



La physique

UNE HISTOIRE MOUVEMENTÉE

C'est dans la Grèce Antique du ^{VI} siècle av. J.-C. qu'on situe la naissance de la physique classique, c'est-à-dire de l'idée qu'un phénomène naturel doit pouvoir s'expliquer par un raisonnement logique le liant à une cause naturelle – principe qui vaut encore dans la physique moderne. Mais c'est à

Aristote (384-322 av. J.-C.) qu'on reconnaît le mérite d'avoir posé les piliers méthodologiques de la physique. L'annexion

de la Grèce par les Romains, entre le ^I et le ^{II} siècle de notre ère, provoque la dispersion des connaissances consignées dans les livres par les savants grecs. Aussi, dès la fin du ^{VII} siècle, la nouvelle et florissante civilisation arabo-musulmane se saisit de ce savoir, l'assimile et le développe. Désormais, la science sera greco-arabe. Au ^{XII} siècle le centre intellectuel de la science initie son lent glissement vers l'Occident, mais la Renaissance européenne ne démarre qu'au ^{XV} siècle. Les Copernic, les Galilée, les Newton... les Einstein, seront les héritiers et les continuateurs de ce mouvement « intercivilisationnel » qui, aujourd'hui, est devenu planétaire.

NAISSANCE DE LA PHYSIQUE

LA SCIENCE GRECQUE

La « physique » des savants-philosophes grecs, avant Aristote, est une mosaïque de théories sur le monde et la nature desquelles se dégage déjà ce qui caractérisera la science de cette civilisation : la recherche de causes naturelles (par opposition aux interprétations surnaturelles). La physique grecque, qui est surtout affaire de réflexion à partir des observations mais sans confirmation expérimentale (la « méthode expérimentale » n'est pas encore à l'ordre du jour), possède une cohérence rationnelle et logique – grande nouveauté pour l'époque – qui marquera de son sceau la pensée scientifique moderne.

THÉORIE DE L'UNIVERS ET DE LA TERRE

Il s'agit surtout de décrire et d'expliquer l'organisation du monde (l'Univers). Par exemple, Thalès de Milet (640-562 av. J.-C.) voit la Terre comme un disque plat flottant dans un océan dont les effluves forment l'air. Anaximandre (611-545 av. J.-C.),

son disciple, innove en « mettant » la Terre au centre du monde et en faisant tourner tous les astres autour d'elle. Puis Anaxagore (499-428 av. J.-C.) émet l'hypothèse que les planètes (Lune incluse) sont des objets solides, comme la Terre, qui se déplacent dans l'espace. Vers 500 av. J.-C., Pythagore fonde son « école ». Pour lui et ses disciples, le mouvement des planètes et leur distance à la Terre répondent à une harmonie mathématique : ils les imaginent comme des corps fixés à des sphères concentriques tournantes sur la Terre.



Parménide, un disciple de Pythagore, va jusqu'à affirmer que la Terre est ronde, puisque la sphère est considérée

comme la plus parfaite figure géométrique. Plusieurs observations conforteront les astronomes grecs dans cette hypothèse.

THÉORIE DES ÉLÉMENTS

Pour les philosophes grecs, l'étude du cosmos inclut celle des phénomènes terrestres. Aussi, ils élaborent des théories sur la matière. Thalès pense que tout se crée à partir de l'eau qui entoure la Terre, aux propriétés quasiment magiques. Pour Anaximène (580-520 av. J.-C.), le principe premier est l'air, pour Xénophane (env. 560-470 av. J.-C.), c'est la terre. Héritier de ces théories, Empédocle (env. 490-430 av. J.-C.) établit la théorie des quatre éléments : la matière naît des combinaisons entre la terre,



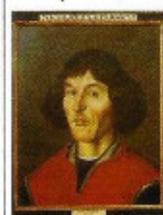
l'eau, l'air et le feu. Par ailleurs, vers 250 av. J.-C., **Archimède** publie son célèbre *Traité des corps flottants*, dans lequel il se penche sur les relations entre l'eau et les solides. Certaines de ses découvertes, comme le « principe d'Archimède », sont toujours utilisées.

ATOMISME

Démocrite, philosophe du ^{VI} siècle av. J.-C., fonde la théorie de l'atomisme. Fondée sur des prémisses purement philosophiques, elle dit que la matière est discontinuë, constituée d'éléments insécables, les « atomes », hors lesquels règne le vide. La variété des matières résulte non pas des différentes natures d'atomes, mais des arrangements que des atomes d'un seul type peuvent former.

LE « INTERLUDE » ROMAIN

Avec l'annexion de l'empire grec – qui s'achève entre le ^I et le ^{II} siècle de l'ère chrétienne –, les Romains héritent de tout le savoir hellène consigné dans les livres, qu'ils inventeront et recopieront scrupuleusement. Par ailleurs, les anciennes cités grecques, qui gardent leur autonomie, poursuivent l'activité scientifique. Parmi les savants de cette période, citons Claude Ptolémée (env. 90-168). Grec résidant en Alexandrie (Égypte), Ptolémée, conçoit le premier modèle « mécanique » de l'Univers. Centré sur la Terre (système « géocentrique »), il prétend décrire la trajectoire des astres à partir du seul mouvement circulaire uniforme. Comme, vue de la Terre, la trajectoire des planètes est complexe, le système de Ptolémée inclut des superpositions de mouvements circulaires qui compliquent le modèle. Quelques siècles plus tard, les savants arabes



tenteront de s'affranchir de ce système. Mais c'est seulement au ^{XVI} siècle, qu'un chanoine polonais, **Nicolas Copernic**, découvrira le « bon » modèle d'Univers, centré sur le Soleil.

LA SCIENCE ARABO-MUSULMANE

LA TRANSMISSION

Jusqu'au ^{VII} siècle, l'acquis grec se conservera mais évoluera peu. C'est la naissance d'un nouvel empire, l'empire arabe, qui marquera la « renaissance » de la science antique. La dynastie abbasside, qui règne à partir du ^{VII} siècle sur le monde musulman, possède un empire qui s'étend de l'Asie Centrale à l'actuel Maroc (le sud de l'Espagne est aux mains d'une autre dynastie musulmane : les Omeyyades). Occupant une partie de l'ancien empire romain, les Abbassides deviennent dépositaires des œuvres scientifiques grecques. Le Calife Hārūn Al-Rachīd (règne de 786 à 809) – que Les Mille et Une nuits ont immortalisé – déclenche, le premier, la dynamique de regroupement et de traduction des livres grecs en faisant construire une « Maison de la Sagesse », à Bagdad. Mais ce sera sous le règne de son fils, le Calife Al-Ma'mūn (règne de 813 à 833), que ce processus se systématisera. L'arabe devient la langue de la science (comme aujourd'hui,

l'anglais). L'effervescence scientifique arabe se maintiendra jusqu'au ^{XIII} siècle.

LES « PHYSICIENS » ARABES

Parmi les très nombreux savants arabes, citons les frères Banū Mūsā, qui furent mécènes et scientifiques, notamment dans les domaines de la mécanique et de l'astronomie ; l'astronome Thābit Ibn-Qurra (826-901), grand traducteur des œuvres grecques ; Al-Bīrūnī (973-1050), astronome et physicien, qui s'intéresse à la nature et la transmission de la lumière et de la chaleur ; Ibn Al-Haytham (965-1040), qui conteste le modèle cosmologique de Ptolémée (dans *Doutes sur Ptolémée*) et révolutionne la théorie de l'optique (dans *Optique*) en décrétant que c'est le rayon de lumière qui arrive à l'œil et non pas l'œil qui émet des rayons... Enfin, au ^{XIII} siècle, les astronomes musulmans de l'École de Maragha, en particulier Nasir al-Dīn al-Tūsī et Ibn al-Shātir, proposent des modèles cosmologiques alternatifs à ceux de Ptolémée. C'est sur les écrits arabes que les Européens bâtiront la science moderne.

LA RENAISSANCE EUROPÉENNE

L'ÉVEIL SCIENTIFIQUE DE L'EUROPE

Le processus de transmission des sciences greco-arabes qui s'accomplit au Moyen-Âge à des causes complexes. Globalement, on peut dire que l'essor économique et démographique de l'Europe à partir du ^{XII} siècle, la reconquête espagnole des terres andalouses en 1085 (aux mains de la dynastie musulmane des Omeyyades depuis trois siècles), les croisades... s'accompagnent d'un grand appétit de savoir. Il est comblé par la lecture des œuvres scientifiques et philosophiques que les Arabes font connaître aux Européens. Le démarrage des traductions arabolatines en 1130 et l'invention, entre les ^{XII} et le ^{XIII} siècles, de l'Université – lieu consacré par le pouvoir papal à la libre discussion des œuvres traduites – accélèrent le mouvement d'assimilation des nouveaux savoirs. Au milieu du ^{XIII} siècle, Saint-Thomas d'Aquin réussit le mariage de la religion avec les sciences et la philosophie greco-arabes, ce qui libère celles-ci du frein de l'Église. Les premières critiques émergent des Universités... La science s'apprête à renaitre.

LA RENAISSANCE

La renaissance intellectuelle de l'Europe – accompagnée d'un

décollage économique et technologique – s'accomplit entre les ^{XII} et le ^{XVI} siècles. À partir de ce moment, les différentes disciplines physiques (mécanique, électricité, magnétisme, optique, etc.) se mettent progressivement en place. La « méthode expérimentale » émerge et s'affine au cours des « controverses scientifiques » parfois violentes qui opposent les savants. Chaque siècle – jusqu'à aujourd'hui – verra son lot de révolutions théoriques et expérimentales. Bien que ce mouvement soit une œuvre collective, des personnages emblématiques jalonnent ses étapes.

L'ASTRONOMIE

Entre les ^{XII} et ^{XVI} siècles, l'astronomie connaît un essor théorique et technique. Le moine-philosophe Giordano Bruno (1548-1600) prône un Univers infini peuplé d'une multiplicité de mondes – ce



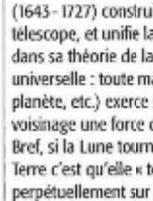
qui lui vaut d'être brûlé par l'Église. L'Allemand **Johannes Kepler** (1571-1630), copernicien convaincu, énonce les lois du mouvement des planètes :

- la trajectoire est non pas circulaire mais elliptique ;
- la vitesse de rotation n'est pas constante ;
- le carré de la période de rotation est proportionnel au cube de la distance.



Galilée (1564-1642) publie ses *Dialogues sur les deux principaux systèmes du monde* dans lequel il ruine

définitivement le système de Ptolémée (en faveur du système de Copernic), et invente la **lunette astronomique**. Enfin, Isaac Newton



(1643-1727) construit le premier télescope, et unifie la cosmologie dans sa théorie de la gravitation universelle : toute masse (pierre, planète, etc.) exerce sur son voisinage une force d'attraction. Bref, si la Lune tourne autour de la Terre c'est qu'elle « tombe » perpétuellement sur nous...

D'Archimède à Einstein

250 av. J.-C.
Principe d'Archimède.

^{IV} siècle
Ptolémée conçoit le premier modèle mécanique de l'Univers, centré sur la Terre (système géocentrique).

Début du ^{XVII} s.
Kepler énonce les lois du mouvement des planètes.

1543
Copernic découvre l'héliocentrisme : le Soleil est au centre de l'Univers.

1609
Galilée construit la première lunette astronomique.

^{XVII} siècle
Descartes fonde l'optique géométrique.

Fin du ^{XVII} s.
Théorie de la gravitation universelle par Newton.

1800
Volta conçoit la première pile électrique.

1896
Becquerel découvre la radioactivité.

1905
Théorie de la relativité restreinte énoncée par Einstein.

David Gross, David Politzer, Frank Wilczek, pour leurs travaux sur les quarks.

LA DYNAMIQUE : DE GALILÉE À NEWTON

Galilée est le fondateur de la « dynamique » moderne, dont il énonce les principes.

- Tous les corps, quelle que soit leur masse, chutent à la même vitesse (on néglige les frottements de l'air). Cette dernière est telle que la distance parcourue croît en raison du carré du temps — dès lors le temps devient un des paramètres du mouvement.
- Un corps qui n'est soumis à aucune contrainte est immobile ou en déplacement rectiligne uniforme.
- Les lois du mouvement sur un bateau en déplacement rectiligne uniforme (référentiel « galiléen ») sont les mêmes que sur la terre ferme. Ce principe s'accompagne d'une loi de « composition des vitesses », qui permet de décrire un même mouvement dans les deux référentiels.



Isaac Newton étend le troisième principe à tout l'Univers et en ajoute deux autres :

- l'accélération d'un corps est proportionnelle à la force qui s'exerce sur lui ;
 - les actions que deux corps en contact exercent l'un sur l'autre sont égales et opposées.
- Enfin, il intègre la loi de chute des corps dans sa théorie de la gravitation universelle : les forces qui s'exercent entre deux corps éloignés sont proportionnelles au produit de leur masse et inversement proportionnelles au carré de la distance.

LUMIÈRE ET OPTIQUE

La constitution de l'optique moderne est ponctuée par l'opposition entre ceux qui considèrent la lumière comme une onde (théorie ondulatoire) et ceux qui l'imaginent formée de particules (théorie corpusculaire). Au ^{xviii} siècle, Kepler établit les premiers principes (concept de « foyer » d'un faisceau lumineux, loi « approchée » de réfraction, etc.). Mais c'est **Descartes**



(1596-1650) qui fonde l'optique géométrique et définit la lumière comme propriété mécanique d'un « éther » incompressible qui remplit l'espace.

Il en déduit que sa propagation est instantanée. Pour Huygens (1629-1695), l'éther étant un fluide élastique, la lumière se propage à vitesse finie. Newton décompose la lumière blanche. Sous son autorité, la théorie corpusculaire s'impose jusqu'au début du ^{xix} siècle. Entre 1800 et 1820, Young (1773-1829), Arago (1786-1853) et surtout **Fresnel**



(1786-1827) démontrent sa nature ondulatoire par des expériences de diffraction et d'interférence. Maxwell (1831-1879) découvre la nature électromagnétique des ondes lumineuses.

Enfin, en 1905, Einstein (1879-1955) arrive à la synthèse en établissant la « dualité onde-corpuscule » de la lumière.

L'ÉLECTRICITÉ ET LE MAGNÉTISME

L'étude scientifique des phénomènes électriques et magnétiques, connus depuis des lustres, ne débute qu'à la fin du ^{xviii} siècle. C'est Coulomb (1736-1806) qui lance le mouvement en 1785, avec la mesure des forces d'attraction-répulsion entre charges électriques et entre aimants. Il découvre que ces forces s'atténuent en raison du carré de la distance. Avec Laplace (1749-1827) et Poisson (1781-1840) les quelques lois connues sur l'électricité et le



magnétisme statiques (forces, distribution de l'électricité sur les solides, etc.) acquièrent leur forme mathématique. En 1800, l'Italien Volta (1745-1827) conçoit la

première pile électrique, facilitant aux scientifiques l'étude du courant électrique. En 1820, le Danois (Ersted (1777-1851) fait le premier pas dans l'unification des deux disciplines en montrant qu'un courant électrique dévie l'aiguille d'un aimant. Entre 1820 et 1825, Ampère (1775-1836) met en lumière l'existence d'une force d'attraction-répulsion entre courants électriques. Il fonde par-là l'électrodynamique. Jusqu'à cette période, on considère les forces magnétique et électrique comme instantanées et à distance.

LA CHALEUR

On sait que les Grecs considéraient le chaud et le froid comme deux qualités distinctes. Vers 100 av. J.-C., Héron d'Alexandrie remarque la vertu motrice de la vapeur d'eau chaude et construit même un « moteur » (élémentaire). Mais l'étude de la chaleur démarre véritablement à la Renaissance. Dès le ^{xviii} siècle, l'idée que le chaud et le froid sont des manifestations d'un même phénomène s'affirme. Au ^{xviii} siècle, on commence à s'intéresser à la capacité de différents corps à emmagasiner la chaleur, à leur inertie thermique et aux changements d'état (fusion, vaporisation, etc.). On se demande si la chaleur est une matière en soi, un « fluide calorique », ou un état particulier de la matière lié à l'agitation des molécules : à l'orée du ^{xix} siècle, les deux écoles s'opposent. Le premier à élaborer une analyse mathématique de la chaleur est Joseph Fourier (1768-1830) : il étudie sa propagation dans les corps solides établit les équations différentielles de son mouvement. Mais il faudra attendre l'avènement de la thermodynamique pour voir apparaître une théorie globale.

LA PHYSIQUE MODERNE

LA THERMODYNAMIQUE

Avec le développement industriel de la machine à vapeur, au ^{xix} siècle, on se demande si l'on peut construire un moteur à rendement parfait, et

réutiliser « perpétuellement » une quantité finie de chaleur. La thermodynamique apportera une réponse négative à ces deux questions. En 1824, Sadi Carnot (1796-1832) publie une étude sur la perte de qualité de la chaleur utilisée pour produire du travail mécanique. En 1842, le médecin Allemand J. Mayer (1814-1878) formule l'équivalence : chaleur = travail. Reprenant ces travaux, l'Allemand R. Clausius (1822-1888) aboutit en 1850 à une théorie complète reposant sur deux principes : le premier exprime la propriété de conservation de l'énergie lors d'une transformation dans un système isolé ; le second introduit le concept d'entropie comme mesure de la dégradation de qualité de l'énergie et établit que dans un système isolé, l'entropie ne peut qu'augmenter (l'énergie se dégrade). En 1872, **Ludwig Boltzmann** (1844-1906) lie



les propriétés macroscopiques de la matière (chaleur, pression, etc.) au comportement mécanique des particules, ouvrant à une interprétation statistique des principes thermodynamiques. Dès lors, cette science ne cessera d'étendre son domaine, jusqu'à devenir une véritable « métathéorie » de la physique.

L'ÉLECTROMAGNÉTISME



Le ^{xix} siècle voit l'unification de l'électricité et du magnétisme. En 1845, **M. Faraday** (1791-1867) introduit le concept de « champ » (électrique et magnétique), remplaçant l'idée classique d'une force instantanée à distance par celle d'une répartition dans l'espace de « **lignes de forces** »

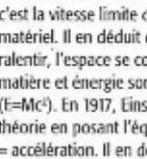


(matérialisées par la limaille de fer). Dans le même mouvement, W. Thomson (1824-1907), futur Lord Kelvin, associe la force magnétique à des tourbillons se propageant de proche en proche. C'est J. C. Maxwell (1831-1879), inspiré par les concepts de Faraday et Thomson, qui accomplit l'unification : en 1868, il établit les 4 lois fondamentales de l'électromagnétisme. La première lie le champ électrique (E) à la charge électrique ; la seconde montre que la variation d'un champ magnétique (B) crée un champ E ; la troisième établit les caractéristiques du champ B ; la quatrième montre que la variation d'un champ E engendre un champ B, et relie E et B à la lumière. De ces lois émerge une nouvelle réalité : la lumière est un phénomène électromagnétique. En 1888, H. Hertz (1857-1894) démontre la justesse de la théorie en produisant des ondes électromagnétiques par l'oscillation d'un champ E. Les ondes hertziennes sont nées.

LE ^{XX} SIÈCLE

RELATIVITÉ RESTREINTE ET GÉNÉRALE

À l'orée du ^{xx} siècle, la mécanique newtonienne et l'électromagnétisme manifestent de graves incompatibilités. La première impose le respect du principe de composition des vitesses (pour les mouvements rectilignes uniformes) : si un observateur A voit un objet se déplacer à la vitesse V, un observateur B animé d'une vitesse V' par rapport à A verra ce même objet se déplacer à la vitesse V-V'. Mais les ondes électromagnétiques (la lumière) semblent déroger à ce principe : une expérience effectuée en 1887 par Michelson et Morley montre que la vitesse de la lumière (c) est constante pour tout observateur. Cet « étrange » résultat pose une énigme. En 1905, le jeune **Albert Einstein** résout le problème en révolutionnant la physique. En substance, sa théorie de la relativité restreinte dit que

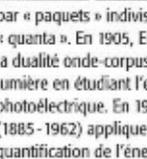


c'est la vitesse limite de tout objet matériel. Il en déduit que le temps peut ralentir, l'espace se contracter, et que matière et énergie sont équivalentes (E=Mc²). En 1917, Einstein généralise sa théorie en posant l'équivalence : masse = accélération. Il en déduit que l'espace et le temps peuvent se « courber » sous l'influence de la matière-énergie : la gravitation n'apparaît plus que comme un épiphénomène de la courbure spatio-temporelle.

CONSTITUTION

DE LA PHYSIQUE QUANTIQUE

En 1900, **Max Planck** (1858-1947), qui étudie le rayonnement émis par des objets chauffés (expérience du « corps noir »), découvre que l'énergie échangée entre la matière et le rayonnement se fait non pas de manière continue mais par « paquets » indivisibles, les « quanta ». En 1905, Einstein découvre la dualité onde-corpuscule de la lumière en étudiant l'effet photoélectrique. En 1913, Niels Bohr (1885-1962) applique le principe de quantification de l'énergie au modèle atomique développé par Ernest Rutherford en 1910. En 1924, Louis de Broglie (1892-1987) étend à toute la matière le principe de dualité onde-corpuscule... Une théorie unitaire s'apprête à éclore. En 1925, **Erwin Schrödinger** (1887-1961) pose



l'équation de propagation des ondes associées aux particules. La même année, W. Heisenberg (1901-1976) établit un formalisme abstrait rendant compte du comportement des ondes-corpuscules. Et en 1926, Schrödinger démontre l'équivalence entre son interprétation et celle d'Heisenberg. La physique



quantique est constituée. Elle recevra d'édifiantes confirmations, notamment en 1981 avec la preuve de « non-séparabilité » fournie par A. Aspect, de l'université d'Orsay.

quantique est constituée. Elle recevra d'édifiantes confirmations, notamment en 1981 avec la preuve de « non-séparabilité » fournie par A. Aspect, de l'université d'Orsay.

LA RADIOACTIVITÉ

En 1896, H. Becquerel (1852-1908) découvre accidentellement que les sels d'uranium émettent spontanément des rayonnements. En 1898, Pierre (1859-1906) et Marie (1867-1934) Curie isolent le polonium et le radium. Ils étudient les lois régissant ces radiations et nomment le phénomène : « radioactivité ». En 1899, E. Rutherford (1871-1937) identifie deux autres types de rayons émis : les α (noyaux d'hélium) et les β (électrons). En 1902, Rutherford et F. Soddy (1877-1956) découvrent le phénomène de « transmutation » radioactive : par l'émission de rayons α et β , un atome se transforme en un autre. Dans les années 1910, on montre qu'un même élément chimique peut avoir de nombreux « isotopes » dont certains sont instables (ils se transmutent). En 1934, **Irène** (1897-1956) et **Frédéric** (1904-1958) **Joliot-Curie** découvrent



la radioactivité artificielle : un élément stable, comme l'aluminium, peut devenir radioactif après bombardement par des particules α . Ils mettent en évidence de nouveaux rayons : les β (neutrons). En 1938-39, O. Hahn (1879-1968) et L. Meitner (1878-1968) découvrent la fission (séparation en deux) de l'uranium et F. Joliot-Curie envisage la possibilité de réactions nucléaires (fission) en chaîne qu'Enrico Fermi (1901-1954) réalise en 1942.

COSMOLOGIE ET BIG BANG

La théorie de la relativité autorisant différents modèles d'Univers, la question était de savoir, en cette première moitié du ^{xx} siècle, lequel s'appliquait au nôtre. Einstein, lui, croyait à la nature statique et immuable du Cosmos. Mais en 1922, le Russe Friedmann (1888-1925) montre que certaines solutions des équations de la relativité conduisent à des modèles d'Univers en expansion. Ce que confirme en 1929, Hubble (1889-1953), qui observe que les galaxies s'éloignent les unes des autres. En 1927, Lemaitre comprend que si l'Univers gonfle, cela signifie que plus on remonte dans le passé, plus il rapetisse... Jusqu'à devenir ponctuel. Ce modèle d'un Univers né d'une « singularité » spatio-temporelle sera nommée « big bang » (on estime aujourd'hui qu'il s'est produit il y a 14 milliards d'années). Vers 1948, Gamow (1904-1968) et ses collègues établissent un scénario possible pour la synthèse des éléments chimiques dans le modèle de Lemaitre, que Hoyle (1915-2001) modifie et affine dix ans plus tard. Gamow prédit l'existence dans tout l'Univers d'un rayonnement « fossile » issu du big bang que deux physiciens, Penzias et Wilson, détectent en 1963. Dès lors, le modèle du big bang s'impose.