais contraire à elle-même ; quoiqu'elle produise des effets contraires ou qui nous semblent tels. Partout elle est absolument invincible. On ne la peut détruire, non pas même l'altérer en la moindre chose ; quoique les corps dans lesquels elle se rencontre puissent changer de mouvement, de figures et d'autres accidents. D'où il s'en suit que tous les hommes ensemble ne peuvent rien contre elle. Les uns peuvent bien, par leurs artifices, la faire croire aux autres toute différente qu'elle est en effet : mais malgré leur logique captieuse, malgré les chymères de leur creuse métaphysique, la nature demeure toujours telle, constante en son être véritable : et la morale, avec toute sa flatterie, avec toute l'autorité de ses partisans, quelque nombre de voix qu'elle produise dont elle mendie les suffrages ne recevra qu'un affront si elle entreprend quelque chose à son préjudice. Enfin au préjudice de la physique, quoiqu'elle soit aussi ancienne que le monde, elle ne vieillit jamais, car le temps n'est que son vassal : elle est toujours vieille dans ses productions, sans se soucier ni des vieilles ni des nouvelles chymères que les visionnaires ont fait et font encore tous les jours à son égard. »³⁹

Avec l'Aristarque, on a un modèle du système du monde qui illustre un possible de type nouveau dans les sciences de la nature. La possibilité sans la certitude, ce que l'on a dénommé le phénoménisme. Cependant, l'exposé, en astronomie, de modèles « seulement possibles » était auparavant dépourvu de statut physique ; il s'agissait plutôt de présentations géométriques –non physiques- ayant pour fonction (quelque peu mystérieuse, car fondamentalement contradictoire avec la vérité selon la nature des choses) de représenter les phénomènes. Ici, il y a davantage : c'est la réalité même des phénomènes qui relève de la possibilité découplée de la certitude. Ce sont bien les phénomènes que l'on vise, et que l'on atteint, sans les élucider.

³⁸. « Et ceci est la première des deux manières par laquelle [...] pouvait être expliqué un mouvement quelconque dans le système du monde, savoir par la force interne du soleil qui peut être dite cause interne. La seconde qui procède du soleil lui-même comme cause externe... » (p. 37).

³⁹. Roberval, *L'Évidence, le fait avéré, la chymère* : manuscrit coté Ph 4 dans le catalogue Gabbey, partiellement transcrit par Auger dans *Un savant méconnu : Gilles Personne de Roberval (1602-1675)*, Paris, Blanchard, 1962, p. 136-137. Je ne peux résister au jeu des citations comparées en relevant ce paragraphe de la *Préface sur le traité du vide* de Pascal où il écrit : « Les secrets de la nature sont cahés ; quoiqu'elle agisse toujours, on ne découvre pas toujours ses effets : le temps les révèle d'âge en âge, et quoique toujours égale en elle-même, elle n'est pas toujours également connue » (éd. J. Mesnard, t. II, p. 780-781).

PASCAL

XVIII^e Provinciale. Après avoir donné ses arguments en faveur la légitime réinterprétation des écritures en un sens conforme à l'information certaine des faits sensibles, il poursuit pour le père Annat:

Ce fut aussi en vain que vous obtîntes contre Galilée ce décret de Rome qui condamnait son opinion touchant le mouvement de la Terre. Ce ne sera pas cela qui prouvera qu'elle demeure en repos; et, si l'on avait des observations constantes qui prouvassent que c'est elle qui tourne, tous les hommes ensemble ne l'empêcheraient pas de tourner, et ne s'empêcheraient pas de tourner aussi avec elle. Ne vous imaginez pas de même que les lettres du pape Zacharie pour l'excommunication de Saint Virgile sur ce qu'il tenait qu'il y avait des antipodes, aient anéanti ce nouveau monde [...]⁴⁰.

Cachot:

« Je trouve bon qu'on n'approfondisse pas l'opinion de Copernic. Mais ceci: Il importe à toute la vie de savoir si l'âme est immortelle »⁴¹. On peut y ajouter ce jugement fort 'neutre' émis en octobre 1647 : « Mais qui osera faire un si grand discernement, et qui pourra, sans danger d'erreur, soutenir l'une [des hypothèses astronomiques] au préjudice des autres...? »⁴²

Le silence de Pascal signifie-t-il que, pour lui, la thèse copernicienne est fautive? Certainement pas et il est parfaitement clair qu'elle est au moins possiblement vraie. S'agit-il de ne pas approfondir l'opinion de Copernic car les arguments en sa faveur sont faibles? Non pas, il s'agit 'seulement' d'attirer l'attention sur une disproportion exposée dans le fragment Cachot: approfondir l'opinion de Copernic est à l'enquête sur l'immortalité de l'âme comme jouer au piquet est à la connaissance d'un éventuel arrêt de mort pour le prisonnier. Ceci renvoie aux fragments dans lesquels science et philosophie sont remises à leur place (et Descartes explicitement) : « Nous n'estimons pas que toute la philosophie vaille une heure de peine » (n° 84-79) ou encore : « Ecrire contre ceux qui approfondissent trop les sciences. Descartes » (n° 553-76).

Ces discussions, philosophiques et scientifiques, n'ont guère d'importance en regard des véritables enjeux de la préoccupation religieuse. Cette profonde raison n'est pas la seule: en cette affaire comme sur la question de la nature de la lumière, ou même du vide, le scepticisme est au rendez-vous. Nous n'avons - pour l'heure - pas de preuves certaines, livrées par les connaissances sensibles de la vérité de l'opinion de Copernic ; sa possibilité est cependant une certitude :

« Car, comme une même cause peut produire divers effets différents, un même effet peut être produit par plusieurs causes différentes. C'est ainsi que , quand on discourt humainement du mouvement ou de la stabilité de la Terre, tous les phénomènes des mouvements et rétrogradations des planètes s'ensuivent parfaitement des hypothèses de Ptolémée, de Tycho, de Copernic et de beaucoup d'autres qu'on peut faire, de toutes lesquelles une seule peut être véritable »⁴³.

Pascal n'est pourtant pas un 'relativiste' et toutes les théories ne se valent pas ; certaines sont invalidées par des connaissances nouvelles ; ainsi note-t-il dans la Préface au traité du vide à propos des observations sur les comètes que Kepler avait faites en 1618:

« [les anciens] n'avaient-ils pas aussi sujet de dire que tous les corps corruptibles étaient enfermés dans la sphère du ciel de la lune, lorsque durant le cours de tant de siècles, ils n'avaient point encore remarqué de corruption ni de génération dans cet espace? Mais ne devons-nous pas assurer le contraire, lorsque toute la Terre a vu sensiblement des comètes s'enflammer et disparaître bien loin au delà de cette sphère? »⁴⁴.

⁴⁰ Pascal, Mars 1657, in *Oeuvres Complètes* éd. Lafuma, p. 467b.

⁴¹ *Pensée* 218 de la numérotation Brunschvicg et 164 chez Lafuma. Dans la suite les pensées de Pascal seront suivies de deux numéros, dans cet ordre.

⁴² Lettre à Noël du 29 oct. 1647 in *Oeuvres complètes*, éd. Mesnard, t.2, p.524.

⁴³ Pascal, *Lettre à Noël*, 29 oct. 1647, in Mesnard, t. 2, p.524.

⁴⁴ Pascal, *Préface au traité du vide*, in Mesnard, t. 2, p. 783.

Si la thèse galiléenne n'est pas absolument démontrée, elle est parfaitement envisageable et Pascal ne semble pas particulièrement bouleversé par le fait qu'éventuellement, nous devons tourner avec la terre plutôt que de contempler, stables et immobiles le spectacle du cosmos. On cite volontiers un autre passage pascalien à preuve de son anticopernicanisme: La pensée Disproportion de l'homme :

Que l'homme contemple donc la nature entière dans sa haute et pleine majesté, qu'il éloigne sa vue des objets bas qui l'environnent. Qu'il regarde cette éclatante lumière mise comme une lampe éternelle pour éclairer l'univers, que la terre lui paraisse comme un point au prix du vaste tour que cet astre décrit, et qu'il s'étonne de ce que ce vaste tour lui-même n'est qu'une pointe très délicate à l'égard de celui que ces astres, qui roulent dans le firmament, embrassent⁴⁵.

Le soleil tourne donc autour de la terre! mais il ne s'agit pas d'un texte scientifique, astronomique; il s'agit d'une des multiples pièces où il est question d'inquiéter et de convaincre l'autre et l'on sait bien comment l'Art de persuader doit éminemment s'adapter à l'interlocuteur, composer avec l'état de son savoir ou de ses croyances; qu'importe alors de parler comme le vulgaire sur un point secondaire si je puis l'entraîner quelque peu sur la voie salutaire de l'inquiétude mystique. Jean Mesnard avait trouvé les mots justes pour évoquer cette attitude:

La vérité scientifique est précieuse en ce qu'elle est rigoureusement établie, mais elle ne touche pas le cœur, elle n'engage pas le destin profond de l'homme, elle n'assigne aucune fin à sa conduite [...] La solution du système de Copernic peut attendre; celle de l'immortalité de l'âme s'impose immédiatement. A quoi on pourrait objecter que détruire l'image d'un univers dont la Terre serait le centre, c'est changer toute la conception de l'homme. Pascal répondrait sans doute qu'un tel changement ne touche à rien de ce qui est essentiel pour l'homme⁴⁶.

A tout ceci j'ajouterais que Pascal n'est pas un astronome, ni théoricien, ni observateur. Il se positionne alors comme incompetent sur la question⁴⁷.

⁴⁵ (72; 199).

⁴⁶ Mesnard J., in AAA Copernic, *op. cit.*, p. 46.

⁴⁷ Cf. les commentaires de M. Serres sur cette position 'indifférente' in *Le système de Leibniz, op. cit.*, p. 657 sq.

NOTES SUR NEWTON

Tout ceci converge vers l'œuvre de Newton, les *Philosophiae naturalis Principia mathematica* (1687, 1713, 1726)

Cet ouvrage est rédigé en trois ans, 1684-1687. Un traité de mécanique et d'astronomie en trois livres. I : théorie du mouvement des corps soumis à des forces centripètes. II. Mouvement des corps soumis à une résistance du milieu. III. Nouveau système astronomique.

Le titre est une sorte de défi à Descartes.

Newton propose de penser l'Univers comme un système mathématique particulier, choisi et réglé par Dieu. C'est le triomphe d'un programme lancé par Galilée (et Descartes ?) 40 ans plus tôt.

Deux livres en français et de base : Marco Panza, Michel Blay,

GENESE

Une conjecture avait été avancée par Robert Hooke vers 1680 : « l'hypothèse d'une force dirigée vers le Soleil et proportionnelle à l'inverse du carré des distances suffit à expliquer la trajectoire des planètes. » Newton va lui donner un contenu précis et la modifier pour la rendre compatible avec les trois lois de Kepler (question importante : la version généralisée newtonienne émane-t-elle de ces 3 lois ? en fait-elle des théorèmes ?).

Ces 3 lois de Kepler étaient admises comme empiriquement valables.

« C'est dans les détails que réside la grandeur de l'œuvre de Newton. Si l'on pense que sa contribution majeure est d'avoir affirmé que les planètes tournent autour du soleil en suivant des orbites elliptiques, étant attirées par celui-ci par une force d'attraction inversement proportionnelle au carré de leur distance qui les en sépare, on ne comprendra guère la différence entre la mécanique et la cosmologie de Newton et les lois de Kepler ou la conjecture de Hooke. Newton connaissait ces lois et cette conjecture avant de commencer son travail et tous les savants de son temps les connaissaient ». (Panza, *Newton*, Belles lettres, 2003, p. 149)

HOOKE POSE LA QUESTION EN NOVEMBRE 1679, HALLEY REVIENT EN 1684.

Un premier échange de lettres traite de la trajectoire d'un corps qui tombe vers le centre de la terre. Dans la discussion des acquis newtoniens : l'analyse de la force centrifuge, le concept de force dégagé des grandes ambiguïtés (action, puissance, mouvement, tendance etc.). Newton jouera sur deux tableaux : soit un modèle en impulsions très rapprochées et successives, soit comme action continue générant un mouvement uniformément accéléré. Une idée stable : la force est la cause de la modification de la quantité de mouvement d'un corps ; une orientation stable : comment exprimer mathématiquement cette notion ? Il opte pour une représentation (proto) vectorielle : une ligne ayant une direction et une longueur.

Il établit d'abord que

« Toute orbite due à l'action d'une force d'attraction directe vers un centre fixe sur un corps en mouvement inertiel satisfait à la seconde loi de Kepler (les rayons-vecteurs) »

Puis, il prouve la conjecture de Hooke en 1680 : « Si la trajectoire est elliptique, alors la force est en $1/d^2$ ». Mais pas la proposition inverse.

Il s'arrête là et s'en retourne à ses travaux de théologie et d'alchimie.

Les mathématiciens de la Royal Society continuent de travailler le sujet de Hooke. Ils cherchent à démontrer les 3 lois de Kepler à partir de la conjecture de Hooke. Halley visite Newton en 1684. Et lui demande « Si la force est en $1/d^2$, quelle sera la trajectoire ? », soit le problème inverse.

Newton répond qu'il a la solution dans ses papiers et qu'il la lui enverra. Il rédige un court traité (5 versions) , le *De motu* qu'il envoie à Halley où se trouve la réponse. Grande audience à la R.S. qui demande un développement à Newton.

28 avril 1686 : premier livre,

7 mars 1687, second livre,

4 avril 1687, troisième livre. Publication.

LES MOYENS ESSENTIELS

- Premier point important :

Dans ce traité règnent les causes formelles qui, chez Newton, sont mathématiques. Le livre 1 servira de cause aux découvertes du livre 3. Absence de considération des causes efficientes, c'est-à-dire de présentation des raisons pour lesquelles agissent ces forces dans la nature. L'action à distance sur des masses-points permet de rendre compte des phénomènes astronomiques et mécaniques en général, mais pas d'en donner les causes. C'est pourtant une vraie question aux yeux de Newton.

- Second point important :

Des concepts physiques sont précisés et surtout, mathématiquement caractérisés. La masse inertielle (ou masse) dite quantité de matière, la mesure de la répugnance d'un corps à modifier son état inertiel. La quantité de mouvement. Il établit la troisième loi : deux corps sont attirés par des forces égales et opposées.

- Troisième point important :

Des mathématiques adaptées à l'étude des variations très petites sont élaborées. Newton disposait, depuis 1664-1671, d'une théorie des variations infiniment petites, la méthode des fluxions. Il choisit de ne pas (presque pas) l'employer dans ce traité. Il élabore une méthode dite « des premières et dernières raisons », fondée sur une conception et une représentation géométrique de l'idée de limite. Elle lui permet, lors de variations temporelles qui s'amenuisent vers un « instant », de substituer des variables les unes aux autres.

Tout ceci fait le livre I. Dans le livre 2, Newton aborde les lois des mouvements dans un milieu résistant. Il faut considérer, dans l'espace, l'hypothèse d'un Ether subtil qui serait la matière des cieux. Vaste thématique cartésienne. Il répondrait à la question des causes efficientes. Newton montre qu'un tel milieu rendrait incompatible le livre 1 et les lois de Kepler, soit, les données astronomiques connues. Le livre 2 prend donc une valeur négative, anti cartésienne mais devient stérile à l'accomplissement du livre 3.

Le livre 3 est comme l'application du livre 1 au système du monde. Il permet de décrire avec une précision admirable les trajectoires planétaires et les prévisions qu'on peut attendre de l'astronomie. Il exploite en outre une généralisation de l'attraction à distance. Celle-ci est aussi une attraction gravitationnelle en ce sens que le même concept de cette action à distance en $1/d^2$, rend aussi compte de la chute des corps telle que la physique galiléenne l'a établie. La pomme chute vers la terre comme la pomme. Un problème surgit de ce succès : avec cette généralisation surgit un second concept de masse, la masse gravitationnelle qui mesure le pouvoir attractif d'un corps. La théorie newtonienne constate l'équivalence (à un facteur constant près) de ces deux concepts de masse. Cette équivalence est une coïncidence somme toute mystérieuse et à ce titre une manière d'anomalie.

Des conséquences remarquables sont tirées : la forme des planètes, les marées, les précessions, les comètes etc.

Un vaste cycle est achevé pour ce qui concerne le concept de monde dont la crise avait été ouverte par le *De revolutionibus*.