

GALILÉE ET LES FONDEMENTS DE LA PHYSIQUE

1. LES ORIGINES DE LA PHYSIQUE

La période grecque

L'évolution de la physique jusqu'au XV^e siècle est très lente et entrecoupée de longues périodes de stagnation, c'est ce que l'on pourrait appeler la préhistoire de la physique. Le mot physique recouvre alors des sens différents, mais se fait autour de la conviction commune que les lois de la nature sont intelligibles. La civilisation grecque domine la connaissance scientifique et philosophique pendant près d'un millénaire.

Thalès de Milet (625-548 av. J.-C.) se rend célèbre en prédisant une éclipse de soleil (585 av. J.-C.), découvre que l'ambre frotté attire les corps légers et énonce son fameux théorème. Pythagore (570-480 av. J.-C.) étudie l'harmonique et donne aux mathématiques un théorème à jamais célèbre. Les atomistes grecs Leucippe (500-420 av. J.-C.) et Démocrite (460-370 av. J.-C.) élaborent la première théorie atomique, mais il s'agit alors de pures spéculations sans grande valeur scientifique. Platon (427-348 av. J.-C.), disciple de Socrate (470-399 av. J.-C.) en fait le personnage central de ses dialogues. Son œuvre exercera une influence durable, et la physique du XV^e siècle renouera avec le mathématisme platonicien. De même son Académie, sur le fronton de laquelle est inscrit « que nul n'entre ici, s'il n'est géomètre », fondée en 387 av. J.-C., inspirera les académies de la Renaissance.

Aristote (384-322 av. J.-C.), disciple de Platon, fonde à Athènes sa propre école, le lycée, en 335 av. J.-C. Sa pensée tranche sur le rationalisme mathématisant de Platon et repose sur une approche plus expérimentale. Il fait triompher le point de vue d'Empédocle (490-435 av. J.-C.) et sa théorie des quatre éléments (l'eau, l'air, la terre et le feu) pour plusieurs siècles. Par ailleurs, on fait généralement remonter l'histoire de la mécanique à Aristote en lui attribuant un traité intitulé *Questions mécaniques*. Euclide (330-270 av. J.-C.) effectue dans ses *Éléments* – traité en 13 volumes – une merveilleuse synthèse des mathématiques de son temps, qui inspirera nombre de savants à

travers les siècles. On lui doit également une *Optique*, ouvrage important, mais qui est surtout un traité de perspective.

On peut avancer qu'Archimède (287-212 av. J.-C.) a été à la physique ce qu'Euclide a été aux mathématiques. On lui doit le fondement de la statique des solides, et il expose en particulier le principe du levier. Il comprend qu'avec un levier on peut soulever de lourds fardeaux, ce qui lui suggère la phrase bien connue :

Qu'on me donne un point d'appui et je soulèverai le monde.

Il est également à l'origine de l'hydrostatique avec le fameux principe d'Archimède et le non moins célèbre « Eurêka » (j'ai trouvé) prononcé à la sortie de son bain. Sa popularité vient également de la légende suivant laquelle il aurait, à l'aide de miroirs, incendié la flotte romaine assiégeant Syracuse.

Ératosthène (284-192 av. J.-C.) réalise une première évaluation de la circonférence de la Terre et passe à la postérité grâce à sa méthode permettant de trouver les nombres premiers (crible d'Ératosthène). Hipparque (161-127 av. J.-C.) découvre la précession des équinoxes et établit le premier catalogue d'étoiles. Son catalogue contient la position de 1025 étoiles classées en six catégories suivant leur éclat apparent. Il jette également les bases de la trigonométrie.

Deux millénaires plus tard l'Agence Spatiale Européenne (ESA) donnera à son satellite d'astrométrie le nom d'HIPPARCOS (HIGH Precision PARallax COLLECTION Satellite) qui établira pendant quatre ans (1989-1993) un catalogue de plus d'un million d'étoiles, le plus précis à ce jour.

Héron d'Alexandrie (qui vivait, semble-t-il au II^e siècle de notre ère) établit la loi de la réflexion de la lumière et introduit la notion de centre de gravité. Son ouvrage *Les mécaniques* traite des machines simples et il y fait usage de la notion de moment.

Claude Ptolémée (100-170) est l'un des derniers et des plus puissants phares de la science grecque. Son œuvre représente une véritable encyclopédie du savoir de l'Antiquité. Dans l'*Almageste* (140) il présente sa conception de l'univers (système de Ptolémée), composé, selon lui, d'un ensemble de huit sphères – ou orbites – formant une structure en « pelures d'oignon » : au centre la Terre, puis la Lune, Mercure, Vénus, le Soleil, Mars, Jupiter, la dernière sphère est celle du firmament portant les étoiles fixes. L'ouvrage *Almageste* était admiré, car il permettait d'établir, à tout moment, les positions des cinq planètes visibles à l'œil nu, ainsi que celles du Soleil et de la Lune.

Le Moyen Âge

Bien que, comme l'a fait remarquer Joseph Pérès, il est difficile de parler de miracle grec et de nuit du Moyen Âge, cette dernière période n'a pas laissé de trace profonde dans la physique.

Ainsi l'époque romaine ne laisse aucun mathématicien, astronome ou physicien connu.

Au VII^e siècle, avec l'invasion arabe de l'Europe, la capitale intellectuelle du monde se déplace d'Alexandrie à Bagdad. En physique, on retient surtout l'œuvre d'Alhazen (965-1039) considéré comme le Ptolémée des Arabes. En optique, on lui doit le principe de la propagation rectiligne de la lumière, la loi générale de la réflexion (rayons incident et réfléchi sont dans un même plan), et une première approche géométrique de la loi de la réfraction.

Très peu de progrès scientifiques sont à signaler en Europe durant le Moyen Âge. Un timide réveil se produit au début du XIII^e siècle avec la naissance des universités (Bologne 1188, Oxford 1249, la Sorbonne 1257...). Le moine anglais Roger Bacon (1214-1294) s'intéresse à tous les champs du savoir, et en particulier à l'optique où on lui doit la découverte des foyers des miroirs concaves.

Jean Buridan (~1300-1358), né à Béthune vers 1300 devient recteur de l'Université de Paris en 1327. Son apport à la mécanique est important car il a fait, en particulier, un exposé systématique de la théorie de l'impetus, ainsi qu'un examen critique de ses conséquences sur la chute des corps, sur le rebondissement d'une bille, etc. L'impetus est une sorte de masse inerte active, elle préfigure en quelque sorte la notion d'inertie. On trouve dans les textes de Buridan des passages tels que : « Tandis que le moteur meut le mobile, il lui imprime un certain impetus » ou encore : « Plus un corps contient de matière, plus il peut recevoir de cet impetus... ».

Buridan est resté célèbre grâce à la parabole de l'âne, qui affirme qu'un âne, également affamé et assoiffé, se laisserait mourir plutôt que de choisir entre un seau d'eau et un picotin d'avoine. En fait si Buridan s'est effectivement intéressé aux questions de libre arbitre, on ne trouve pas trace (selon P. Duhem qui a étudié en détail les travaux de Buridan) de cette parabole dans ses écrits.

La renaissance

L'imprimerie fait son apparition en 1455 avec Gutenberg ce qui favorise la communication des idées et du savoir. Rassurés par des cartes, pourtant imparfaites, des aventuriers se lancent à la conquête du monde. C'est ainsi que Christophe Colomb découvre l'Amérique le 12 octobre 1492 en pensant aborder sur « les îles des Indes au-delà du Gange ».

Léonard de Vinci (1452-1519) est un esprit remarquablement universel. Célèbre peintre, il découvre par ailleurs la capillarité, invente le dynamo-

mètre, observe la résistance de l'air, conçoit des machines volantes... Il bouillonne, fait jaillir un torrent d'idées, mais comme le souligne René Dugas :

[En mécanique] il s'est attaqué à toutes sortes de problèmes, avec plus de foi souvent que de bonheur ; il revient fréquemment sur un même sujet, par des chemins les plus variés, sans scrupule de se contredire.

En mathématiques, Cardan (1501-1576) résout l'équation du troisième degré. En mécanique il utilise nettement la notion de moment.

À partir de cette époque l'histoire s'accélère : Copernic (1473-1543) fait figure de précurseur, il sera suivi de Gilbert (1540-1603), Tycho Brahé (1546-1601), Giordano Bruno (1548-1600), Galilée (1564-1642), Kepler (1571-1630), Mersenne (1588-1648), Descartes (1596-1650)... La physique sort enfin de sa « préhistoire » vers 1600.

2. COPERNIC, BRAHÉ ET BRUNO : LES MESSAGERS CÉLESTES

Comme le dit Poggendorff, si un seul avait pu fonder la physique, le titre en reviendrait à Galilée. Mais Galilée trouve un terrain fertile, et il le doit en particulier à trois messagers célestes : Nicolas Copernic, Tycho Brahé et Giordano Bruno.

Nicolas Copernic

Nicolas Copernic (1473-1543) naît le 19 février 1473 à Torun (Thorn), ville de Pologne comptant alors 20 000 habitants. Son père, un des plus gros négociants en cuivre de Cracovie est également conseiller du roi Casimir IV. Nicolas s'inscrit à l'Université de Cracovie où il suit les cours de mathématiques, philosophie aristotélicienne, astronomie, droit, latin et grec, avant de devenir étudiant en médecine. Médecin réputé, il est Chanoine de Frombork, en Warmie, occupe un appartement dans l'une des tours de la cathédrale où il y fera bâtir une petite tour abritant un observatoire. Il poursuit ses études à Bologne à partir de 1496 et c'est là qu'il fait sa première observation astronomique (l'étoile Aldébaran) le 9 mars 1497. Son œuvre majeure intitulée *De revolutionibus orbium coelestium* paraît l'année de sa mort en 1543 (on dit qu'une copie de l'ouvrage lui serait parvenue sur son lit de mort).

Le système de Copernic

Au système géocentriste de Ptolémée (dans lequel la Terre est le centre du monde), Copernic oppose le système héliocentriste, encore appelé système copernicien. Dans ce système, les six planètes (Mercure, Vénus, Terre, Mars, Jupiter et Saturne) se déplacent autour du Soleil :

Le Soleil repose au milieu de toutes choses, assis pour ainsi dire sur son trône royal, il gouverne la famille des astres qui tournent autour de lui.

Copernic fait l'hypothèse que le mouvement des planètes est circulaire (« il faut néanmoins reconnaître que leurs mouvements sont circulaires »), et que le mouvement de la Terre, lieu des observations, permet d'interpréter les irrégularités des mouvements des planètes comme n'étant qu'apparentes (« on voit donc que pour toutes ces raisons, le mouvement de la Terre apparaît plus probable que son immobilité [...]. Rien ne s'oppose à la mobilité de la Terre »). Quant à la Lune, Copernic annonce qu'elle tourne autour de la Terre.

Pour les premiers lecteurs de *De revolutionibus* seuls comptent les résultats des calculs des positions planétaires et pour eux la Terre reste le centre du monde. Il se passera un siècle avant que les travaux de Copernic ne soient repris par Galilée et Kepler.

Copernic étant chanoine doit, pour présenter son système, s'entourer de quelques précautions. En dédiant au pape Paul III ses travaux, il écrit :

J'ai pensé qu'on me permettrait facilement d'examiner si, en supposant le mouvement de la Terre, on pouvait trouver dans celui des corps célestes quelque chose de plus démonstratif.

L'audace de Copernic est sans doute facilitée par le fait qu'il ait eu des précurseurs dans l'antiquité, comme Philolaüs de Crotona, Nicéas de Syracuse ou Aristarque de Samos qui attribuaient à la Terre à la fois un mouvement diurne et un mouvement annuel. Ce n'est que plus de soixante dix ans après la mort de Copernic (1543), que la congrégation des cardinaux inquisiteurs condamnera officiellement ses écrits (5 mars 1616).

Tycho Brahé et ses observations astronomiques

Tycho Brahé (1546-1601) naît le 14 décembre 1546 en Skane (à l'époque au Danemark) et appartient, par sa famille, à la plus ancienne noblesse du royaume. Après des études à Copenhague et Leipzig il se passionne pour l'astronomie. Il fait édifier un grand observatoire, Uraniborg, dans l'île de Hveen en face de Copenhague, où il effectue les observations astronomiques les plus précises jamais réalisées avant l'invention de la lunette. Il perfectionne des instruments existants : quadrant, astrolabe... et en invente de nouveaux. On lui doit en particulier le sextant. Le 11 novembre 1572 il observe une étoile nouvelle (novae) dans la constellation de Cassiopée. Il montre qu'il s'agit bien d'une étoile qui est par conséquent située au-delà du système planétaire. Son observation entre en conflit avec le système d'Aristote pour lequel il ne peut y avoir ni lieu, ni durée au-delà de la huitième sphère céleste.

Tycho Brahé observe également des comètes (1577, 1582) et prouve que celles-ci ne sont pas des phénomènes atmosphériques, contrairement également à l'opinion admise depuis Aristote.

Brillant observateur, Kepler le surnommait le phénix des astronomes, Tycho Brahé est beaucoup moins inspiré comme théoricien. Il élabore une cosmologie hybride de celle de Ptolémée et de Copernic dans laquelle cinq planètes (Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne) sont en orbite autour du Soleil, celui-ci tournant autour de la Terre, elle-même immobile au centre du monde.

Giordano Bruno

Giordano Bruno (1548-1600) naît à Nola près de Naples où son père est un modeste homme d'armes. Après des études de théologie et de philosophie, il entre dans l'ordre des dominicains. Il se signale rapidement par son esprit contestataire, et, se sachant soupçonné d'hérésie, il doit quitter l'Italie. On le retrouve alors dans de nombreuses universités et cours princières à travers l'Europe (C'est ainsi par exemple qu'il enseigne au Collège de France). Son ouvrage le plus marquant est *Le banquet des cendres* où il y fait une apologie de Copernic (« On montre dans quelle mesure Copernic est digne de nos éloges ») et une critique d'Aristote. Il va au-delà de Copernic et déclare que :

la masse de l'univers est infinie et qu'il est vain de chercher le centre ou la circonférence du monde universel.

Il affirme ensuite que :

le ciel des fixes [le firmament et ses étoiles] n'est nullement un ciel où les corps que nous voyons briller seraient tous à la même distance du centre, certains au contraire semblent proches, qui sont plus distants l'un de l'autre qu'ils ne sauraient l'être l'un et l'autre du Soleil et de la Terre.

Il se met en danger en soutenant qu'il existe d'autres soleils et d'autres terres où la vie existe. Il aggrave son cas en niant la transsubstantiation (1), la virginité de Marie et la Trinité, et en recourant à des pratiques magiques. Après un procès qui dure sept ans, il est brûlé vif le 17 février 1600.

Contrairement à Galilée, G. Bruno n'a pas abjuré, et il dit devant ses juges le 21 décembre 1599 « je ne veux pas me repentir, et il n'y a pas à se repentir. Il n'y a pas de matière sur laquelle se repentir, et j'ignore sur quoi je dois me repentir ».

(1) Ce mystère correspond à la transformation, lors de la consécration de l'hostie, du pain et du vin en corps et en sang du Christ.

Vers le principe d'inertie

Giordano Bruno frôle le principe d'inertie. Il comprend que le mouvement de la Terre n'a pas plus d'effet observable sur les déplacements de ses habitants que le mouvement uniforme d'un navire n'en a sur ceux des objets se trouvant à l'intérieur d'une cabine. Il prend donc conscience que le mouvement n'existe que par rapport à un système mécanique et qu'un lieu (c'est-à-dire un point) peut appartenir à deux ou plusieurs systèmes sans préjuger du mouvement des objets qui s'y trouvent (*De l'infinito, l'universo e mondi*, 1584). Mais contrairement à Galilée, il ne pressent pas le pouvoir descriptif des mathématiques, et encore moins leur pouvoir opératoire, ce qui fera dire à Kepler « infortuné Giordano Bruno ».

3. GALILÉE ET LA NAISSANCE DE LA PHYSIQUE

Galilée comprend le pouvoir prédictif des mathématiques (« Ce livre est écrit dans la langue mathématique »), il est par ailleurs très fin observateur, multiplie les découvertes grâce à sa lunette, et est animé par le projet de construire une « science entièrement nouvelle ». Tous les ingrédients sont réunis pour faire de lui le père de la physique.

Galilée

Galileo Galilei (1564-1642) naît à Pise le 15 février 1564, trois jours après la mort de Michel-Ange, dans une famille de petite noblesse. Son père l'orienté vers des études de médecine, mais il ne les termine pas, préférant se diriger vers les mathématiques. En 1589 il est nommé professeur de mathématiques à Pise. À 19 ans il découvre l'isochronisme des pendules. Son élève et biographe (1) Viviani (1622-1663) indique :

il lui vint à l'esprit d'observer les mouvements d'une lampe écartée de la verticale, pour voir si, par hasard, les temps d'aller-retour de celle-ci n'étaient pas les mêmes pour les grands arcs, les arcs moyens et les petits.

En 1592 Galilée devient professeur de mathématiques à l'Université de Padoue et rédige un premier traité de mécanique *Del Motu* (qui ne sera publié que trois cents ans plus tard). De là datent ses recherches sur la chute des corps.

En 1609, il entreprend la construction de sa lunette et fait au début de 1610 une série de découvertes qu'il relate dans *Sidereus Nuncius*. Il prend soin de transmettre un exemplaire de son traité au Grand-Duc de Toscane, Cosme II de Medicis, et obtient peu de temps après le titre de « premier mathématicien et philosophe du Grand-Duc » ce qui lui permet de se consacrer à son projet de construction d'une « science entièrement nouvelle ».

(1) *Récit historique de la vie de Galilée*, Viviani, 1717.

Galilée entre au printemps 1611 à l'Accademia dei Lincei où il est admis par son fondateur Federico Cesi, Marchese di Monticelli. Il publie en 1612 son *Discours sur les corps flottants*, qui représente une importante contribution à l'hydrostatique, science qui sera plus tard perfectionnée par Pascal et Torricelli. Sa défense du système copernicien lui vaut quelques démêlés avec l'Église qui finalement met à l'index, le 5 mars 1616, l'œuvre de Copernic. L'apparition de trois comètes en 1618 relance le débat, et Galilée publie en 1623 *Il saggiatore* (l'essayeur) dans lequel il mène une réflexion extrêmement profonde et moderne sur la méthode de la science. Cet ouvrage, déjà remarquable, est suivi en février 1632 par la publication de la grande œuvre de Galilée, *Dialogue sur les deux principaux systèmes du monde*.

Cette récidive lui vaut de comparaître devant le tribunal de l'Inquisition à Rome où son procès débute le 12 avril 1633. Cette fois Galilée ne persiste pas, il dit lui-même :

Je suis ici pour me soumettre.

Le procès se termine le mercredi 22 juin 1633 par l'abjuration de Galilée qui doit déclarer à genou :

[...] voulant chasser de l'esprit de vos éminences et de tout chrétien fidèle, ce grave soupçon, justement conçu contre moi, d'un cœur pur et d'une foi sincère, j'abjure, je maudis et je déteste les erreurs et hérésies susdites et en général toute autre erreur ou hérésie contraire à la Sainte Église.

La légende, construite plus tard, veut qu'« au moment de se relever, agité par les remords d'avoir fait un faux serment, les yeux baissés vers la Terre, [on prétend qu'il dit, en la frappant du pied, *Eppur si muove* [et pourtant elle tourne] » (dictionnaire historique de 1789).

Il est condamné à la résidence surveillée et vivra désormais à Arcetri, près de Florence. Cela n'empêche toutefois pas son travail. En 1637, il perd la vue : « Galilée, votre cher ami et serviteur, est depuis un mois totalement et irrémédiablement aveugle » écrit-il à son ami Diodati. En 1639, il demande sa mise en liberté, mais le pape la lui refuse. Viviani (1622-1703), qui a alors 17 ans, lui sert de secrétaire, devient son élève et est l'un des premiers à pratiquer la nouvelle physique. Galilée accueille deux ans plus tard un second élève qui n'est autre que Evangelisto Torricelli (1608-1647).

Grâce à de puissants protecteurs (en particulier, en France, le Père Mersenne), Galilée publie en 1638 son dernier ouvrage *Discours et démonstrations mathématiques concernant deux nouvelles sciences touchant la mécanique et les mouvements locaux*. C'est dans ce livre que Galilée analyse le problème de la chute des corps en détail avec une précision qui montre qu'il a réalisé de nombreuses expériences. C'est grâce à ses expériences avec un plan incliné qu'il a pu faire ressortir les lois essentielles.