

Isabelle Ricard

# UNE PETITE HISTOIRE DE LA PHYSIQUE



UNE PETITE HISTOIRE  
DE LA  
**PHYSIQUE**

Isabelle RICARD



La 1<sup>re</sup> édition de cet ouvrage est parue en 2001 dans la collection *L'esprit des sciences*.

**Conception graphique couverture :** Nathalie FOULLOY

**Conception graphique intérieur et mise en pages :** Charline PINTO

**ISBN 9782340-088979**

© Ellipses Édition Marketing S.A., 2024

8/10 rue la Quintinie 75015 Paris

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5.2° et 3°a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

[www.editions-ellipses.fr](http://www.editions-ellipses.fr)

*Pour Clémence, Héloïse, Pierre-Louis,  
et aussi pour Andrea, Baptiste, Eliott, Enzo, Hippolyte et Julien.*

## Avant-propos

Des générations d'hommes et de femmes ont cherché à comprendre comment fonctionnait l'Univers dans lequel ils vivaient. Dans cette quête, certains sont parvenus à progresser et c'est leur curiosité qui a façonné l'image que nous avons de notre monde. La physique, cette science qu'ils ont construite au cours des siècles, est omniprésente dans notre vie. Nous n'en sommes peut-être pas tous conscients, mais elle constitue un héritage culturel que chacun d'entre nous est susceptible de diffuser et la science est désormais objet de culture autant que de savoir.

Ceux qui, au cours de leurs études, n'ont vu dans la physique qu'une succession de calculs fastidieux et incompréhensibles doutent probablement de leur capacité à transmettre une science dont ils se croient si éloignés. Pourtant, ils possèdent, parfois à leur insu, un nombre impressionnant de connaissances dans ce domaine et les exemples ci-après aideront peut-être à les convaincre.

Lorsque, pour expliquer la chute d'une pomme sur le sol, nous évoquons l'attraction que notre Terre exerce sur celle-ci, nous utilisons, implicitement, un résultat que Newton a énoncé à la fin du XVII<sup>e</sup> siècle. D'ailleurs, nos références en physique ne se limitent pas au seul domaine de la mécanique : nous possédons tous des notions d'électromagnétisme, d'optique et même de physique atomique. Le seul fait d'employer les termes d'infrarouge et d'ultraviolet ou d'admettre la présence de ces derniers dans le rayonnement solaire le prouve. Ces mots font aujourd'hui partie du langage courant. Il faut pourtant savoir que ce n'est qu'en 1800 qu'a été découvert par William Herschel le rayonnement invisible situé au-delà du rouge, que l'on n'appelait pas encore infrarouge, et que les expériences de Johann Wilhelm Ritter pour envisager l'existence des ultraviolets ne datent que de l'année suivante. Nous avons donc hérité, dans ce domaine, de connaissances apparues au XIX<sup>e</sup> siècle. De même, nous savons tous que la matière est composée d'atomes et que

le noyau de certains d'entre eux peut donner lieu à des désintégrations radioactives. Or, l'existence même de l'atome était encore source de polémiques à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle...

S'il était possible de remonter le temps, chacun d'entre nous serait capable de faire des suggestions aux physiciens de l'époque visitée pour les aider à avancer. Les idées que nous proposerions seraient probablement révolutionnaires pour les physiciens d'alors.

Nos connaissances dans le domaine de la physique sont le fruit du travail des générations qui nous ont précédés. Cet héritage est donc particulièrement précieux. Les idées des physiciens ont été inlassablement remises en cause puis elles sont parvenues jusqu'à nous. Le but de cet ouvrage est de les présenter sous leur éclairage historique.

Bien que ce livre constitue une histoire de la physique, il ne se présente pas sous la forme d'une chronologie. Nous avons en effet préféré distinguer les branches majeures qui ont constitué cette science jusqu'à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle. Nous nous intéresserons donc successivement à l'évolution de la mécanique et de l'astronomie, de la thermodynamique, de l'électromagnétisme et de l'optique. Nous verrons aussi comment certains domaines, qui sont longtemps restés autonomes, ont été peu à peu intégrés aux quatre branches précédemment citées.

À partir du XX<sup>e</sup> siècle, la segmentation de la physique moderne en domaines indépendants les uns des autres n'a plus la force d'une évidence. Cette période, dite moderne, que nous ferons débuter en 1895, se caractérise, en effet, par l'émergence de deux théories révolutionnaires majeures : la physique quantique et la relativité. Ces théories ont, toutes deux, bouleversé totalement la pensée de leur temps et nous verrons quelles questions ont été à l'origine de leur élaboration. L'introduction en physique de la notion de probabilité, celle d'espace-temps à quatre dimensions constituent une révolution intellectuelle d'une importance comparable à celle qui, après Copernic, a appris aux hommes que leur Terre n'était pas le centre du monde. Dans ce dernier chapitre nous évoquerons également les axes de recherche actuels : ces derniers constituent pour la physique son actualité.

Il est probablement plus facile de vulgariser les applications pratiques d'une théorie plutôt que la théorie même. Pour autant, ce livre n'est en rien une histoire des techniques et même si certaines retombées pratiques

pourront y être évoquées, c'est à la physique théorique et à son histoire que celui-ci est consacré.

Compte tenu des confusions possibles dans l'esprit des lecteurs entre physique théorique et applications, mais aussi, pour certains d'entre eux, entre physique théorique et mathématiques, nous proposerons, dans les prochaines pages, un chapitre destiné à éclaircir ces notions.

Une première version du présent livre a déjà fait l'objet d'une publication chez le même éditeur dans le cadre d'une collection d'ouvrages thématiques de vulgarisation scientifique. Cette seconde édition, qui cible un objectif de culture scientifique au sens large, ne contient quasiment plus de formules mathématiques ; de plus, les découvertes récentes faites dans le domaine de la physique y seront exposées. Ces avancées ont, en effet, été nombreuses au cours de la dernière décennie : en juillet 2012, deux équipes de recherche ont annoncé la détection du Boson de Higgs au sein du L.H.C (le grand collisionneur de hadrons du CERN à Genève) ; des ondes gravitationnelles, dont l'existence avait été prédicta par Einstein en 1916, ont été détectées par l'observatoire américain LIGO pour la première fois en 2015 ; depuis le 20 mai 2019, le bureau international des poids et mesures a proposé de nouvelles définitions pour certaines unités du système international (dont le kilogramme, l'ampère et le kelvin) et les découvertes se succèdent au gré des publications scientifiques.

L'histoire de la physique est en train de s'écrire sous nos yeux...

# Table des matières

## Avant-propos

### Qu'est-ce que la physique ?

- La science de la Nature
- Une science expérimentale
- De l'expérience aux lois
- Physique théorique et physique appliquée
- Physique et mathématiques

### La mécanique « classique »

- L'Antiquité
- Des Grecs à Galilée : du Moyen-Âge à la renaissance des sciences physiques
- Des avancées prodigieuses : XVI<sup>e</sup> et XVII<sup>e</sup> siècles
- Newton
- Héritage de Newton et nouveaux concepts

### La thermodynamique : des origines à nos jours

- Température, thermométrie
- Température, chaleur et énergie
- Le premier principe de la thermodynamique
- Moteurs thermiques et deuxième principe
- Irréversibilité et entropie
- La température absolue
- La thermodynamique statistique
- La thermodynamique après Boltzmann

### L'électromagnétisme

- Les origines
- Premières théories
- D'Oersted à la naissance de l'électromagnétisme

L'induction électromagnétique

La théorie électromagnétique – L'œuvre de Maxwell et Hertz

## **L'optique**

Les origines

Le XVII<sup>e</sup> siècle : Kepler, Descartes, Fermat

Ondulatoire ou corpusculaire ?

Le triomphe de l'optique ondulatoire : Fresnel

## **La physique « moderne »**

Les atomes

La radioactivité

Quanta et discontinuités

Naissance de la mécanique quantique

Célérité de la lumière et relativité restreinte

Masse, gravitation et relativité générale

Vers l'infiniment petit : le modèle standard de la physique des particules

L'antimatière

## **Perspectives : la physique à toutes les échelles**

## **Références et conseils de lecture**

## **Annexe. Plus de 120 ans de prix Nobel de physique**

# Qu'est-ce que la physique ?

## La science de la Nature

En grec « *phusis* » signifie « Nature ».

Si l'on se réfère à l'étymologie, la physique se définit donc comme la science des phénomènes naturels : le physicien ou la physicienne est celui ou celle qui étudie, par exemple, le mouvement des astres ou la propagation des ondes ou encore la matière dans ses moindres détails. Bien que la vie constitue un phénomène naturel, le domaine du vivant échappe toutefois à son domaine de compétences. En effet, au fil des siècles, les sciences de la vie et les sciences de la matière se sont peu à peu distinguées l'une de l'autre. Certes, certains domaines actuels, comme la biophysique, rapprochent les physiciens des biologistes, mais leurs domaines d'investigation restent malgré tout bien distincts.

Alors que reste-t-il à la physique ?

Un champ d'étude colossal, passionnant et terriblement ambitieux comme nous tâcherons de le montrer tout au long de cet ouvrage. Il suffit d'ailleurs d'énumérer les domaines qu'elle recouvre pour s'en convaincre : la recherche des origines de l'Univers, l'exploration du monde microscopique, l'analyse du mouvement des planètes, l'étude de la lumière ont suscité l'intérêt de générations de physiciens.

Depuis Archimède (287 av. J.-C., 212 av. J.-C.) jusqu'à Einstein (1879-1955), les hommes et les femmes qui ont bâti notre physique partageaient la même curiosité exacerbée : ils souhaitaient comprendre le monde qui les entourait.

Les mots du physicien Louis de Broglie (1892-1987) résument parfaitement cette quête :

Chaque fois que l'esprit humain, au prix des plus grands efforts, est parvenu à déchiffrer une page du livre de la Nature, il s'est tout de suite aperçu combien plus difficile il serait de déchiffrer la page suivante ; néanmoins, un instinct

profond l'empêche de se décourager et le pousse à renouveler ses efforts pour progresser encore plus avant dans la connaissance.

Il est vrai que la tâche du physicien semble vraiment sans fin. En physique, les idées sont loin d'être figées puisqu'elles sont inlassablement remises en cause et réexamинées. De fait, une théorie est susceptible d'être ébranlée chaque fois qu'elle a des difficultés pour expliquer un fait nouveau. Nous verrons, dans cet ouvrage, comment la mécanique de Newton a été doublement remise en cause au XX<sup>e</sup> siècle lorsque sont apparues la physique quantique et la relativité. Pour autant, nous constaterons aussi que, malgré tout, lorsqu'une pomme tombe d'un arbre il est toujours possible d'utiliser les lois de Newton pour décrire son mouvement ! Ainsi, il arrive que les nouvelles théories ne se substituent pas totalement aux anciennes mais qu'elles limitent simplement leur domaine d'application.

La physique est donc une science vivante, faite de bouleversements successifs. Rien n'exclut que l'avenir ne réserve aux prochaines générations des révélations totalement imprévisibles dans l'état actuel de nos connaissances scientifiques.

Dans cette optique, il est légitime de partager l'espoir du physicien des particules Emilio Segrè (1905-1989) qui, en 1959, déclarait :

Je ne crois pas que Galilée, Einstein ou Newton aient été les derniers de leur espèce.

## Une science expérimentale

La vraie physique a été fondée le jour où Galilée a conçu l'idée non seulement d'interroger la nature par l'expérience (...) mais de préciser la forme générale à donner aux expériences en leur assignant pour objet immédiat la mesure de tout ce qui peut être mesurable dans les phénomènes naturels.

Par ces mots, le mathématicien et philosophe Antoine Augustin Cournot (1801-1877) soulignait l'importance de l'expérience en physique et la distinguait de la simple observation. On a souvent dit que, contrairement à l'observateur qui se contente d'écouter la Nature, celui qui expérimente va plus loin puisqu'il l'interroge. Pour cela, il va tenter de fixer au

préalable les conditions dans lesquelles il souhaite travailler puis il effectuera ses mesures. Dans le cas où cela n'est pas réalisable, le terme même d'expérience peut prendre un sens légèrement différent.

Prenons l'exemple de l'astronomie ou de l'astrophysique : dans ce domaine, expérimenter c'est observer et mesurer, avec les instruments adéquats, mais, bien évidemment, sans pouvoir agir sur l'astre ou les astres à étudier. L'observateur doit s'efforcer de trouver les conditions idéales, ce qui est loin d'être toujours facile. Pour s'en convaincre, il suffit de se souvenir que, pendant des siècles, le seul moyen dont l'astronome disposait pour étudier la couronne solaire était d'observer le Soleil au cours des éclipses totales. Non seulement cela limitait la durée pendant laquelle il était possible de collecter des données, mais ces expériences étaient particulièrement tributaires des conditions atmosphériques. Certes, la mise en orbite, en 1995, du satellite SOHO (SOlar and Heliospheric Observatory) a permis, pendant près de trente ans, d'observer des cycles solaires et de réaliser des éclipses artificielles à volonté, mais la mise en œuvre d'un tel projet a nécessité la réunion de moyens financiers et humains colossaux, comme c'est le cas aussi dans le domaine de la physique des particules. De manière générale, la reproductibilité des expériences est particulièrement difficile à assurer lorsqu'il s'agit d'observer des astres et l'astrophysicien ne choisit pas toujours quand et où vont se produire les phénomènes qu'il espère mettre en évidence.

D'autres branches de la physique sont moins concernées par ce type de problèmes : il est possible d'y définir et d'y maîtriser les conditions expérimentales choisies. Pour autant, toute expérience n'est pas facile à mettre en œuvre et de nombreux obstacles sont susceptibles de s'élever au cours de la réalisation de celle-ci. La mesure étant au centre de la problématique expérimentale, la question des instruments de mesure et de leur performance se pose inévitablement. Prenons l'exemple de Galilée (1564-1642) qui révolutionna l'astronomie.

Ce physicien était incontestablement visionnaire et exceptionnel dans sa clairvoyance et sa démarche, mais, sans sa lunette astronomique, son génie n'aurait pas suffi pour qu'il réalise son œuvre. C'est, en effet, cette lunette qu'il construisit lui-même (les premiers modèles étant apparus

quelques années plus tôt aux Pays-Bas) qui lui permit d'« interroger » la Nature et de comprendre le mouvement des astres de notre système solaire.

Sans cet instrument, il n'aurait pu mener à bien son travail.

Disposer d'instruments de mesures adéquats est fondamental. Cela est particulièrement vrai depuis une soixantaine d'années où certaines expériences, notamment en physique des particules, exigent des moyens énormes. Les accélérateurs de particules s'étendent ainsi sur plusieurs dizaines de kilomètres et les infrastructures nécessaires pour les faire fonctionner sont colossales et sont très onéreuses. Cela implique souvent la collaboration de plusieurs nations sur un projet commun. Dans de nombreux domaines de la physique, l'ère du laboratoire isolé et des expériences artisanales est donc bel et bien révolue.

Nous venons de voir quelques-uns des obstacles que le physicien peut rencontrer dans la démarche expérimentale, mais, parfois, la principale difficulté d'une expérience ne réside ni dans sa faisabilité ni dans sa réalisation. Le plus délicat, avant toute entreprise expérimentale, c'est de s'affranchir de tout préjugé, autrement dit d'oublier le type de résultat que l'on espère obtenir. Sans cette dernière condition, tout le travail effectué pourrait s'avérer inutile pour que les résultats soient correctement interprétés. Un exemple classique de l'histoire de la physique illustre particulièrement cela. Au XIX<sup>e</sup> siècle, c'est à dire à une époque où l'on croyait que la lumière se propageait dans un milieu absolument immobile baptisé « éther », plusieurs physiciens avaient envisagé de mesurer, à l'aide d'expériences d'optique, la vitesse de la Terre par rapport à cet éther. L'expérience d'Albert Abraham Michelson (1852-1931), réalisée en 1881, était la plus précise de toutes mais elle ne permit pas de déceler un quelconque mouvement de l'éther par rapport à la Terre. Cette expérience fut renouvelée en 1887, en équipe, avec Edward Morley (1838-1923) et, à chaque tentative, la vitesse trouvée était nulle. Plusieurs explications furent proposées au cours de la décennie suivante mais aucune d'entre elles ne convint. Et pour cause : comme l'a montré Albert Einstein dans le cadre de sa théorie de la relativité restreinte, aucun milieu matériel n'est absolument immobile et, par conséquent, l'éther n'existe pas ! Ainsi, a-t-il fallu attendre 1905 pour comprendre l'échec apparent de cette expérience... Nous voyons sur cet exemple que les préjugés et présupposés

constituent probablement le plus grand des obstacles. Ils sont susceptibles d'entraver ou de compromettre une découverte : une expérience réussie ne suffit pas ; il faut aussi être capable de l'interpréter.

## De l'expérience aux lois

L'interprétation d'une expérience est probablement l'étape la plus difficile du travail d'une physicienne ou d'un physicien. N'oublions pas, en effet, que ce qui guide les scientifiques, c'est la certitude que notre monde peut être compris et qu'il est possible de transcrire son fonctionnement sous forme de lois. En effet, comme le disait Albert Einstein :

Il est certain que la conviction – apparentée au sentiment religieux – que le monde est rationnel, ou au moins intelligible, est à la base de tout travail scientifique un peu élaboré.

Le rôle de l'expérience se situe donc à plusieurs niveaux et ses liens avec la théorie sont de nature assez complexe. De façon générale, il convient de se rappeler qu'une expérience ne constitue pas une démonstration : elle ne peut en aucun cas suffire pour justifier une loi. Tout au plus interviendra-t-elle pour confirmer des résultats prévus dans le cadre d'une théorie. À ce titre, le rôle de l'expérience-confirmation n'est pas du même ordre selon qu'il s'agit de vérifier une loi admise par tous ou de valider une théorie nouvelle. Ainsi, lorsqu'un cours de physique débute par une expérience, l'intérêt de cette dernière est essentiellement d'ordre pédagogique. Il en va tout autrement lorsqu'il s'agit de corroborer par l'expérience une théorie qui est encore jugée révolutionnaire. Dans ce cas, l'expérience est là pour conforter la validité de la théorie et son succès pourra permettre de convaincre certains esprits sceptiques. Au début du XX<sup>e</sup> siècle, la relativité générale, dont Einstein avait publié les lois en 1916, eut ainsi recours à une preuve expérimentale capitale. Nous aurons l'occasion dans ce livre d'évoquer plus en détail ce chapitre important de l'histoire des sciences. À cette époque, la relativité générale, qui redéfinissait totalement les notions classiques d'espace et de temps et qui supposait l'existence d'un espace-temps à quatre dimensions, était relativement mal acceptée : de nombreux scientifiques avaient des doutes quant à sa pertinence. Une preuve expérimentale était attendue pour convaincre ses détracteurs. C'est l'Anglais Arthur Stanley Eddington

(1882-1944) qui a pu la fournir en observant, le 29 mai 1919, dans le Golfe de Guinée, au cours d'une éclipse totale, une étoile située derrière le Soleil. Si cette étoile était visible bien qu'elle fût cachée par notre astre, c'est parce que, comme l'avait prévu Einstein, la lumière qu'elle émettait était effectivement déviée par le Soleil, qui était un corps suffisamment massif pour incurver la trajectoire des rayons lumineux. Grâce à cette expérience, Eddington a vérifié expérimentalement ce qui, jusque-là, n'était qu'une théorie très peu intuitive et assez mal diffusée. En 1919, Einstein était déjà célèbre, mais on peut dire que ce succès expérimental a encore accru sa notoriété. Cet exemple montre comment une expérience peut légitimer une théorie nouvelle et lui permettre d'être acceptée et reconnue du grand public.

En 1919, le but d'Eddington était de confirmer une déduction élaborée dans le cadre d'une théorie. Mais il peut arriver que la place de l'expérience en physique se situe avant la formulation d'une loi. C'est alors par tâtonnements, puis par induction, que le physicien progresse vers la formulation de nouvelles hypothèses, et, comme l'a écrit le philosophe et chimiste anglais Joseph Priestley (1733-1804) :

Des théories même imparfaites suffisent à suggérer des expériences qui viennent corriger leurs imperfections et donnent naissance à d'autres théories plus parfaites.

L'expérience constitue l'un des grands moyens dont les physiciens disposent pour progresser. Son pouvoir est tel qu'elle est même capable de remettre totalement en cause une théorie. Il suffit, en effet, d'un unique contre-exemple expérimental, d'un seul fait que l'on est incapable de justifier pour que tout l'édifice vacille et que cette dernière s'effondre.

## Physique théorique et physique appliquée

De nos jours, les sciences physiques manient des notions de plus en plus abstraites qui sont parfois mal connues du grand public. Leurs applications, en revanche, sont largement médiatisées puis finissent par faire partie de la vie quotidienne de chacun. Certes, la frontière entre physique et technologie est quelque peu poreuse ; pour autant, ces deux domaines se distinguent grandement : les retombées pratiques ne sont pas la préoccupation principale du physicien théorique dont le but est seulement la connaissance du monde qui l'entoure

Aussi, même si les applications de la physique théorique surprennent souvent par leur portée, il ne faut pas oublier que les applications ne sont pas, *a priori*, ce qui motive les physiciennes et les physiciens théoriques. Par exemple, les chercheurs ne se sont pas initialement intéressés aux semi-conducteurs pour fabriquer des diodes et des transistors : ce qu'ils souhaitaient, au départ, c'était comprendre pourquoi ces corps étaient si spécifiques quant à leurs propriétés électriques. Les applications des semi-conducteurs sont arrivées ultérieurement, et ce n'est que dans un second temps qu'ils ont permis le développement de l'électronique. C'est en ce sens que la physique théorique intéresse aussi l'industrie...

## Physique et mathématiques

Nous évoquerons, enfin, les liens étroits qu'entretient la physique théorique avec les mathématiques. Ils sont assurément tout aussi forts que ceux qu'elle a tissés avec la physique dite « appliquée », mais leur nature est beaucoup plus complexe.

Remarquons, tout d'abord, que le fait que les mathématiques fonctionnent lorsqu'on les applique à la physique ne constitue pas une évidence : la physique étudie la Nature, et, par conséquent, le monde réel, alors que les mathématiques sont le fruit de recherches abstraites basées sur l'utilisation d'un formalisme particulier. Le physicien allemand Werner Karl Heisenberg (1901-1976) écrivait d'ailleurs à ce sujet :

L'idée que les mathématiques puissent en quelque sorte s'adapter à des objets de notre expérience me semble remarquable et passionnante.

Il est, effectivement, légitime de s'étonner que la physique emploie autant de mathématiques et que ces dernières soient utilisables dans le cadre de cette science expérimentale.

Les dérivées, les vecteurs, les matrices sont l'œuvre des mathématiciens. Mais qui pourrait envisager aujourd'hui de mener des travaux de physique sans utiliser ces outils ? Dès lors, faut-il considérer les mathématiques comme un langage grâce auquel s'exprimeraient les lois de la physique ? Cette opinion a notamment été défendue par Galilée qui estimait que la Nature, elle-même, était « écrite en langue mathématique ». D'autres physiciens n'allaien pas aussi loin que lui. Ils considéraient simplement que l'utilisation des mathématiques était

l'unique moyen que l'homme avait trouvé pour rendre compréhensibles les lois de la physique. Ainsi, d'après le mathématicien et physicien Henri Poincaré (1854-1912) :

Les mathématiques fournissent au physicien la seule langue dont il peut se servir pour traduire les subtilités qu'il souhaite exprimer.

Peut-on, pour autant, conclure que les mathématiques ne sont, pour la physique, qu'un simple langage ?

Savoir parler une langue et maîtriser parfaitement la rhétorique ne permettent pas de rédiger un roman : il faut, en outre, posséder des idées et les mots ne sont là que pour traduire ces dernières. Ainsi, si les mathématiques étaient uniquement un langage, alors leur seule pratique ne suffirait pas pour découvrir de la physique. Or l'histoire des sciences est là pour prouver le contraire comme l'illustrent la découverte du positron (antiparticule de l'électron) et celle de l'antiproton (antiparticule du proton) qui furent imaginés mathématiquement avant d'être détectés expérimentalement. En effet, dès 1929, le Britannique Paul Dirac (1902-1984) avait envisagé leur existence tandis que l'Américain Robert Oppenheimer (1904-1967) avait précisé leurs caractéristiques en résolvant l'équation établie par Dirac. Or, il a fallu attendre 1932 pour que le positron soit détecté expérimentalement dans le rayonnement cosmique et 1955 pour que l'antiproton soit identifié. Le positron et de l'antiproton ont donc été, dans un premier temps, des entités hypothétiques « mathématiquement nécessaires » avant que celles-ci ne soient, dans un second temps, détectées expérimentalement.

On voit sur cet exemple que les mathématiques peuvent jouer un rôle bien plus fondateur que celui d'un simple langage. On ne saurait donc les cantonner à ce seul rôle. Le philosophe des sciences Gaston Bachelard (1884-1962) exprimait ce point de vue quand il écrivait :

Il faut rompre avec ce poncif cher aux philosophes sceptiques qui ne veulent voir dans les mathématiques qu'un langage. Au contraire, la mathématique est une pensée, une pensée sûre de son langage.

L'analyse du lien entre physique et mathématiques est complexe. Elle est encore aujourd'hui à l'origine de nombreux travaux d'épistémologie. Il est donc légitime de se demander si l'on peut réellement parler de physique sans utiliser les mathématiques. Cet ouvrage propose une approche

historique pour introduire les grands concepts de la physique : il s'agit d'aborder, sous ce prisme, des anecdotes et des courants d'idée qui ont façonné notre culture scientifique. Les lectrices et les lecteurs qui souhaiteront aller plus loin dans le maniement de certains concepts physiques pourront, dans un second temps, revisiter ces notions sous un angle plus mathématisé. Des suggestions de lectures complémentaires leur seront proposées en fin d'ouvrage.

## La mécanique « classique »

Les grands ensembles architecturaux, érigés dès l'Antiquité, témoignent de la mise en œuvre précoce de certaines techniques pour déplacer puis dresser des masses importantes. Or, le terme de mécanique vient précisément du grec « *mèkanè* » qui signifie « machine ».

Les plans inclinés et les leviers ont été très vite utilisés et l'existence des pyramides, des temples antiques ou des menhirs prouve que l'homme a pu rapidement maîtriser l'équilibre des blocs de pierre et assurer leur mise en mouvement.

L'interprétation de tous les phénomènes mis en jeu lors de telles opérations a, quant à elle, nécessité plusieurs siècles de réflexion...

De façon générale, la mécanique désigne la science des forces et du mouvement, y compris le mouvement des astres : elle inclut donc l'astronomie. Nous nous intéresserons, dans ce chapitre, à ce qu'il est convenu d'appeler la « mécanique classique » et à l'évolution de cette branche de la physique jusqu'au début du XX<sup>e</sup> siècle.

### L'Antiquité

L'un des premiers mouvements auxquels se sont intéressés nos ancêtres est celui des astres du cosmos. L'étude du ciel leur permettait notamment de repérer l'écoulement du temps. Des tablettes sumériennes, datant de plus de 2500 ans avant notre ère, nous ont appris quel fut le cheminement des peuples de Mésopotamie (Sumériens puis Babyloniens) pour construire un calendrier lunaire : ils intercalaien tous les trois ans un treizième mois dans ce calendrier afin de suivre les saisons. Ces peuples étaient particulièrement fascinés par la régularité du mouvement des astres : ils avaient repéré trente-six constellations. Certains corps célestes les étonnaient beaucoup car ils semblaient vagabonder dans le ciel, sans trajectoire fixe. Plus tard, les Grecs ont appelé ces corps des « planètes »,

ce qui signifiait « astres errants ». Aucune des civilisations antiques ne pensait que l'on pouvait expliquer le mouvement des étoiles et des planètes autrement que par l'intervention de puissances divines. Ainsi, les événements inattendus, tels les passages de comètes, étaient souvent attribués à la colère des dieux. La plupart des astronomes babyloniens étaient donc aussi des astrologues et ils attribuaient à la position des constellations une influence sur la destinée humaine. Ils attendaient du ciel des réponses capitales et cela explique probablement le fait qu'ils aient mené de façon aussi exhaustive leurs observations : les premières tablettes comportant des séries de chiffres associées à des étoiles datent ainsi de 1500 avant Jésus-Christ.

Les Égyptiens, eux-aussi, se sont intéressés à la voûte céleste et, dès le III<sup>e</sup> millénaire avant notre ère, ils avaient abandonné la lune comme base de temps. Ils avaient ainsi construit une année de douze mois comptant chacun trente jours, à laquelle ils rajoutaient cinq jours supplémentaires. Mais comme le début de celle-ci dérivait d'un jour tous les quatre ans, il s'agissait finalement d'une « année vague ». Remarquons que, à des milliers de kilomètres de ces derniers, en Amérique centrale, les Mayas, eux-aussi, ont créé un calendrier dont le « haab », c'est à dire l'« année vague », comptait un court mois de cinq jours à la fin de l'année. Celui-ci était précédé non pas de douze mois de trente jours, mais de dix-huit mois de vingt jours, ce qui s'explique par le caractère vigésimal de leur système de numération. L'astronomie des Indiens mayas avait en outre de nombreux points communs avec celle des Babyloniens et des Assyriens bien qu'elle se soit développée plusieurs siècles plus tard à des milliers de kilomètres de la Mésopotamie.

Pour autant, de toutes les civilisations antiques, c'est probablement celle des Grecs qui a produit les plus grands travaux de mécanique. De nombreux écrits nous prouvent que l'intérêt de ces derniers pour l'étude des mouvements en général et du mouvement des astres en particulier est apparu très tôt dans leur histoire.

Sept siècles avant notre ère est née à Milet, en Asie Mineure, l'école ionienne sous l'influence de Thalès (625 av. J.-C., 547 av. J.-C.). Ce dernier considérait la Terre comme un disque circulaire en suspension sur un fluide qui était la source de toute chose et qui, en s'évaporant, se transformait en air. Cent-cinquante ans plus tard, un autre membre de

cette école, Anaxagore (499 av. J.-C., 428 av. J.-C), avait remarqué la forme circulaire de l'ombre de la Terre observée lors des éclipses de Lune. Ce sont enfin les disciples de Pythagore (580 av. J.-C., 495 av. J.-C.) qui, les premiers, ont envisagé que la Terre pouvait être sphérique. Pour autant, cette hypothèse, qui s'est avérée exacte, n'était pas le fruit d'observations : les pythagoriciens pensaient simplement que, dans la Nature, « tout était nombre » et que l'harmonie naturelle imposait que les planètes suivent des trajectoires les plus régulières possibles, c'est à dire des cercles. L'influence de l'école pythagoricienne était très grande et peu à peu se répandit la thèse d'une Terre sphérique dans tout le monde grec. Les pythagoriciens estimaient d'ailleurs que l'Univers était plongé dans le vide et que ce dernier s'étendait à l'infini. Notre planète cessait dès lors d'être un disque flottant...

À peu près la même époque que Pythagore, Parménide d'Élée fonda l'école éléate. Contrairement à Pythagore, Parménide considérait l'Univers comme fini et il estimait que le mouvement n'était qu'une illusion. Il avait nommé « étants » les seules choses immuables éternelles et susceptibles d'être connues dans l'Univers. Comme il affirmait aussi que « tout ce qui existe a toujours existé » et que « ce qui n'est pas, ne peut pas devenir quelque chose », Parménide avait conclu que le mouvement n'existe pas, qu'il n'était qu'une apparence et donc qu'il n'était pas intelligible. L'un de ses élèves les plus célèbres fut Zénon d'Élée (490 av. J.-C., 430 av. J.-C.), qui combattit vigoureusement les pythagoriciens. Zénon s'efforça de souligner l'absurdité des théories pythagoriciennes en formulant des paradoxes qui ont été rapportés un siècle plus tard par Aristote (384-322 av. J.-C.) dans sa *Physique*. Le plus célèbre des paradoxes de Zénon concerne Achille et sa tortue :

Si la tortue a de l'avance sur Achille, celui-ci ne la rattrapera jamais quelle que soit sa vitesse, car pendant qu'Achille court pour atteindre le point d'où est partie la tortue celle-ci avance de telle sorte qu'Achille ne pourra jamais annuler cette avance.

Ce paradoxe illustre un présupposé suivant lequel l'infiniment petit n'existe pas, présupposé qui sera aussi celui des philosophes atomistes tels Démocrite (460 av. J.-C., 370 av. J.-C.).

Or, on sait, aujourd’hui, que la résolution mathématique du problème d’Achille et de la tortue démontre bien que la durée de la course reste finie même en acceptant son découpage en une infinité d’étapes : la somme d’une infinité de termes peut, en effet, constituer une grandeur finie.

Aristote, lui aussi, se penchera sur la question du mouvement.

Mais ce terme même aura chez lui un sens particulier puisqu’il faut y voir un changement, au sens le plus général, et non un simple changement de position. Aristote décrit, en effet, le mouvement comme un passage d’un équilibre perdu vers un équilibre retrouvé et considère que les matières naturelles possèdent en elles-mêmes un principe de mouvement. Ainsi, contrairement aux éléates, il est convaincu que le mouvement est intelligible.

Aristote imagine pour chaque corps un moteur intérieur capable de provoquer son déplacement lors d’un mouvement « naturel » ou d’engendrer le mouvement d’un autre corps lors d’un mouvement effectué « par violence ». Notons qu’il ne distingue pas le mouvement accéléré du mouvement rectiligne uniforme. Aussi, même s’ils s’inscrivent dans le domaine de la mécanique, est-il impossible de considérer ses travaux comme une analyse dynamique du mouvement des corps.

Aristote considère, enfin, que les corps célestes du monde supra-lunaire (c'est-à-dire situé au-dessus de la lune) sont animés de mouvements circulaires et éternels autour de notre Terre, elle-même immobile et sphérique au centre du Cosmos. Il justifie la régularité de ces trajectoires par la composition particulière de ces astres et par la présence d'« éther » au sein de ces derniers. Il estime aussi que le moteur qui anime les sphères célestes est d'origine divine et oppose au monde supra-lunaire, un monde sublunaire, où ne pourraient s'accomplir que des mouvements finis.

Lorsque, près de deux mille ans plus tard, Newton expliquera la chute d'une pomme sur le sol et le mouvement des planètes par un seul et même phénomène (la gravitation), cette opposition entre physique du monde sublunaire et physique du monde supra-lunaire sera remise en cause.

Finalement c'est sur le sol d'Égypte, pendant la période hellénistique (entre 323 av. J.-C et 31 avant J.-C.), que l'école astronomique d'Alexandrie a donné naissance aux premiers grands spécialistes de la mécanique. L'influence de l'école d'Alexandrie a ensuite perduré, y compris au-delà du III<sup>e</sup> siècle après J.-C. avec l'école néo-platonicienne.

Le célèbre géomètre Euclide (vers 300 av. J.-C.) faisait partie de cette école qui constituait un centre de recherche scientifique pluridisciplinaire. Les avancées qui y avaient été faites dans le domaine de la géométrie furent à l'origine de travaux remarquables sur l'étude du ciel. Ainsi, Aristarque de Samos (310 av. J.-C., 230 av. J.-C.), le premier, évalua-t-il la distance Terre-Lune, en mesurant les dimensions du cône d'ombre lors d'une éclipse de Lune. Il put déduire de ses observations que la Lune se situait à 60 rayons terrestres de nous et que son rayon était trois fois plus petit que celui de notre planète. L'ordre de grandeur de ces résultats est excellent. En outre, Aristarque fut le premier, et cela dix-sept siècles avant Copernic, à affirmer que la Terre n'était pas le centre du monde, mais qu'elle tournait sur elle-même et autour du Soleil. Quelques décennies plus tard, un autre membre de l'École astronomique d'Alexandrie parvint à mieux connaître notre planète. Il s'agit d'Ératosthène de Cyrène (276 av. J.-C., 194 av. J.-C.). Ce dernier proposa d'évaluer la circonférence de la Terre en mesurant l'ombre de deux objets situés en deux points de latitudes différentes (respectivement à Alexandrie et à Syène). Il trouva 250 000 stades (ce qui correspond à 44 000 km). Cette valeur est fort acceptable compte tenu des moyens dont il disposait. Ératosthène était en outre conservateur de la bibliothèque d'Alexandrie et il publia deux ouvrages d'Archimède (287 av. J.-C., 212 av. J.-C.) qui était son contemporain et son correspondant.



Suggestion : Gravure d'Archimède libre de droits (2)  
Archimède (287 av. J.-C., 212 av. J.-C.)

Le savant qui aurait hurlé « Eurêka ! » dans les rues de Syracuse alors qu'il venait de découvrir dans son bain son célèbre théorème fut avant tout un géomètre. Ses travaux portent, certes, sur la statique des corps flottants et sur la statique en général, mais la géométrie était son domaine de prédilection. L'utilisation des barycentres lui fut particulièrement précieuse dans le domaine de la statique. Archimète affirmait, en effet, que tout corps pesant avait un barycentre bien défini, en lequel tout le poids se trouvait concentré. En fait, Archimète n'a quasiment pas réalisé d'expériences : la plupart de ses travaux sont le fruit de ses démonstrations. Dans sa *Statique des corps solides* le problème de l'équilibre des surfaces est résolu à l'aide de déductions géométriques. Archimète y écrit que

des grandeurs commensurables sont en équilibre lorsqu'elles sont réciprocement proportionnelles aux longueurs auxquelles ces grandeurs sont suspendues.

Cet ouvrage contient en germes l'étude des conditions d'équilibre des leviers et des balances qui seront finalisés plusieurs siècles plus tard. Enfin, les travaux d'Archimète sur l'étude de la densité des corps auraient, quant à eux, été commandés par le roi Hiéron. Il s'agissait, en effet, de trouver une méthode pour déterminer la densité des corps afin

de confondre ceux qui fondaient du cuivre à l'intérieur de pièces d'orfèvrerie censées être pleines d'or. En rédigeant par la suite son *Traité des corps flottants*, Archimète a posé en principe que

la nature d'un fluide est telle que, ses parties étant uniformément disposées et continues, celle qui est moins comprimée est déplacée par celle qui l'est davantage, et que chacune est comprimée, suivant la verticale, par le fluide placé au-dessus.

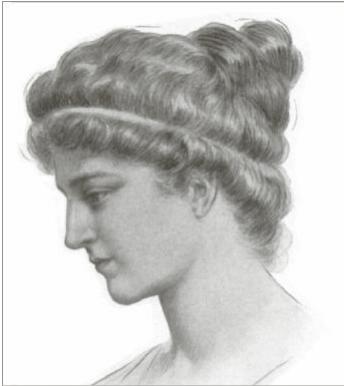
Un principe ne se démontre pas, et Archimète est parti de ce dernier pour établir, en les démontrant cette fois, toute une série de lois. Il écrit ainsi que

les solides moins pesants qu'un fluide, qui y sont introduits, sont renvoyés vers le haut avec une force égale à celle du poids dont le volume du fluide, égal à celui du solide, excède le poids de ce dernier.

Les résultats formulés par Archimète sont désormais des théorèmes puisque l'on peut les démontrer à l'aide des lois de Newton. Ils sont encore enseignés de nos jours. Le résultat dont nous venons de donner l'énoncé original s'exprime de la façon suivante : tout corps à l'équilibre dans un liquide subit une poussée verticale opposée au poids du liquide déplacé.

Rien ne prouve qu'Archimète ait séjourné à Alexandrie, mais son œuvre est inscrite dans le courant de pensée de cette école et il n'a cessé de faire part de ses travaux à certains de ses membres tels Ératosthène. À la fin de sa vie, il a d'ailleurs envoyé à ce dernier une *lettre sur la Méthode* qui constitue son testament scientifique.

Après la mort d'Ératosthène, l'école d'Alexandrie a continué son activité sous diverses formes pendant plusieurs siècles. Les travaux du mathématicien et astronome Claude Ptolémée (deuxième siècle après J.-C.) s'inscrivent ainsi dans la continuité de ce courant, de même que ceux de l'astronome, mathématicienne et philosophe Hypatie (370-415) qui dirigea l'école néoplatonicienne d'Alexandrie. Hypatie a commenté les travaux de Ptolémée et a apporté sa contribution à plusieurs ouvrages mathématiques (dont un commentaire sur les Arithmétiques de Diophante). Elle construisit aussi des astrolabes et des densimètres destinés à mesurer des masses volumiques en utilisant le principe d'Archimète.



Suggestion : Gravure de Hypatie libre de droits (3)  
Hypatie (370-415)

Jusqu'au Moyen-Âge, le système de Ptolémée et la physique d'Aristote ont fait autorité et l'œuvre de Ptolémée, qui décrit un système du monde dans lequel la Terre est fixe au centre de l'Univers, a eu une importance énorme au cours des siècles qui suivirent. Ptolémée a remis en cause la thèse des pythagoriciens qui affirmait que les planètes suivaient des trajectoires circulaires uniformes. En effet, de telles trajectoires ne permettent pas de justifier que certaines planètes semblent plus grosses à certaines périodes de l'année. Ptolémée s'efforça d'expliquer le rapprochement et l'éloignement de ces corps célestes au fil des saisons. Mais, alors que, quatre siècles plus tôt, Aristarque de Samos avait compris que la Terre tournait autour du Soleil, Ptolémée n'envisagea pas cette éventualité. Il s'employa au contraire à bâtir, dans une optique géocentrique, un système de trajectoires concordant avec ce qui était observé depuis la Terre. Pour parvenir à ce but, il imagina un système complexe constitué d'épicycles. Le livre dans lequel il exposa sa théorie s'appelait à l'origine *Syntaxe mathématique*. Son titre s'est peu à peu transformé pour devenir au fil des siècles l'*Almageste*, de l'arabe *Almagesti* qui signifie « la très grande ».

La théorie de Ptolémée est devenue la référence incontestée en matière d'astronomie jusqu'au XIV<sup>e</sup> siècle. Cela ne fut pas sans conséquences : ainsi, contrairement à Ératosthène de Cyrène, Ptolémée avait sous-évalué la circonférence de la Terre qu'il estimait à trente mille kilomètres. Plusieurs siècles plus tard, quand Christophe Colomb envisagea de se

rendre aux Indes en passant par l'ouest, il se basa sur la valeur erronée du pourtour terrestre qu'avait fournie Ptolémée. Il ignorait alors la présence du continent américain. Il est permis de se demander s'il aurait choisi de naviguer dans cette direction s'il avait su que dix mille kilomètres supplémentaires seraient à parcourir...

## Des Grecs à Galilée : du Moyen-Âge à la renaissance des sciences physiques

Les Grecs s'étaient beaucoup interrogés sur le monde qui les entourait. Leur grand souci de compréhension et la façon dont ils ont tenté d'utiliser le mieux possible leur raison pour atteindre la connaissance font d'eux les pionniers de la physique.

Les Romains, qui leur ont succédé, ont produit relativement peu de travaux dans le domaine de la mécanique, de l'astronomie et des sciences de façon plus générale : la plupart des œuvres scientifiques grecques sont arrivées jusqu'à nous, non par leur intermédiaire, mais par celle des Arabes dont l'empire, dès le VII<sup>e</sup> siècle, s'étendait de l'Espagne à la Perse.

Ces derniers ont particulièrement étudié le ciel dont ils attendaient des réponses concernant leur avenir. Les astronomes-astrologues arabes affinèrent ainsi l'étude du mouvement des planètes qu'avaient faite les Grecs et ils produisirent de nouvelles tables permettant de prévoir leurs positions. Comme ces dernières utilisaient le système géocentrique de Ptolémée et ses épicycles, elles étaient relativement complexes. Elles furent néanmoins utilisées en Europe pendant tout le Moyen Age. La précision des relevés effectués dans les observatoires de Damas, Bagdad ou Maraga est particulièrement notable. Aussi, bien que les premiers astronomes arabes aient, eux-aussi, placé la Terre au centre du monde et bien qu'ils crurent prévoir l'avenir en observant le ciel, leur apport a été important dans le domaine de l'astronomie. Al-Battani, qui vécut aux IX<sup>e</sup> et X<sup>e</sup> siècles, est peut-être le plus célèbre d'entre eux : il mit au point des techniques de calculs mathématiques particulièrement performantes pour leur utilisation en astronomie. Dès le XI<sup>e</sup> siècle, Alhazen (965-1035) a d'ailleurs critiqué l'*Almageste*, et a mis en doute le modèle de Ptolémée comme en témoignent ses propres mots :

Ptolémée fait l'hypothèse d'un ordre qui ne peut exister et le fait que cet ordre reconstitue pour son imagination des mouvements qui sont ceux des planètes ne l'exonère pas de l'erreur qu'il a commise en faisant l'hypothèse de cet ordre ; car les mouvements réels des planètes ne peuvent résulter d'un ordre qui n'existe pas.

Enfin, il est important de souligner qu'au XV<sup>e</sup> siècle, c'est à dire à l'époque de Copernic, les Arabes avaient déjà totalement abandonné le système de Ptolémée. Certes, ils avaient encore une vision géocentrique de l'Univers, mais leur théorie du mouvement des planètes avait écarté la thèse des épicycles inventée par le savant grec.

En Occident, les astres ont fasciné les hommes de l'époque médiévale. Pendant cette période, la magie et le mysticisme occupaient une place prégnante et l'observation et l'analyse du ciel ne revêtaient aucun caractère rigoureux. De plus, l'étude des mouvements, autres que ceux des astres, n'intéressait guère les érudits. Ainsi, la physique sombra-t-elle dans une torpeur qui devait durer plusieurs siècles. Il faut dire qu'au Moyen Âge la grammaire, la rhétorique et la dialectique étaient beaucoup plus renommées que les sciences dites expérimentales. Il fallut ainsi attendre le XII<sup>e</sup> siècle, au moment de la reconquête sur les territoires arabes pour que les textes grecs, et notamment ceux d'Aristote et Ptolémée, soient redécouverts en Europe. Ils servirent alors de base à toute la culture scientifique européenne jusqu'au XVI<sup>e</sup> siècle.

Au Moyen Âge, l'étude du mouvement des projectiles a fait l'objet de recherches approfondies. Pour des raisons qu'il est aisément de percevoir, nombreux étaient ceux qui souhaitaient comprendre la trajectoire d'un boulet de canon ! La ballistique a ainsi été fortement influencée par la pensée d'Aristote : la distinction entre mouvement « naturel » et mouvement effectué « par violence » a eu beaucoup d'importance jusqu'au XIV<sup>e</sup> siècle. À cette époque, l'école parisienne sous la direction de Jean Buridan (env. 1300-1358) réintroduisit, en Occident, la notion d'impetus proposée à l'origine par les savants de l'école néo-platonicienne d'Alexandrie. Il s'agissait d'une puissance capable de mouvoir, qui précédait immédiatement le mouvement et qui s'épuisait en agissant. Le concept d'impetus devait en outre permettre d'éliminer la frontière, jusqu'alors immuable, qu'avait établie Aristote, entre mouvements « naturels » et mouvements « violents ».

De nombreux écrits de Léonard de Vinci (1452-1519) nous prouvent que ce dernier s'est particulièrement intéressé à ce problème et notamment au cas du lancer vertical suivi d'une chute « spontanée ». C'est d'ailleurs cet exemple qui permit à l'Italien Tartaglia (1499-1557) d'affirmer que les mouvements naturels et violents étaient compatibles. Mais Tartaglia ne parvint pas à comprendre comment se raccordaient la partie ascendante de la trajectoire d'un projectile et sa partie descendante.

En résumé, l'intérêt des réflexions effectuées en France et en Italie entre le XIV<sup>e</sup> et le XVI<sup>e</sup> siècle dans le domaine de la balistique repose essentiellement sur la remise en cause de l'antagonisme entre mouvement naturel et mouvement violent : les thèses d'Aristote sur le mouvement commençaient dès lors à être critiquées...

C'est à peu près à la même époque qu'en Flandres fut redécouverte la statique d'Archimède. On s'efforça alors d'expliquer le fonctionnement des leviers, des poulies et des balances. Le Flamand Simon Stevin (1548-1620) publia à Leyde, en 1586, un ouvrage dans lequel il étudiait les conditions d'équilibre sur un plan incliné. Nous verrons que, plus tard, Galilée (1564-1642) s'intéressera aussi à ce problème. Mais ce ne sera qu'au XVII<sup>e</sup> siècle que Pierre Varignon (1654-1722) fera la synthèse des connaissances de l'époque dans le domaine de la statique.

Ainsi, après une période de plus de dix siècles où l'étude des mouvements et celle des conditions d'équilibre ont peu intéressé les hommes, après un millénaire de relative torpeur scientifique, la mécanique semble se réveiller à l'aube du XVI<sup>e</sup> siècle. Certes la Renaissance est, avant tout, une renaissance artistique et littéraire. Certes le merveilleux a une grande importance pour l'homme de cette époque qui cherche avant tout à retrouver dans le microcosme de son être un reflet du macrocosme de l'Univers. Mais contrairement à son ancêtre du Moyen Âge, l'homme de la Renaissance n'exclura pas de s'intéresser à des idées nouvelles...

## Des avancées prodigieuses : XVI<sup>e</sup> et XVII<sup>e</sup> siècles

En 1543 Nicolas Copernic (1473-1543) publie *les Révolutions des orbes célestes* : il est alors celui qui, dix-sept siècles après Aristarque de Samos, dévoile à l'Occident chrétien que la Terre n'est pas au centre du monde.

Dès 1535, Copernic avait proposé au secrétaire du roi de Pologne de nouvelles tables permettant le calcul du mouvement des planètes. Celles-ci étaient à la fois plus simples et plus précises que celles utilisées jusqu'alors. Mais Copernic, s'il livrait volontiers ses recettes de calculs, n'était pas prêt à expliquer comment il les avait établies : il jugeait, en effet, qu'il fallait :

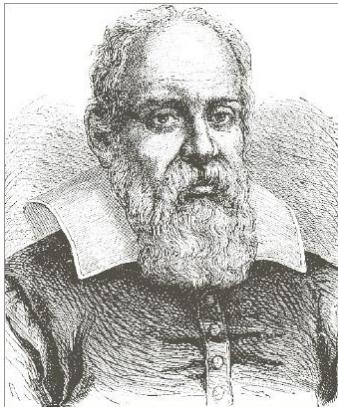
ne confier les secrets de la philosophie qu'à des amis fidèles et à des proches,  
et ne pas mettre ces secrets par écrit, ni les révéler à n'importe qui.

Il est un fait que le système du monde proposé par Copernic avait de quoi bouleverser les philosophes de son temps : ôter à la Terre sa position centrale était une idée révolutionnaire.

*Des Révolutions des orbes célestes* furent publiées en seulement mille exemplaires très peu de temps avant la mort de son auteur. Très rapidement, les thèses de Copernic se diffusèrent et la communauté théologique chrétienne – tant catholique que luthérienne – exprima des réserves sur la teneur des six livres qui constituent cette œuvre. Certes, certains ne virent dans la thèse héliocentrique qu'une spéculation non fondée qui avait pour seul mérite de fournir des tables astronomiques opérationnelles mais de plus vives critiques furent rapidement formulées après la mort du chanoine.

Copernic avait raison en ce qui concerne le caractère non privilégié de la Terre au sein de notre système solaire, mais le cheminement qu'il mena pour parvenir à cette conclusion ne repose nullement sur l'observation. Ce que Copernic reprochait avant tout au système de Ptolémée, c'était d'envisager des trajectoires qui n'étaient pas circulaires et qui, de plus, n'étaient pas parcourues à vitesse constante. Or, d'après lui, seuls les mouvements uniformes circulaires pouvaient exister dans la Nature. Et c'est pour cela qu'il imagina des orbites qui tournaient autour du Soleil à vitesse constante. Il pensait d'ailleurs que le Soleil était au centre de l'Univers. Ainsi, lorsque Copernic mourut, il était nécessaire, non seulement d'apporter des preuves scientifiques au système du Monde dont il avait eu l'intuition, mais aussi de le débarrasser des conditions superflues dont les préjugés du chanoine étaient à l'origine.

Galilée allait s'y employer...



Gravure de Galilée libre de droits (celle de la couverture) (5)  
Galileo Galilei (1564-1642)

Galileo Galilei (1564-1642), plus connu sous le nom de Galilée, est souvent considéré comme le fondateur de la méthode scientifique en physique. Au cours de sa vie, il s'est intéressé aux mathématiques, aux problèmes de statique, au mouvement des astres mais aussi à celui des corps en chute libre. Il était convaincu que la Nature était écrite en langue mathématique et il aspirait à construire une science mathématisée du mouvement.

Les travaux de Galilée se sont tout d'abord inscrits dans la continuité de ceux des physiciens du XVI<sup>e</sup> siècle qui utilisaient l'impetus pour expliquer le mouvement. Un tournant dans sa vie scientifique s'est ensuite produit lorsque, en 1609, il a construit une lunette astronomique, instrument d'optique qui avait été inventé quelques années plus tôt aux Pays Bas. L'utilisation de cette lunette a immédiatement révélé à Galilée l'existence de milliers d'étoiles invisibles à l'œil nu. Elle lui permit ensuite de découvrir les ressemblances entre la Lune et la Terre et il comprit que notre satellite n'était pas lumineux mais qu'il diffusait simplement la lumière du Soleil. Il remarqua aussi la présence de cratères à la surface de la Lune et c'est dans *Le messager céleste*, publié dès mars 1610, qu'il fit part de ces premières observations.

Par la suite, Galilée a étudié le Soleil et les taches à la surface de ce dernier. Personne ne connaissait alors la nocivité pour la rétine des rayons invisibles ultraviolets. Galilée qui travaillait sans utiliser de filtre

fut ainsi privé de sa vue pendant les dernières années de sa vie. Mais ses observations, pour dangereuses qu'elles aient été, l'aiderent considérablement à avancer dans ses théories : grâce à l'étude du mouvement des tâches solaires, il comprit, tout d'abord, que le Soleil tournait sur lui-même. Ensuite, il réussit à ôter au Soleil le caractère absolu que lui prêtait Copernic : à une époque où les thèses héliocentriques avaient peu à peu été diffusées, certains pensaient, à tort, que seul le Soleil pouvait être au centre d'un mouvement. Cette croyance s'expliquait par le caractère privilégié que Copernic, qui était chanoine, attribuait à cet astre : il pensait que celui-ci rayonnait « sous le regard de Dieu » au centre de notre Monde. Certains fervents défenseurs de Copernic excluaient donc qu'un corps céleste puisse tourner autour d'une planète et c'est en découvrant les satellites de Jupiter au début de l'année 1610 que Galilée leur prouva le contraire.

En 1615, Galilée exposa publiquement les arguments convergents qui lui permettaient de conclure que la Terre tournait autour du Soleil. La plupart des ecclésiastiques s'inquiétèrent de cela et lorsque, le 3 mars 1616, le système héliocentrique fut officiellement condamné par décret, Galilée fut invité à aborder d'autres sujets de recherches... Cela fit dire au physicien, dans une lettre qu'il écrivit à la grande-ducasse Christine de Toscane que

l'intention du Saint-Esprit est de nous enseigner comment on doit aller au ciel,  
et non comment va le ciel.

Le différend entre Galilée et l'Eglise venait de débuter et, par la suite, il ne fit que s'accroître.

Quelques rares ecclésiastiques soutinrent le physicien. Le père carmélite Foscarini (1565-1616) rédigea ainsi une brochure montrant comment la Bible pouvait être interprétée dans le cadre de la théorie copernicienne. Le pape Urbain VIII demanda, quant à lui, au savant, en 1624, de rédiger un essai comparant la théorie de Ptolémée et celle de Copernic. Il était convenu que ce livre ne devait favoriser aucun des deux points de vue... *Le Dialogue sur les deux grands systèmes du Monde* fut ainsi publié huit ans plus tard. Mais dans ce dialogue plein d'ironie, Simplicio, le partisan de Ptolémée et d'Aristote, déplut fortement au Pape. Non seulement ce personnage était absolument ridicule, mais le pape avait toutes les raisons de se reconnaître dans le portrait que Galilée avait brossé de ce dernier...

La publication de cet ouvrage eut un grand retentissement et, dès 1632, Galilée dont les écrits contrevenaient au décret de 1616, fut arrêté et dut comparaître devant l’Inquisition lors d’un procès qui a marqué l’Histoire. Face aux menaces, le physicien décida de se rétracter officiellement. En résidence surveillée jusqu’à la fin de ses jours il continua malgré tout son œuvre et parvint même à diffuser ses travaux à l’étranger pendant les années qui précédèrent sa mort.

Et pourtant elle tourne !

Ces mots qu’auraient prononcé Galilée après avoir renié publiquement les théories héliocentriques sont restés célèbres, mais l’œuvre de ce dernier est loin de se limiter au domaine de l’astronomie.

Dès ses jeunes années, Galilée s’est intéressé à la chute des corps et il a tenté d’utiliser la méthode expérimentale pour venir à bout de ce problème. À la même époque, il a aussi étudié la trajectoire des projectiles et il a vite compris, d’une part qu’un temps de repos n’était pas nécessaire entre la phase ascendante et la phase descendante de leur mouvement, et, d’autre part, que la composante horizontale de la vitesse d’un projectile se conservait. Après son procès, il a parachevé ses travaux sur la chute des corps, et, en 1638, alors qu’il était en résidence surveillée depuis cinq ans, il parvint à faire publier à Leyde, aux Pays-Bas, ses *Discours et démonstrations mathématiques concernant deux sciences nouvelles* (la première de ces deux sciences est la résistance des matériaux, et la seconde la chute des corps). Véritable précurseur, Galilée a compris que tous les corps en chute libre ont le même mouvement. Seule la résistance de l’air permet en effet d’expliquer les différences que l’on peut observer sur la Terre : si une plume et un marteau étaient lâchés au même instant dans le vide sans vitesse initiale, ces deux corps atteindraient le sol au même moment.

Par la suite, Galilée est aussi le premier à énoncer que la vitesse lors d’une chute libre est proportionnelle à la durée de la chute et qu’un tel mouvement est uniformément accéléré et, au siècle suivant, le Hollandais Christiaan Huygens (1629-1695) mesurera la valeur de cette accélération de chute libre, qui est aussi appelée accélération de pesanteur, et qui, de nos jours, se note en utilisant la lettre « g ».

Galilée, qui n'a été totalement réhabilité par le Vatican qu'en 1992, était un esprit libre doté d'un esprit critique remarquable. Il fut l'un des pionniers de la méthode expérimentale en physique. Il attachait également une importance toute particulière aux mathématiques qui étaient à ses yeux indispensables dans l'étude de la Nature. Dans *Il Saggiatore* (L'Essayeur), dès 1623, il écrivait à ce sujet :

La philosophie est écrite dans ce très vaste livre qui constamment se tient ouvert devant nos yeux : je veux dire l'Univers. Mais on ne peut le comprendre si d'abord on n'apprend à comprendre la langue et à connaître les caractères dans lesquels il est écrit. Or il est écrit en langue mathématique et ces caractères sont les triangles, les cercles et autres figures géométriques sans lesquelles il est absolument impossible d'en comprendre un mot.

Galilée s'est également employé à effectuer des « expériences de pensée ».

Ainsi, dans son *Dialogue sur les deux systèmes du monde*, il a imaginé un bateau animé d'un mouvement uniforme, dans lequel on lancerait à la verticale un boulet de canon. Simplicio, le partisan d'Aristote et de Ptolémée y affirme que le boulet va tomber « à l'arrière du bateau ». Salviati, le disciple de Galilée, le contredit et comprend que le boulet tombe au pied du mât.

Les lois de la physique sont les mêmes dans deux référentiels en translation rectiligne uniforme l'un par rapport à l'autre. Ainsi, que le bateau soit à l'arrêt au port ou qu'il avance à vitesse constante sur une trajectoire droite<sup>1</sup>, le résultat observé sera le même : le boulet tombera bel et bien au pied du mât. Galilée évoque aussi dans son *Dialogue* l'exemple des papillons qui virevoltent autour du mât du bateau lorsque celui-ci a atteint sa vitesse de croisière. Quelle est la vitesse de ces papillons ? Nous réalisons à l'instant même où nous posons cette question qu'elle est dénuée de sens. Vitesse par rapport à quoi ? Par rapport au bateau ou par rapport au quai ? Le mouvement des papillons sur le bateau est ici identique à celui qu'ils auraient lorsque le bateau est amarré.

Galilée montre ici que tous les lieux se valent et que « le mouvement est comme rien » : à l'inverse d'Aristote, il affirme qu'il n'y a pas d'état de repos absolu, qu'il n'existe pas d'état de référence. Ainsi, aucune expérience réalisée à l'intérieur du bateau ne permet de décider si celui-ci est à l'arrêt ou bien s'il avance en ligne droite à vitesse constante.

Autrement dit, si un navire ne subit aucune accélération, alors un passager, enfermé dans la cale, n'a aucun moyen de savoir si le navire avance ou bien s'il est à quai. Galilée est ainsi le premier, quatre siècles avant Einstein, à affirmer qu'il est dans la nature même du mouvement d'être relatif...

## Newton

Le fait que l'autre génie de la mécanique classique, celui qui a proposé une solution au problème de la gravitation, soit né en 1642, c'est à dire l'année même de la mort de Galilée, est porteur de nombreux symboles. Il serait toutefois faux de croire que c'est uniquement l'héritage de Galilée qui a guidé Newton (1642-1727). Cet homme, dont l'œuvre est incontestablement la clef de voûte de toute la mécanique classique, affirmait avec une modestie remarquable :

Si j'ai vu plus loin c'est parce que j'étais sur les épaules de géants.

Ces géants auxquels il fait allusion sont probablement Galilée, mais aussi Brahé (1546-1601), Kepler (1571-1630), Descartes (1596-1650) ou Huygens (1629-1696).



Gravure de Newton libre de droits (celle de la couverture) (6)  
Newton (1642-1727)

L'Allemand Kepler fut contemporain de Galilée, mais, contrairement à ce dernier, qui préconisait une méthode rigoureuse basée sur l'expérience et l'utilisation des mathématiques, Kepler était un mystique qui cherchait dans l'étude du ciel des réponses d'ordre astrologique. Cet aspect du

caractère de Kepler a longtemps jeté le discrédit sur ses travaux. Ses écrits étaient souvent confus et il n'était pas parvenu à les débarrasser de superstitions et de spéculations peu scientifiques. Pour autant, les apports de ce travailleur acharné ont été majeurs. C'est en effet lui qui, le premier, a déterminé quelle était la trajectoire suivie par les planètes. Pour cela, il a, contre la pensée de son temps, choisi le système de Copernic contre celui de Ptolémée.

Kepler a mis dix ans pour déterminer quelle était, dans le référentiel héliocentrique, la trajectoire de celui des astres errants qui posait le plus de difficultés aux astronomes, c'est-à-dire la planète Mars. Comme le lui a souvent reproché son contemporain Tycho Brahé, il procédait par tâtonnements successifs, en essayant tour à tour de vérifier des idées qu'il avait eues *a priori*. Quand, à la mort de Brahé, Kepler récupéra les écrits de ce dernier, il progressa beaucoup plus rapidement. Les cahiers de Brahé constituaient en effet une collection impressionnante de données et, en 1606, Kepler parvint finalement à identifier la trajectoire de Mars comme une ellipse dont le Soleil était l'un des foyers. Il s'aperçut en outre que les aires balayées en des temps égaux par le rayon Soleil-Mars étaient égales les unes aux autres et il généralisa, dès 1621, ces deux lois non seulement à toutes les autres planètes mais aussi aux satellites de Jupiter que Galilée avait découverts onze ans plus tôt. Ces lois sont encore étudiées aujourd'hui sous le nom de première et deuxième lois de Kepler.

La troisième des célèbres lois de Kepler a été publiée dans l'*Epitome*. Elle permet de relier le temps qu'une planète met pour accomplir une révolution complète autour du soleil (cette durée s'appelle la période) à la longueur du demi grand axe de l'ellipse qu'elle parcourt. Grâce à une série de données, Kepler s'est en effet aperçu que le carré de la période de révolution de chaque planète est proportionnel au cube du demi grand axe de l'ellipse qu'elle parcourt.

Lorsque Newton commence ses travaux de physique, il dispose donc des travaux de Galilée et de Kepler, mais il est également sous l'influence de ceux de Descartes et de Huygens sur les chocs. Pour autant, malgré les avancées intéressantes du siècle précédent, les notions de vitesse et de force restent encore à éclaircir.

En 1666, alors que la peste qui sévit sur Cambridge lui impose un séjour forcé à la campagne, Newton vit une année intellectuellement féconde. Il travaille tout d'abord sur la gravitation universelle dont il aurait eu l'idée en voyant une pomme tomber d'un arbre. Newton a ainsi le génie de comprendre que l'interaction qui assure la proximité de la Lune autour de la Terre est la même que celle qui s'exerce entre notre planète et la pomme qui tombe sur elle. Il montre ainsi qu'il n'y a pas lieu de distinguer deux physiques selon la nature des objets auxquels on s'intéresse : la loi de la chute des corps de Galilée traduit le même phénomène physique que les lois de Kepler sur le mouvement des planètes. C'est d'ailleurs en étudiant la trajectoire elliptique de la Lune que Newton établit la formulation de l'interaction gravitationnelle et qu'il comprend, dès 1666, la nature de cette force attractive.

La synthèse de ses travaux sera finalement faite dans l'ouvrage qu'il publie en latin en 1689 sous le titre *Philosophiæ naturalis principia mathematica* souvent nommé *Principia* de manière abrégée. Cet ouvrage constitue, sans aucun doute, l'un des deux plus grands chefs d'œuvre de mécanique de tous les temps. On y trouve notamment les trois lois dites aujourd'hui « de Newton » à partir desquelles il est possible de construire toute la mécanique classique.

La loi d'inertie (ou première loi de Newton) affirme qu'un corps qui n'est soumis à aucune force persévère dans son état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme. Rappelons qu'à défaut d'avoir énoncé cette loi aussi clairement, Galilée et Descartes l'avaient appréhendée au cours de leurs travaux. En ce sens, ils avaient remis en cause la théorie soutenue par un grand nombre de leurs prédécesseurs qui, dans la lignée d'Aristote, considéraient l'état de repos comme plus « naturel » que l'état de mouvement. Newton confère ici un caractère particulier au mouvement rectiligne à vitesse constante (dit « mouvement rectiligne uniforme ») qui, comme l'état de repos, se caractérise par une accélération nulle. À noter que la loi d'inertie se vérifie aussi lorsque toutes les forces qui s'exercent sur le corps se compensent (on parle alors de système pseudo-isolé).

La deuxième loi de Newton, étudiée aujourd'hui sous le nom de relation fondamentale de la dynamique ou encore de théorème de la quantité de mouvement, a été formulée à l'origine de la façon suivante :

Le changement de mouvement est proportionnel à la force imprimée et s'effectue suivant la droite par laquelle cette force est imprimée

Les référentiels dans lesquels la relation fondamentale de la dynamique est vérifiée sont appelés référentiels galiléens (adjectif construit à partir du nom de Galilée, qui, comme nous l'avons vu, fut le premier à percevoir la relativité du mouvement). Ils sont tous en translation rectiligne uniforme (c'est-à-dire à vitesse constante) les uns par rapport aux autres. Cette loi s'écrit actuellement en utilisant le formalisme mathématique des vecteurs, formalisme qui a été introduit pendant la première moitié du XIX<sup>e</sup> siècle, donc qui n'existe pas encore à l'époque de Newton.

Enfin, la troisième loi de Newton traduit le fait que

La réaction est toujours contraire à l'action ; les actions que deux corps exercent l'un sur l'autre sont donc toujours égales et dirigées en sens contraire.

Cette loi est parfois appelée loi des actions réciproques ou loi de l'action réaction. C'est elle qui, par exemple, montre que la force que la Lune exerce sur la Terre est opposée à celle que la Terre exerce sur la Lune.

Finalement, c'est parce que Newton a cherché à retrouver grâce à sa seconde loi, non seulement les trajectoires elliptiques des planètes, mais aussi les lois sur la chute libre, qu'il est parvenu à vérifier l'expression de l'interaction de gravitation qu'il avait proposée. Il a ainsi démontré que l'intensité de la force qui s'exerce entre deux corps est proportionnelle au produit de leurs masses et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare : plus deux corps sont lourds plus l'interaction de gravitation entre eux est importante et plus ils sont éloignés, plus cette interaction est faible (et elle décroît rapidement).

Si la Terre ne tournait pas sur elle-même, et si le référentiel terrestre était galiléen, le champ de gravitation s'identifierait totalement au champ de pesanteur terrestre dont l'accélération  $g$  a été évoquée précédemment. Or on sait, depuis le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle que certaines expériences fines de mécanique (déviation vers l'est lors de la chute libre, rotation du plan des oscillations d'un pendule de grande longueur, tel le pendule de Foucault) permettent de mettre en évidence le caractère non galiléen du référentiel terrestre. Néanmoins, lorsqu'il s'agit d'étudier la chute d'une pomme qui se détache de la branche d'un arbre, alors l'approximation qui

consiste à considérer le référentiel terrestre comme galiléen s'applique. Dès lors, il est légitime d'utiliser la seconde loi telle que Newton l'a formulée. On retrouve alors le fait que le mouvement de chute libre sur la Terre est uniformément accéléré et que l'accélération de chute (que l'on appelle  $g$ ) est bien indépendante de la masse du corps comme l'avait affirmé Galilée.

## Héritage de Newton et nouveaux concepts

L'empreinte du physicien anglais a été profonde.

Son œuvre a d'ailleurs passionné les philosophes du siècle des Lumières. Dès 1727, la Française Emilie du Châtelet (1706-1749) entreprend de traduire les écrits de Newton et c'est cette passion pour les travaux du scientifique anglais qui contribuera à la rapprocher du philosophe Voltaire (1694-1778). Ce dernier, de retour d'Angleterre, évoquera Newton dans ses *Lettres philosophiques* (1734) et vulgarisera ses écrits en rédigeant, pendant son exil au Pays-Bas, des *Éléments de la philosophie de Newton mis à la portée de tout le monde* (titre original : *Elemens de la philosophie de Neuton mis à la portée de tout le monde*) dont une première version partielle sera publiée à Amsterdam en 1738.

Si le système de Newton a connu son heure de gloire tout particulièrement au XVIII<sup>e</sup> siècle, c'est aussi parce que, à cette époque de grand dynamisme intellectuel, la mécanique céleste est en plein essor.

Newton avait découvert la gravitation. Il avait montré comment la connaissance des forces qui s'exerçaient sur un corps permettait de déduire son mouvement. Il ne restait plus qu'à appliquer ces résultats aux astres pour prévoir, avec précision, quelle allait être leur trajectoire. De grands observatoires avaient été bâtis en Europe, notamment à Greenwich et à Paris. Les travaux s'étaient multipliés. Les recherches de Pierre Simon de Laplace (1749-1827) portèrent ainsi sur les anomalies du mouvement de la Lune, ce qui lui fournit un moyen d'estimer la non-sphéricité, c'est à dire l'aplatissement aux pôles, de notre propre planète. Peu de temps plus tard, le Français Urbain Jean Joseph Le Verrier (1811-1877) utilisa, lui-aussi, la mécanique de Newton et contribua à faire comprendre au grand public toute la puissance de cette discipline. À cette époque, de nombreux astronomes étudiaient les irrégularités du mouvement de la planète Uranus dont la trajectoire différait légèrement

de celle que permettait de prévoir la théorie de Newton. Certains scientifiques, tels le Français Arago (1786-1853), pensaient que c'était la présence d'un corps de masse importante au voisinage d'Uranus qui expliquait la modification de sa trajectoire. Indépendamment l'un de l'autre, l'Anglais John Couch Adams (1819-1892), en 1843 à Cambridge, et le Français Le Verrier, en 1846 à Paris, calculèrent la position et la masse du corps en question. Mais, alors que les calculs du jeune Adams, âgé de vingt-quatre ans, n'avaient pas été pris au sérieux par les astronomes de Cambridge, ceux de Le Verrier, de huit ans son aîné, incitèrent Johann Gottfried Galle, le jour même où il les reçut, à braquer le télescope de l'observatoire de Berlin dans l'axe indiqué par le Français. À 52 minutes d'angle de la direction théorique, Galle détecta un nouveau corps céleste : il s'agissait de Neptune.

La théorie de Newton venait de permettre la découverte d'une planète... pour la première fois dans l'histoire des sciences, de manière totalement inédite, un astre était découvert par des calculs mathématiques avant de l'être par une observation. Ainsi, deux siècles après la naissance de Newton, une découverte venait consacrer l'œuvre du physicien anglais au yeux du grand public !

Par la suite, c'est dans la lignée de Newton qu'ont travaillé tous les mécaniciens des XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> siècles. Depuis leur publication, les lois énoncées dans les *Principia* avaient été transcrives sous la forme différentielle que nous connaissons aujourd'hui, ce qui ouvrait de nouvelles possibilités pour les exploiter mathématiquement.

Le philosophe encyclopédiste, mathématicien et physicien d'Alembert (1717-1783) fut l'un des premiers à se pencher sur les questions d'hydrodynamique ; l'hydrostatique ayant, quant à elle, été abondamment étudiée au siècle précédent par Descartes (1596-1650) et par Pascal (1623-1662) dont les expériences avaient permis de clarifier la notion de pression. Les travaux de d'Alembert sur les fluides furent ensuite parachevés par les Suisses Euler (1707-1783) et Bernoulli (1700-1782) ainsi que par l'Italo-Français Lagrange (1736-1813). On insistera ici sur le fait que les progrès importants réalisés dans le domaine de la mécanique du solide et de la mécanique des fluides au XVIII<sup>e</sup> siècle sont à rapprocher des avancées effectuées dans le domaine des mathématiques. Ainsi, d'Alembert, Euler, Lagrange et Bernoulli étaient tous les quatre des

mathématiciens. À une époque où la notion de fonction venait tout juste d'être inventée en mathématiques, la résolution des équations différentielles constituait un axe de recherche majeur. Alors que l'analyse, qui est l'une des branches actuelles des mathématiques, commençait à peine à se développer, Lagrange appliquait déjà ses travaux mathématiques au domaine de la mécanique. Il fonda ainsi la « mécanique analytique » dans laquelle les équations différentielles occupent une place privilégiée et où tout problème de mécanique se réduit à la résolution de ce type d'équations. Le mathématicien Britannique William Rowan Hamilton (1805-1865) qualifiera ainsi, plus tard, l'ouvrage que Lagrange publia en 1788 de « poème scientifique du Shakespeare des mathématiques ».

De façon générale, les sujets traités au XVIII<sup>e</sup> siècle ont largement fait appel aux équations mathématiques. D'Alembert qui, le premier, a étudié, en 1747, le problème de la corde vibrante, a introduit l'équation d'onde et il a développé lui-même les calculs nécessaires à sa résolution. Ainsi, de même que l'hydrodynamique est une discipline dans laquelle les équations aux dérivées partielles sont omniprésentes, la physique ondulatoire est née, elle aussi, de l'utilisation de l'analyse dans le domaine de la mécanique. Au XVIII<sup>e</sup> siècle, la mathématisation de la mécanique est donc l'une des principales voies de recherche. Elle sera aussi, de manière indirecte, à l'origine de certains travaux effectués sur l'énergie. En effet, c'est l'intégration de certaines équations différentielles qui a fait apparaître des quantités énergétiques qui se conservent au cours du temps : on s'est ainsi rapidement aperçu que, en l'absence de frottements, l'énergie mécanique d'un corps est une grandeur conservative.

Plus tard, au XIX<sup>e</sup> siècle, alors qu'en Angleterre la révolution industrielle fait naître de nouvelles machines, le concept d'énergie de type mécanique intéressera les esprits pour ses applications pratiques. Dans ce contexte, alors que la machine à vapeur bouleversera les techniques de production, les physiciens se pencheront sur l'étude des liens entre les phénomènes thermiques et les phénomènes dynamiques. La « thermomécanique » qui deviendra peu à peu la « thermodynamique » sera alors prête à naître.

Le concept d'énergie y jouera un rôle déterminant.

---

1. Précisons ici que, pour cette expérience de pensée, même s'il a eu une intuition géniale sur la relativité du mouvement, Galilée n'a pas mentionné qu'il était nécessaire que la translation du bateau par rapport à la Terre, en plus d'être uniforme, fût aussi rectiligne.

# La thermodynamique : des origines à nos jours

La thermodynamique est une science récente puisqu'elle ne s'est vraiment développée qu'à la toute fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, au moment de la révolution industrielle anglaise, puis au XIX<sup>e</sup> siècle. La machine à vapeur, sur laquelle avait travaillé le Français Denis Papin (1647-1713) et qu'avait diffusée et brevetée l'ingénieur écossais James Watt (1736-1819) transformait l'énergie thermique produite par la combustion du charbon en travail mécanique. Les physiciens de l'époque ont voulu optimiser son fonctionnement et comprendre les phénomènes mis en jeu lors de celui-ci. C'est cela qui les a poussés à s'intéresser au concept de chaleur qui jusque-là n'avait jamais été correctement étudié.

## Température, thermométrie

Alors que, très tôt, les hommes et les femmes de sciences se sont révélés capables de mesurer des distances ou des durées, il leur a longtemps semblé impossible d'évaluer quantitativement une température. Les expériences qu'ils étaient susceptibles d'effectuer pour étudier les phénomènes thermiques étaient donc considérablement limitées. La thermométrie a progressé laborieusement et les avancées dans ce domaine furent d'autant plus lentes que les esprits ne s'accordaient pas sur la nature de la grandeur à mesurer. Le fait que le langage courant qualifie encore de « chaud » un objet dont la température est élevée témoigne de la confusion qui a longtemps régné dans les esprits entre les notions de chaleur et de température.

Contrairement au domaine de la mécanique où les Grecs avaient été capables de clarifier certaines notions, la contribution de ces derniers à l'étude théorique des phénomènes thermiques a été relativement limitée, même s'ils ont été capables de réaliser certaines mesures de manière empirique. Aristote (384 av. J.-C.-322 av. J.-C.) considérait que le chaud et le froid, tout comme le sec et l'humide, constituaient les qualités

caractéristiques des éléments de notre monde. Ainsi, jusqu'aux travaux de Philon de Byzance (vers 250 av. J.-C.) et de Héron d'Alexandrie (vers 100 av. J.-C.), l'appréciation de la température d'un corps a été purement subjective. C'est finalement grâce aux thermoscopes que ces derniers ont conçus qu'il est enfin devenu possible d'apprécier de façon objective des différences de température. Le fonctionnement de ces thermoscopes reposait sur la dilatation d'une quantité donnée d'air qui provoquait le déplacement d'un certain volume d'eau. Ils peuvent être considérés comme les ancêtres des thermomètres. Pour autant, ils ne permettaient pas de mesurer des températures de façon absolue : non seulement ils n'étaient pas gradués, mais leurs concepteurs n'avaient pas d'idée précise sur la grandeur susceptible d'être mesurée.

Le thermoscope de Héron sombra dans l'oubli jusqu'à ce que, à la Renaissance, les textes grecs de ce dernier soient redécouverts. C'est ainsi qu'un médecin istrien, Santorio Santorio (1561-1636) réactualisa cet appareil afin de suivre l'évolution de l'état de fièvre de ses patients. Mais les limites des mesures réalisées avec un tel thermoscope apparurent bientôt, et notamment leur dépendance avec la pression atmosphérique du jour. Rappelons que, à cette époque, les travaux de l'Italien Evangelista Torricelli (1608-1647) avaient déjà permis de mieux comprendre la notion de pression. Ainsi, dès le XVII<sup>e</sup> siècle, disposait-on de baromètres. On savait donc que la pression atmosphérique variait d'un jour à l'autre. Il en était de même pour la pression de l'air contenue dans les thermoscopes, celui-ci étant en équilibre avec l'air atmosphérique. En outre, les travaux du physicien anglais Boyle (1627-1691), publiés en 1662, et ceux du Français Mariotte (1620-1684), publiés en 1671, avaient révélé que, à température constante, le volume d'une masse donnée de gaz était inversement proportionnel à sa pression. Le thermoscope réactualisé par Santorio Santorio ne fournissait donc pas les mêmes résultats suivant la valeur de la pression atmosphérique du jour.

Pour rendre les mesures de température reproductibles, il fallait donc chercher une autre solution.

Tant que l'on ne trouva pas de méthode pour construire un thermomètre à gaz précis, on fabriqua des appareils employant des fluides thermométriques liquides. Il s'agissait de trouver des liquides qui se dilataient suffisamment pour limiter la taille des instruments

fabriqués. C'est ainsi que l'eau, puis l'alcool en 1654 et enfin le mercure en 1717 furent utilisés à l'intérieur des thermomètres. Les mesures étaient enfin reproductibles, mais tous les problèmes n'étaient pas pour autant réglés. En effet, ces thermomètres ne fonctionnaient plus lorsque l'on se trouvait en dessous de la température de solidification ou au-dessus de la température de vaporisation du liquide utilisé. Au niveau de la mer, un thermomètre à eau ne permettait pas de mesurer des températures inférieures à 0 °C ou supérieures à 100 °C. L'eau fut donc assez rapidement abandonnée en tant que fluide thermométrique. D'autres questions apparurent aussi lorsque l'on tenta de graduer ces thermomètres. En 1665, l'Anglais Hooke (1635-1703) envisagea de fixer le zéro d'un thermomètre à esprit de vin au point de fusion de la glace et de définir le degré comme le « millième du volume initial d'esprit-de-vin ». Au siècle suivant, Réaumur (1683-1757) proposa un thermomètre basé sur le même principe. Daniel Gabriel Fahrenheit (1686-1736) utilisa, quant à lui, deux points fixes de température. Le premier était celui de fusion de la glace (32 degrés Fahrenheit). Le second était celui du sang dans le corps humain auquel il attribuait la valeur de 96 degrés Fahrenheit. Cette échelle est encore utilisée dans de nombreux pays anglo-saxons. Ce n'est qu'en 1741 que l'échelle centésimale apparut : le Suédois Anders Celsius (1701-1744) considéra le point de fusion de la glace et le point d'ébullition de l'eau comme points fixes et divisa en 100 degrés l'intervalle séparant ces deux points. D'une manière qui peut, aujourd'hui, nous sembler contre-intuitive, il repéra par 100 °C la fusion de la glace et par 0 °C l'ébullition de l'eau. C'est l'inverse qui est effectué de nos jours dans les pays qui n'utilisent pas l'échelle Fahrenheit.

Ainsi, au milieu du XVIII<sup>e</sup> siècle, savait-on enfin mesurer les températures comprises entre celle de solidification et celle de vaporisation du liquide thermométrique. Une difficulté n'était cependant pas réglée : les différents liquides utilisés dans les thermomètres ne se dilataient pas de la même façon en fonction de la température. Pouvait-on, dès lors, définir de façon absolue une échelle de température ? Autrement dit existait-il une température indépendante du fluide thermométrique utilisé ? Nous verrons comment, grâce aux avancées de la thermodynamique, le Britannique William Thomson (1824-1907), anobli en 1892 sous le nom de lord Kelvin of Largs, parvint à définir une telle échelle qui, aujourd'hui, est celle du système international d'unités.

## Température, chaleur et énergie

Même si toutes les questions n'avaient pas été élucidées, l'état des connaissances en matière de thermométrie a permis aux physiciens du XVIII<sup>e</sup> siècle de réaliser des expériences quantitatives pour étudier la chaleur. C'est dans ce contexte que Joseph Black (1728-1799) entreprit de mélanger des quantités différentes de liquides à des températures distinctes. Les liquides qu'il mélangeait étaient isolés thermiquement du milieu extérieur. Black notait scrupuleusement la température d'équilibre dans chacun des cas qu'il étudiait. Il parvint ainsi à conclure que la chaleur constituait un terme d'échange qui passait spontanément d'un corps chaud (dont la température était plus élevée), vers un corps que nous qualifierions de froid (autrement dit de température plus basse). Black, le premier, a d'ailleurs montré qu'un corps pouvait recevoir de la chaleur même si sa température demeurait constante. Ce phénomène peut être observé lorsqu'un corps pur change d'état. Ainsi, la fusion de la glace nécessite-t-elle, pour avoir lieu, un apport d'énergie thermique pour casser les liaisons qui existaient entre molécules d'eau au sein du cristal de glace. Cette énergie est prise dans le milieu extérieur. Il y a donc transfert thermique, même si, pendant toute l'étape de fusion, le bloc de glace reste à température constante. Black a nommé « chaleur latente » l'énergie thermique échangée lors du changement d'état d'un corps pur et il a montré que cette transition de phase s'effectue à température constante lorsque la pression est fixée.

À ce stade, une précision s'impose : si nous venons de parler de la chaleur comme d'un « échange d'énergie », c'est pour utiliser un vocabulaire qui soit correct d'un point de vue physique. Il semble néanmoins utile de prévenir le lecteur de tout anachronisme : en cette fin de XVIII<sup>e</sup> siècle, si les physiciens ont enfin distingué le concept de chaleur de celui de température, ce n'est pas pour autant qu'ils en ont compris la nature. Il faudra, en effet, attendre le XIX<sup>e</sup> siècle pour que James Prescott Joule (1818-1889) montre que la chaleur, tout comme le travail mécanique, correspond à un transfert d'énergie. Ainsi, en 1787, dans un ouvrage commun, Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794), Claude Berthollet (1748-1822), Louis Bernard Guyton de Morveau (1737-1816) et Antoine

François de Fourcroy (1755-1809) écrivaient encore qu'il fallait « distinguer la chaleur (...) du principe matériel qui en (était) la cause. », et ils désignaient ce dernier par le terme de « calorique ».

Pendant quelques décennies, des physiciens, par ailleurs reconnus pour la qualité de leurs travaux, ont ainsi cru pouvoir affirmer qu'il existait une « matière de la chaleur ». Pour les partisans de cette théorie, cette « matière de la chaleur » était un véritable fluide répandu dans les corps qui aurait eu la propriété de pénétrer facilement dans les corps chauds et qui, au contraire, aurait eu du mal à se faufiler à l'intérieur des corps froids... À cette époque, seuls quelques physiciens minoritaires, tels Bernoulli dont nous avons déjà évoqué, au chapitre précédent, les travaux de mécanique des fluides, considéraient la chaleur, non pas comme une entité matérielle mais comme le résultat de mouvements microscopiques au sein de la matière elle-même. Bien que fausse et infondée, c'était pourtant cette théorie du calorique qui était presque uniformément reconnue par la communauté scientifique à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle. Il faudra ainsi attendre que le premier principe de la thermodynamique soit énoncé pour que cette théorie erronée soit définitivement abandonnée.

## Le premier principe de la thermodynamique

Le premier principe de la thermodynamique, qui traduit la conservation de l'énergie et l'équivalence entre le travail et la chaleur, a été énoncé pour la première fois en 1845.

Le médecin allemand Robert Mayer (1814-1878), le premier, en eut l'intuition en 1840 à une époque où certains physiciens étaient encore partisans de la thèse du calorique. Certes, dès la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, l'Américain Benjamin Thompson avait compris que le frottement pouvait engendrer de la chaleur et il avait multiplié les expériences pour ébranler l'hypothèse du calorique. Mais ses travaux, publiés en 1804 sous le titre *Mémoires sur la chaleur* n'avaient pas convaincu ses détracteurs de l'époque.

Quand, en 1840, Mayer commence ses réflexions, il s'intéresse au corps humain. Convaincu que la « chaleur » de ce dernier provient de la conversion de l'énergie chimique des aliments, il envisage de relier le concept de chaleur à celui d'énergie. Ce terme même d'énergie (issu du grec « ergon » qui signifie « action ») n'avait été introduit que depuis peu

de temps dans les écrits de physique : c'est en effet Thomas Young (1773-1829) qui l'avait utilisé pour la première fois en 1807 au cours de ses recherches en optique. Certes, les travaux de mécanique sur les « forces vives » au XVIII<sup>e</sup> siècle avaient, de manière indirecte, permis de progresser sur ce concept, mais l'étude des phénomènes énergétiques et des échanges thermiques ont longtemps semblé décorrélés. Ainsi, c'est le terme de « force » et non le néologisme « énergie » que Mayer utilise lorsqu'il expose le principe général de conservation de celle-ci.

Le premier principe, dans sa formulation actuelle, traduit le fait que pour tout système fermé (qui n'échange donc pas de matière avec le milieu extérieur), on peut définir une fonction qui reste constante lorsque le système est isolé (c'est à dire lorsqu'il n'échange pas d'énergie avec l'extérieur). Cette fonction appelée « énergie totale » est la somme de l'énergie cinétique macroscopique du système, de son énergie interne et de l'énergie potentielle associée aux forces extérieures conservatives qui s'exercent sur lui. Cela signifie aussi que, lorsque le système échange de l'énergie avec l'extérieur, ces échanges d'énergie peuvent revêtir deux formes : soit ils s'effectuent sous forme de travail mécanique (le travail mécanique constitue un échange d'énergie macroscopique), soit sous forme de chaleur (la chaleur constitue un échange d'énergie qui s'opère au niveau microscopique).

Tant que la communauté scientifique n'a pas admis que le travail et la chaleur étaient de même nature, ces deux grandeurs ne se sont pas exprimées dans la même unité. Ainsi, alors que la calorie a longtemps été l'unité de chaleur, le kilogrammètre a été celle du travail. La calorie représentait la quantité de chaleur nécessaire pour éléver de 1 °C la température de 1 gramme d'eau sous une pression atmosphérique normale, tandis que le kilogrammètre représentait le travail nécessaire à l'élévation d'une masse d'un kilogramme à la hauteur d'un mètre.

C'est James Prescott Joule (1818-1889), le premier, qui quantifia le lien qui unissait ces deux grandeurs. Il a, depuis, laissé son nom à l'unité d'énergie utilisée dans le système international d'unité : le joule.

Joule avait comparé le travail fourni par une dynamo et la chaleur dégagée dans le circuit où celle-ci se trouvait. Il trouva que la calorie valait environ 0,45 kilogrammètre. On admet aujourd'hui qu'une calorie (unité encore utilisée par les nutritionnistes) vaut 4,186 joules et qu'un joule vaut

1/9,81 kilogramme-mètre au niveau de la mer. La précision des mesures de Joule était donc particulièrement satisfaisante compte tenu des moyens dont il disposait.

Le premier principe est donc à la fois le principe d'équivalence entre la chaleur et le travail, mais aussi, et surtout, un principe qui traduit la conservation de l'énergie dans l'Univers. Ce principe est fondamental. Il est en effet nécessaire de postuler que l'énergie totale se conserve si l'on veut calculer les échanges énergétiques susceptibles de se produire. Mais ce principe ne saurait suffire pour effectuer ces calculs. Imaginons en effet que l'on mélange dans un récipient calorifugé 1 kg d'eau à 50 °C et 1 kg d'eau à 20 °C. Le premier principe postule que l'énergie totale des deux kilogrammes d'eau doit rester constante. Mais rien dans ce principe n'exclut que l'eau initialement à 50 °C ne reçoive de la chaleur et voit sa température augmenter jusqu'à 60 °C et que celle initialement à 20 °C n'en fournisse et voit la sienne diminuer jusqu'à 10 °C. Seule l'expérience prouve le contraire : chacune des deux masses d'eau atteindra la température d'équilibre de 35 °C. Le premier principe, qui est un principe de conservation, est donc insuffisant pour établir ce résultat. Il ne permet pas d'imposer toutes les conditions requises. Un deuxième principe s'avère donc nécessaire pour prévoir comment évolue un système donné. Le second principe de la thermodynamique sera un principe d'évolution...

## Moteurs thermiques et deuxième principe

Si nous avions voulu suivre rigoureusement la chronologie, nous aurions exposé le second principe avant de parler du premier. Historiquement celui-ci a en effet sa source dans les *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*, œuvre que publia, en 1824, le jeune physicien français Sadi Carnot (1796-1832).

Ce principe impose une nouvelle condition pour qu'une transformation soit réalisable et il permet de prévoir dans quel sens va se produire l'évolution d'un système. Dans sa formulation originelle, ce deuxième principe s'intéressait au fonctionnement optimal des machines à vapeur.

Carnot était partisan de l'interprétation calorique de la chaleur. Ses travaux étaient passés relativement inaperçus et, sans la relecture et la vulgarisation effectuées dix ans plus tard par Clapeyron (1799-1864), et

sans la magistrale exploitation que l'Allemand Clausius (1822-1888) en fit, ils auraient probablement sombré dans l'oubli...

Dans son ouvrage, Carnot a affirmé que

toutes les machines dithermes réversibles ont la même efficacité maximale qui ne dépend que des températures des sources.

De manière générale, une machine thermique fonctionne grâce à un fluide qui subit des transformations. Et c'est au cours de celles-ci que s'effectuent les échanges d'énergie. Si le fluide est tour à tour en contact avec deux thermostats, la machine dans laquelle il circule est qualifiée de « ditherme ». Suivant le sens dans lequel s'effectuent les échanges énergétiques une telle machine est susceptible de fonctionner en moteur ou en récepteur. Dans le cas d'un moteur, le fluide prend de l'énergie thermique à la source chaude et il fournit du travail mécanique au milieu extérieur et de l'énergie thermique à la source froide. Dans le cas d'un récepteur, le fluide transfère au contraire de l'énergie thermique de la source froide vers la source chaude, ce qui implique que le milieu extérieur lui fournisse de l'énergie sous forme de travail, car comme l'a écrit Clausius en 1848 :

la chaleur ne passe pas spontanément d'un corps froid à un corps chaud.

On peut montrer que cet énoncé est totalement équivalent au second principe tel que Carnot l'avait présenté en 1824. Néanmoins, sous cette formulation, il eut un retentissement nettement plus important et la publication de Clausius retint l'attention de la communauté scientifique. Ainsi, c'est parce qu'il fut énoncé sous cette forme en 1848, donc après les travaux que Mayer avait publiés en 1840, qu'on baptisa « deuxième principe » ce principe d'évolution.

Notons qu'il existe plusieurs façons possibles d'exprimer le second principe. Ainsi, en 1852, William Thomson écrivait de son côté que

un système en contact avec une seule source de chaleur ne peut au cours d'un cycle que recevoir du travail et fournir de la chaleur.

Il affirmait ainsi l'impossibilité de construire un moteur monotherme qui convertirait en travail mécanique toute l'énergie thermique que lui fournirait une unique source de chaleur.

L'énoncé moderne du second principe de la thermodynamique permet désormais de démontrer que les trois formulations précédemment citées (celle de Carnot en 1824, celle de Clausius en 1848 et celle de Thomson en 1852) sont rigoureusement équivalentes. Aujourd'hui, les énoncés que nous venons de présenter revêtent avant tout une importance historique : ils témoignent de l'horizon industriel dans lequel s'inscrivaient les recherches théoriques dans le domaine de la thermodynamique au XIX<sup>e</sup> siècle. L'énoncé de Carnot a aussi un statut particulier puisque c'est lui qui a convaincu Thomson (futur Lord Kelvin) qu'il était possible de définir une échelle absolue de température indépendante du fluide thermométrique étudié.

## Irréversibilité et entropie

Visionnaire, doué d'un esprit de synthèse et d'une clairvoyance remarquables, Clausius fut le véritable fondateur de la thermodynamique. C'est dans une publication de 1850 que, pour la première fois, il a étudié les deux principes conjointement, en partant de l'étude du moteur de Carnot. Clausius a ensuite généralisé ce résultat aux systèmes en contact non plus avec deux sources de chaleur, mais avec une infinité de sources et, en 1854, il a montré que le deuxième principe était un principe d'évolution alors que le premier principe était un principe de conservation (de l'énergie).

Le deuxième principe permet, en effet, de statuer sur le caractère possible ou impossible d'une transformation. Rappelons ici l'exemple des deux masses égales d'eau respectivement à 20 °C et 50 °C qui, une fois mélangées, s'équilibreront à 35 °C. On s'accordera sur le fait que, une fois atteinte la température de 35 °C, il n'y a aucune chance que le mélange se scinde en deux masses égales, l'une se refroidissant jusqu'à 20 °C et l'autre se réchauffant jusqu'à 50 °C. C'est le deuxième principe qui permet d'exclure cette éventualité. Ainsi, si l'on filmait l'opération de mélange et si l'on inversait le sens de projection du film, l'image visionnée ne pourrait correspondre à une réalité. De manière générale, toute transformation qui est liée au sens d'écoulement du temps et pour laquelle il est impossible d'inverser la flèche du temps est qualifiée

d'« irréversible ». Toute transformation réelle est, de fait, irréversible, les transformations réversibles ne constituant que des modèles idéaux imaginés pour construire certains raisonnements.

C'est pour parfaire la formulation mathématique de ce principe d'évolution, que Clausius invente en 1854 une fonction  $S$  qu'il baptise « entropie » et dont l'étymologie signifie « se retourner, transformer, changer ». Ainsi, alors qu'étymologiquement le terme d'énergie vient de celui d'action, le terme d'entropie est, quant à lui, lié au concept d'évolution. En 1865 Clausius résume cela en écrivant :

Si l'on cherche pour  $S$  un nom caractéristique, on pourrait lui donner celui de « contenu de transformation du corps ».

et il ajoute :

c'est à dessein que j'ai formé le mot entropie de manière qu'il se rapproche autant que possible du mot énergie car ces deux quantités ont une telle analogie dans leur signification physique qu'une certaine analogie de dénomination m'a paru utile.

La formulation du deuxième principe est aujourd'hui la suivante : Pour tout système fermé (qui n'échange pas de matière avec l'extérieur), il existe une fonction proportionnelle à la quantité de matière dont la variation est égale à la somme d'un terme d'échange et d'un terme de production. La production d'entropie est nulle si la transformation est réversible, strictement positive sinon.

Ainsi, alors que le premier principe traduit la conservation de l'énergie d'un système isolé, le deuxième principe affirme que son entropie ne peut qu'augmenter : l'entropie ne cesse de croître que lorsque l'équilibre est atteint. Le deuxième principe est indissociable de la direction de la flèche du temps. C'est d'ailleurs parce qu'il est si intimement lié au concept de temps et à celui d'irréversibilité, qu'il a alimenté et étayé par la suite de nombreuses réflexions d'ordre philosophique.

## La température absolue

C'est en partant du rendement maximum du moteur de Carnot, indépendant de la nature du fluide utilisé (et uniquement tributaire des températures des deux sources), que Thomson (futur lord Kelvin) a construit l'échelle thermométrique absolue, plus connue aujourd'hui sous

le nom d'échelle kelvin. L'utilisation de cette échelle permettait d'ailleurs de préciser la loi de Boyle-Mariotte relative aux gaz parfaits. Depuis un siècle, on savait en effet que le produit de la pression et du volume d'une quantité donnée de gaz parfait était constant pour une température donnée. En exprimant la température  $T$  en kelvins, on s'aperçut que le produit de la pression et du volume était proportionnel à celle-ci.

L'échelle kelvin est aujourd'hui celle du système international d'unités. En 1954, la valeur 273,16 kelvin a été associée à la température du point triple de l'eau (point où les trois phases de l'eau, solide, liquide et vapeur coexistent à l'équilibre). En outre, un kelvin (1 K) vaut un degré Celsius (1 °C). Le premier des deux points fixes de l'échelle Celsius correspond, quant à lui, au point de fusion de la glace sous la pression atmosphérique normale (c'est à dire 273,15 kelvin). Ainsi, l'échelle kelvin est-elle traduite de 273,15 °C par rapport à l'échelle Celsius : une température de 100 °C correspond à 373,15 K ; une température de 0 °C correspond à 273,15 K. À noter que la référence au point triple de l'eau, adoptée en 1954 pour définir le kelvin, a été abandonnée en 2019 par le bureau international des poids et mesures. Le système international d'unités (souvent désigné par le sigle S.I.) est, en effet, un système évolutif qui reflète les meilleures pratiques du moment en matière de mesure. Au 20 mai 2019, lors de la parution de la neuvième édition de sa brochure, le S.I. comptait cinquante-neuf états membres et quarante-deux états associés. Lors de cette dernière édition, le kelvin a été défini par rapport à la valeur numérique fixée de la constante de Boltzmann  $k_B$ , constante fondamentale, qui, nous le verrons dans le prochain paragraphe, est apparue en thermodynamique à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle. La brochure de la neuvième édition du système international d'unité précise ainsi que :

la constante de Boltzmann,  $k_B$ , est une constante de proportionnalité entre les grandeurs « température » (avec pour unité le kelvin) et « énergie » (avec pour unité le joule), dont la valeur numérique est obtenue à partir de spécificités historiques concernant l'échelle de température.

## La thermodynamique statistique

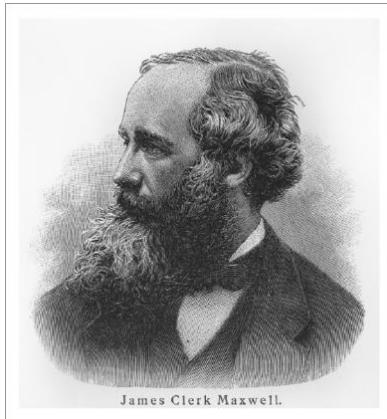
La thermodynamique du XIX<sup>e</sup> siècle s'était construite sur les applications industrielles et sur l'analyse de systèmes étudiés à l'échelle macroscopique ; mais, après la révolution industrielle, les physiciens se

sont demandés comment on pourrait expliquer au niveau microscopique, c'est à dire à l'échelle des molécules des gaz, les résultats observés au niveau macroscopique. Sachant que, sous la pression atmosphérique, un litre de gaz contient quelques dizaines de millions de milliards de milliards de molécules, il ne s'agissait bien évidemment pas d'étudier chaque molécule individuellement. Le but a donc été de tenter d'établir des lois dites statistiques.

Deux obstacles étaient à surmonter.

D'une part, au XIX<sup>e</sup> siècle, l'analyse statistique n'en était qu'à ses débuts et, d'autre part, les scientifiques d'alors ne s'accordaient pas tous sur l'existence des atomes et des molécules. Certes, le chimiste Dalton (1766-1844) avait montré que la théorie atomique permettait de retrouver de nombreux résultats expérimentaux. Certes, à la suite des travaux des Français Charles (1746-1823) et Gay-Lussac (1778-1850), l'Italien Avogadro (1776-1856) avait réussi, en 1811, à montrer que, dans les mêmes conditions de pression et de température, deux volumes égaux de gaz contenaient le même nombre de molécules. Pour autant, certains étaient encore sceptiques sur l'existence de ces particules qui constituaient la matière et qui avaient été baptisées « atomes ». C'est donc dans un contexte de doute que se sont inscrits les premiers travaux sur l'étude cinétique des gaz.

Les premiers modèles utilisés pour rendre compte du mouvement des molécules étaient extrêmement sommaires. C'est le Britannique James Clerk Maxwell (1831-1879) qui, le premier, a posé en 1860 les bases de l'analyse statistique appliquée à la physique. Les travaux de Maxwell s'inscrivaient dans la continuité de ceux de Clausius qui, en 1859, avait introduit la notion de libre parcours moyen (longueur moyenne que parcourt une molécule à vitesse constante entre deux collisions).



James Clerk Maxwell.

Suggestion : gravure de Maxwell libre de droits (10)  
Maxwell (1831-1879)

Dans les années 1870, une difficulté nouvelle apparut lorsque l'on tenta d'interpréter le second principe de la thermodynamique au niveau microscopique : la question de la réversibilité constituait un problème majeur. Il semblait en effet qu'une transformation irréversible à l'échelle macroscopique pût être considérée comme réversible au niveau des molécules. Les équations permettant d'établir les trajectoires des molécules étaient, en effet, parfaitement réversibles (d'un point de vue mathématiques, cela se traduit par le fait qu'elles ne sont pas modifiées lorsque l'on change la variable temporelle  $t$  par son opposé «  $-t$  »). Par ailleurs, le comportement de chacune des molécules était, lui-aussi, *a priori*, réversible. C'est l'Autrichien Ludwig Boltzmann (1844-1906) qui comprit que c'était au niveau de la distribution des particules qu'apparaissait l'irréversibilité. Depuis les travaux de Maxwell, on savait, en effet, que la probabilité qu'une particule se trouve au voisinage d'un point donné avec une vitesse proche d'une valeur donnée était fournie par une fonction appelée « fonction de distribution ». Boltzmann, qui s'intéressait à la distribution statistique des vitesses, s'aperçut qu'en dehors de l'équilibre celle-ci obéissait à une équation qui n'était pas réversible.

Les travaux de Boltzmann furent mal compris par certains membres de la communauté scientifique de son temps. Pourtant, c'est lui qui, dès 1877, dans un ouvrage intitulé *Sur la relation entre le second principe de la*

*thermodynamique et la théorie des probabilités, en rapport avec l'équilibre thermique* parvint à interpréter correctement le concept d'entropie au niveau microscopique. Il sut en effet relier cette grandeur au désordre moléculaire. Grâce aux travaux de Boltzmann, l'Allemand Max Planck (1858-1947) a pu généraliser, dès 1901, l'expression de l'entropie S et établir la formule désormais célèbre qui est retranscrite sur la tombe de Boltzmann à Vienne :

$$S = k_B \ln W$$

Dans cette expression, où apparaît un logarithme népérien,  $k_B$  est une constante fondamentale, que Planck a souhaité que l'on nommât « constante de Boltzmann ». La valeur de cette constante est aujourd'hui fixée à  $1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$ . La lettre grecque W désigne, dans cette formule, le nombre d'états microscopiques (on dit aussi microétats) permettant de réaliser l'état observé à l'échelle macroscopique. La valeur de W est liée à la probabilité qu'un état se réalise et, pour reprendre les mots de Boltzmann :

L'état initial sera très peu probable dans la plupart des cas. Le système évoluera toujours de l'état le moins probable jusqu'à l'état le plus probable, c'est-à-dire vers l'équilibre thermique. En appliquant cela au second principe, nous pouvons identifier la quantité généralement appelée entropie avec la probabilité de cet état.

En introduisant l'entropie statistique, Boltzmann a montré que la production d'entropie, liée à l'irréversibilité, correspond au passage d'un état plus ordonné vers un état moins ordonné.

## La thermodynamique après Boltzmann

À la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, c'est au domaine de la chimie et des équilibres chimiques que s'étend la thermodynamique. Le pionnier de la thermochimie a probablement été l'Américain Willard Gibbs (1839-1903). Dès 1876, ce dernier publia un article contenant les grandes lois des équilibres chimiques qui devaient être redécouvertes ensuite par le Néerlandais van't Hoff (1852-1911) et le Français Henry le Chatelier (1850-1936). Certains travaux de Gibbs portèrent aussi sur la mécanique

statistique : ils posaient ainsi les bases de l'étude des situations de non-équilibre qui allaient être menées au siècle suivant par d'autres physiciens.

L'autre grand nom de la thermochimie est celui du Français Pierre Duhem (1861-1916) qui fut aussi un brillant épistémologue et historien des sciences. Duhem fut celui qui introduisit la notion de potentiel chimique grâce à laquelle il est possible de caractériser et de prévoir les équilibres chimiques ; mais Duhem, qui rêvait de réunir la physique et la chimie dans une thermodynamique généralisée, faisait partie du groupe de ceux qui refusaient la théorie atomique...

Après 1920, c'est sur les situations de non-équilibre que les thermodynamiciens se sont penchés. Les premières études sur les phénomènes irréversibles furent menées à l'université de Yale par le Norvégien Lars Onsager (1903-1968). Onsager s'intéressa aux phénomènes de transport et il parvint à relier les courants caractérisant les états de non-équilibre aux forces généralisées. S'appuyant sur des considérations expérimentales, puis se basant sur une analyse statistique, il fit apparaître des symétries traduisant la réciprocité de ces relations. Il parvint tout d'abord à unifier, dans une seule et même théorie, la conduction de la chaleur qu'avait étudiée expérimentalement Joseph Fourier (1768-1830), la diffusion des particules que l'on analysait depuis 1855 grâce à la loi empirique de Fick (1829-1901), et la conduction électrique sur laquelle avait travaillé Georg Ohm (1789-1854). Onsager étudia aussi les interactions entre ces différents phénomènes de transports et ses travaux lui permirent notamment de comprendre les effets thermoélectriques qui traduisent la conversion réciproque d'énergie électrique en énergie thermique. Ses recherches lui valurent l'attribution du prix Nobel de chimie en 1968.

Dans la deuxième moitié du XX<sup>e</sup> siècle, ce sont les situations très éloignées de l'équilibre, et pour lesquelles il est impossible d'établir des équations linéaires, qui ont été l'objet de nombreuses recherches. La thermodynamique non linéaire a réservé des surprises. On s'est aperçu notamment que, dans certaines situations, un milieu matériel pouvait passer d'un état moins ordonné à un état plus ordonné. De ce fait, il n'est pas étonnant que le deuxième principe de la thermodynamique ait

passionné de nombreux philosophes. Dans *L'évolution créatrice* Bergson (1859-1941), avait déjà interprété le second principe de la thermodynamique comme

la plus métaphysique des lois de la physique, en ce qu'elle nous montre du doigt, sans symboles interposés, sans artifices de mesure, la direction où marche le monde.

Plusieurs philosophes et physiciens se sont aussi demandés dans quelle mesure l'apparition de structures particulièrement ordonnées (acides aminés, molécules d'ADN, organismes vivants, organismes vivants intelligents) qui traduit le fait que l'ordre peut apparaître dans certaines parties de l'Univers, s'accompagnait d'une augmentation, plus grande encore, du désordre dans d'autres parties de celui-ci. Le Belge Ilya Prigogine (1917-2003) s'est employé à prouver que l'apparition, à un niveau local, de davantage d'ordre ne contredisait pas le second principe. Il souligna pour cela l'importance des fluctuations qui sont susceptibles de s'amplifier jusqu'à perturber l'état macroscopique et engendrer une « bifurcation » vers un autre état macroscopique encore plus organisé. Il obtint le prix Nobel de chimie en 1977. La thermodynamique non linéaire pourrait donc s'appliquer à la biologie : la notion de vivant, qui correspond à un degré d'organisation exceptionnel de la matière, pourrait résulter du rôle constructif de certains processus irréversibles lorsque l'on se trouve loin de l'équilibre. Il est clair que le fait de s'interroger sur la nature de l'auto-organisation que présuppose la vie soulève des questions philosophiques liées aux notions d'ordre mais aussi de contingence et de finalité. Ces questions dépassent largement le cadre de cet ouvrage.

# L'électromagnétisme

## Les origines

Certains écrits grecs traduisent l'intérêt et l'étonnement des peuples de l'Antiquité face aux phénomènes électrostatiques et magnétiques. Ainsi, sept siècles avant notre ère, Thalès de Milet (640-562) évoquait-il le fait que l'ambre jaune, une fois frottée, attirait des corps légers. Cet exemple revêt une importance particulière puisque c'est ce matériau, dont le nom grec est « *électron* », qui a servi de racine étymologique à toute une science qui ne se développa vraiment qu'au XVIII<sup>e</sup> siècle.

Dans le domaine de la magnétostatique, aussi, Thalès avait scrupuleusement noté ses remarques. Il avait, en effet, observé que la magnétite avait la faculté d'attirer le fer. Mais il ne sut pas expliquer pourquoi.

Par la suite, les phénomènes dus aux effets électrostatiques ou magnétostatiques ont particulièrement fasciné les hommes. Leur imagination à ce sujet a été très grande : la boussole, apparue au III<sup>e</sup> siècle après J.-C. chez les Asiatiques, a, pendant un millénaire, été utilisée uniquement pour tenter de prévoir l'avenir et ce n'est donc qu'au XIII<sup>e</sup> siècle que l'on a commencé à utiliser cet instrument pour la navigation... Au XVI<sup>e</sup> siècle encore, on prêtait aux forces magnétiques toutes sortes de vertus. Kepler les croyait responsables du mouvement des planètes qu'il avait pourtant si bien étudié et décrit. Dans son ouvrage *De Magnete* le médecin et physicien anglais Gilbert (1544-1603), qui, pour expliquer les différences d'inclinaison des aiguilles aimantées en divers points du globe, avait compris que la Terre était un gigantesque aimant, croyait tout de même que c'était cette « *vertu magnétique* » qui permettait à notre planète de tourner sur elle-même.

Ainsi, à la fin du XVI<sup>e</sup> siècle, l'étude de ces phénomènes était encore à éclaircir.

## Premières théories

C'est au XVII<sup>e</sup> siècle que, pour la première fois, a été produite de l'électricité statique. En 1660, l'Allemand Otto von Guericke (1602-1686), grand expérimentateur qui s'était aussi distingué par ses recherches sur le vide, a l'idée de monter une boule de soufre en rotation sur un axe horizontal et de la frotter. C'est lui qui, le premier, met ainsi en évidence les effets répulsifs que peut engendrer l'électricité. Il a aussi l'idée de comparer les étincelles produites par sa machine avec les éclairs qui naissent dans le ciel lors des orages. En 1750, enfin, Benjamin Franklin (1706-1790), à l'aide de paratonnerres et de cerfs-volants, parvient à recueillir cette électricité et démontre ainsi la nature électrique de la foudre.

Au début du XVIII<sup>e</sup> siècle, certains physiciens ont imaginé l'existence de deux sortes d'électricité : l'électricité « vitrée » produite lorsque l'on frotte un bâton de verre et l'électricité « résineuse » apparaissant sur les bâtons de résine. On sait aujourd'hui que ces deux types de matériau ne se chargent pas de la même façon lorsqu'ils sont frottés, mais, à l'époque, les recherches qui furent menées privilégièrent le concept de « fluide électrique » à celui de charge élémentaire. En effet, en ce milieu de XVIII<sup>e</sup> siècle, le cheminement intellectuel des scientifiques était encore loin de manipuler la notion d'atome électriquement neutre ou celle d'électron... Il faudra d'ailleurs attendre 1897 pour connaître les caractéristiques de cette particule dont Joseph John Thomson (1856-1940) mesurera le rapport de la masse sur la charge grâce à un tube de cathodique, ce qui lui vaudra l'attribution du prix Nobel de physique en 1906.

Ainsi, pendant plusieurs décennies, deux théories, toutes deux basées sur la notion de « fluide électrique » se sont affrontées.

Les partisans de la première pensaient, à l'instar de Benjamin Franklin, que l'électricité était formée de particules qui constituaient un fluide capable de se propager dans les métaux et d'être « pompée » à l'extérieur. Ils croyaient que la matière était constituée de particules qui s'attiraient mutuellement et que le « fluide électrique » ne comportait que des particules répulsives. Ainsi, l'excès ou le défaut de fluide électrique à l'intérieur d'un corps donné leur permettait d'interpréter et d'expliquer la charge électrique globale de ce dernier. Cette théorie du fluide unique fut

défendue notamment par le Britannique Henry Cavendish (1731-1810) devenu historiquement célèbre pour ses travaux de chimie, discipline dont il fut l'un des pères fondateurs.

La seconde théorie, basée elle-aussi sur la notion de « fluide électrique », presupposait, quant à elle, l'existence, dans la matière, de deux fluides présents en quantités identiques dans les corps neutres. D'après ses partisans, c'était le déplacement de l'un de ces deux fluides, attiré par la présence d'un corps électrisé, qui expliquait les phénomènes d'électrisation par influence que Stephen Gray (1666-1736) avait mis en évidence au siècle précédent. Entre les deux théories qui s'affrontaient, ce fut cette dernière qui eut le plus de succès à sein de la communauté scientifique. C'est d'ailleurs celle qu'utilisa le Français Charles Augustin Coulomb (1736-1806) dans ses écrits, même s'il montra aussi que la théorie du fluide unique et celle des deux fluides étaient mathématiquement équivalentes.

Au XVIII<sup>e</sup> siècle, les recherches en électricité n'évoquaient pas encore l'existence des charges élémentaires. Pour autant, Coulomb et Cavendish, sont parvenus à préciser de nombreuses notions dans le domaine de l'électrostatique et leur habileté expérimentale leur a permis de réaliser des avancées spectaculaires dans la compréhension de ce que représentait vraiment la charge électrique. Rappelons que, à cette époque, les domaines de la physique n'étaient pas cloisonnés et les chercheurs étaient souvent des polymathes ou, tout au moins, des scientifiques pluridisciplinaires.

Coulomb, qui était aussi ingénieur et dont l'histoire a essentiellement retenu les travaux d'électrostatique, s'était lui-aussi distingué par ses recherches de mécanique notamment sur les frottements et sur les pendules de torsion. L'esprit de Coulomb était empreint des résultats établis au siècle précédent par Isaac Newton. Rappelons que ce dernier avait montré que l'interaction de gravitation résultait de l'action à distance de deux corps de masses non nulles et que l'intensité de cette force était inversement proportionnelle au carré de la distance qui les séparent. En 1780, la prédominance de la pensée newtonienne au sein de la communauté scientifique était immense. Cela poussa Coulomb à envisager l'hypothèse d'une interaction formellement analogue entre deux charges électriques. Coulomb était un expérimentateur brillant :

pour mesurer la force s'exerçant entre deux corps de charges données, il a utilisé la balance de torsion qu'il avait lui-même conçue : il a, en effet, eu l'idée de fixer l'une des deux charges et de compenser, à l'aide d'un couple de torsion, la force que la seconde charge exerçait sur la première. Coulomb ne disposait pas de charges ponctuelles : il réalisait ses expériences avec des épingle à grosse tête plantées dans de la cire. Malgré la relative imprécision de ses mesures, il parvint, malgré tout, à établir que l'intensité de la force s'exerçant entre les deux charges était proportionnelle au produit de ces charges et inversement proportionnelle au carré de la distance les séparant. Il montra aussi que la direction qui portait cette force était celle de la droite reliant entre elles les deux charges étudiées. Coulomb introduisit ainsi une nouvelle interaction formellement analogue à l'interaction de gravitation. Mais, alors que l'interaction gravitationnelle est toujours attractive, l'interaction coulombienne n'est attractive qu'entre deux charges de signes opposées et elle est répulsive entre deux charges de mêmes signes.

À une époque où les théories du fluide ou des fluides électriques étaient d'actualité, l'expression de la force électrostatique permit, pour la première fois, de comprendre ce que représentait la charge électrique. C'est en ce sens que l'on peut considérer, comme l'a fait plus tard le mathématicien et physicien allemand Carl Friedrich Gauss (1777-1855), que c'est Coulomb qui, le premier, a vraiment su définir ce concept. Notons d'ailleurs que l'unité de charge électrique est aujourd'hui encore le coulomb dans le Système International d'unités.

Cavendish, quant à lui, avait été reconnu de son vivant pour ses travaux en chimie. Une grande part de ces derniers avait été traduite en français par Marie-Anne Pierrette Paulze (1758-1836) qui était l'épouse et collaboratrice du chimiste français Antoine Lavoisier (1743-1794). Contrairement à ses écrits de chimie, son œuvre, dans le domaine de l'électricité, n'avait pas été publiée dans son intégralité : la majeure partie de celle-ci serait restée inconnue si James Clark Maxwell (1831-1871) ne l'avait révélée à la communauté scientifique au siècle qui suivit.

Cavendish fut tout d'abord celui qui étudia la répartition du « fluide électrique », autrement dit des charges électriques, dans les conducteurs. Il s'aperçut notamment que celles-ci étaient localisées à leur surface. Son contemporain Coulomb avait, lui aussi, établi ce résultat mais Cavendish

était allé plus loin dans cette étude. C'est, en effet, à ce dernier que l'on doit l'analyse théorique des condensateurs et la notion de potentiel électrostatique. La bouteille de Leyde, inventée aux alentours de 1745, avait déjà suscité l'intérêt de physiciens de la génération précédente comme Benjamin Franklin. Ancêtre du condensateur, cette bouteille de verre permettait de stocker une certaine charge électrique. À moitié remplie d'eau, elle était obturée par un bouchon de liège percé d'une fine tige métallique immergée dans l'eau à l'une de ses extrémités. La tige était mise en contact avec un générateur électrostatique. Les charges emmagasinées pouvaient, par la suite, être restituées, ce qui permettait d'obtenir un courant électrique pendant un bref instant.

Les dispositifs de stockage de charge électrique furent, par la suite, améliorés. De manière générale, un condensateur est formé de conducteurs métalliques voisins (on parle d'armatures) séparés par un isolant appelé diélectrique. Si l'un des deux conducteurs entourent totalement ou presque totalement l'autre, le condensateur est qualifié de « fermé » et les charges des armatures sont opposées l'une à l'autre. C'est Cavendish, le premier, qui s'aperçut que la charge emmagasinée sur l'une des armatures d'un tel condensateur était proportionnelle à la différence de potentiel – il employait alors le terme de « degré d'électrification » – qui existait entre les deux armatures. La constante de proportionnalité était la capacité du condensateur. Cette grandeur physique s'exprime aujourd'hui en farad, unité dont le nom a été créé à partir de celui du physicien anglais Michael Faraday (1791-1867), qui lui-aussi, marquera l'histoire de l'électromagnétisme.

Cavendish fut également celui qui, cinquante ans avant Georg Ohm (1789-1854), s'est intéressé à la résistance de certains corps et il fut sur le point d'établir la loi de proportionnalité «  $U = RI$  » qui porte aujourd'hui le nom du savant allemand.

Les travaux de Cavendish et de Coulomb ont indubitablement marqué leur siècle. Il est néanmoins probable que ces deux hommes seraient encore allés plus loin s'ils avaient disposé de générateurs plus performants. Rappelons en effet qu'à cette époque c'est uniquement en reliant les armatures d'un condensateur, lui-même chargé par un générateur électrostatique, que l'on pouvait obtenir un courant électrique...

## D'Oersted à la naissance de l'électromagnétisme

Dès le XVI<sup>e</sup> siècle, certains navigateurs avaient remarqué que la foudre perturbait l'orientation de leurs boussoles. Ils évoquaient aussi des cas où celle-ci parvenait à aimanter certains ustensiles en fer. Des scientifiques s'étaient alors interrogés sur un éventuel lien entre les phénomènes électriques et les phénomènes magnétiques, mais, tant que l'on a cru qu'il existait un ou plusieurs fluides purement électriques, il semblait inconcevable d'envisager sérieusement une telle hypothèse. Aussi, cette question cessa assez rapidement de passionner les esprits et, au début du XIX<sup>e</sup> siècle, elle n'était même plus évoquée dans les manuels de physique. En outre, les moyens expérimentaux dont on disposait pour produire de l'électricité étaient rudimentaires. Certes les machines électrostatiques avaient été améliorées, mais tant que l'on n'a pas su produire des courants électriques à volonté sur des durées importantes, il a été quasiment impossible d'étudier réellement les liens entre l'électricité et le magnétisme.

L'année 1800 marqua en ce sens un tournant décisif.

Depuis 1798, Alessandro Volta (1745-1827) réfléchissait à l'expérience de Luigi Galvani (1737-1798) qui avait observé que les membres d'une grenouille dont deux parties du corps étaient reliées par un arc métallique se contractaient. Il savait aussi qu'en plaçant la langue entre deux métaux différents reliés par un fil métallique, on éprouvait une étrange sensation de picotement. Volta pensait alors que l'on pouvait obtenir de l'électricité grâce à des paires de disques formées par l'association de deux métaux différents. Il espérait, de plus, qu'il serait possible de cumuler les effets de plusieurs disques en empilant ces derniers. Il essaya à plusieurs reprises. En vain. Volta eut finalement l'idée d'interposer dans cette « pile » de disques des bouts de tissus humidifiés avec de l'eau salée. La pile Volta venait de naître. À partir de cette date on se mit à parler d'électricité circulante, par opposition à l'électricité statique qui était la seule que l'on savait produire jusqu'alors.

Véritable révolution dans l'étude des courants électriques, la pile permit d'étudier leurs liens avec les effets caloriques mais aussi leur action sur les métaux et les solutions aqueuses. Les premiers travaux sur l'électrolyse portèrent sur la décomposition électrochimique de l'eau en

oxygène et en hydrogène. On les doit à l'Anglais Humphry Davy (1778-1829) qui fut aussi celui qui produisit, en 1810, le premier arc électrique, véritable petit éclair réalisé dans un laboratoire.

Il était désormais clair que l'électricité était liée aux phénomènes calorifiques, lumineux et chimiques. On se demanda alors à nouveau quels étaient les liens qu'elle était susceptible d'avoir avec le magnétisme. Ainsi, quand Hans Christian Oersted (Ørsted) (1777-1851) a réalisé l'expérience décisive portant sur ce point, les esprits étaient enfin prêts à examiner sérieusement cette hypothèse. En ce sens, nombreux sont ceux qui ont écrit que les travaux du physicien danois sont arrivés au bon moment.

L'expérience historique qu'Oersted réalisa et qui a marqué la naissance de l'électromagnétisme date de 1820. Elle est encore présente dans les manuels de physique actuels.

Oersted avait placé une aiguille aimantée parallèlement à un fil conducteur. Il fit circuler un courant électrique dans le fil et il observa une déviation de l'aiguille aimantée. Rappelons que les termes de « courant électrique » et d'« intensité » n'existaient pas encore à l'époque où il réalisa cette expérience puisque André-Marie Ampère (1775-1836) ne les avait pas encore inventés ! Oersted avait aussi constaté que lorsque l'on inversait le sens de branchement du fil sur la pile, autrement dit lorsque l'on inversait le sens du courant, la déviation de l'aiguille s'effectuait dans l'autre direction. Enfin, il avait noté que cette déviation était d'autant plus grande que la « puissance de l'appareil galvanique » (tel était le terme qu'il employait pour désigner l'intensité du courant) était importante.

Lorsque Oersted publia ses résultats, certains de ses contemporains ne le prirent pas au sérieux, recherchant l'erreur qui permettrait d'expliquer le phénomène observé. Deux physiciens français portèrent néanmoins un intérêt tout particulier à ses travaux : Ampère, dont nous avons déjà cité le nom, et Arago (1786-1863) dont les publications au cours des années 1820 et 1821 allaient être particulièrement nombreuses. Arago, déjà célèbre pour avoir prolongé la mesure du méridien Dunkerque-Barcelone et pour ses travaux d'optique sur la polarisation, fut le premier à s'enthousiasmer. C'est lui qui sut éveiller l'intérêt d'Ampère, alors connu pour ses travaux de mathématiques et de chimie. Les deux savants se mirent au travail. Dès le dix-huit septembre 1820, Ampère s'aperçut que

l'effet sur l'aiguille aimanté ne se limitait pas à la rotation de cette dernière : le fil l'attirait aussi vers lui. Le vingt-cinq septembre, nouvelle publication : ayant eu l'idée de réaliser un enroulement serré de fil électrique de forme cylindrique, Ampère avait noté que la bobine ainsi réalisée se comportait comme un aimant avec un pôle nord et un pôle sud.



Gravure de Ampère libre de droits (celle de la couverture) (6)  
Ampère (1775-1836)

Le mois suivant, dans une communication transmise le neuf octobre à l'Académie des sciences, Ampère s'intéresse au cas de deux fils électriques parallèles, montrant que ces derniers se repoussent s'ils sont parcourus par des courants de même sens et s'attirent dans le cas contraire. Cette expérience revêt une importance particulière : quand, en 1948, le comité international des poids et mesures a voulu définir rigoureusement l'unité du système international pour le courant électrique, l'ampère fut présenté comme

l'intensité d'un courant constant qui, s'il est maintenu dans deux conducteurs linéaires et parallèles, de longueurs infinies, de sections négligeables et distants d'un mètre dans le vide, produit entre ces deux conducteurs une force linéaire égale à  $2 \times 10^{-7}$  newton par mètre.

À noter que cette définition n'est plus d'actualité dans la mesure où, depuis la parution, le vingt mai 2019, de la neuvième édition de sa brochure, le système international d'unité a défini l'ampère en prenant la valeur numérique fixée de la charge élémentaire, e, égale à 1,602 176 634  $\times 10^{-19}$  coulomb, (unité égale à l'ampère seconde).

Même si la définition de l'ampère a récemment été modifiée, l'expérience que nous venons d'évoquer a marqué l'histoire des sciences. C'est d'ailleurs à la suite de celle-ci qu'Ampère a créé deux néologismes pour que le vocabulaire permette de distinguer *l'électrostatique* où les charges étudiées restent confinées au même endroit, de *l'électrodynamique* où ces mêmes charges se déplacent et créent des courants électriques. Et, peu de temps plus tard, le seize octobre 1820, dans une communication réalisée avec Arago, Ampère a montré qu'il était aussi possible de fabriquer un aimant artificiel en plaçant un objet de fer doux à l'intérieur d'une hélice parcourue par un courant.

L'étude de la force magnétique, créée par le fil électrique de l'expérience d'Oersted, mobilisa les esprits pendant les années qui suivirent et ébranla de nombreuses certitudes. Newton avait fourni l'expression de l'interaction de gravitation et Coulomb celle de la force s'exerçant entre deux charges ponctuelles. Nombreux étaient ceux qui s'attendaient à ce que la force créée par le courant électrique présente les mêmes similitudes que ces dernières. Mais cela ne fut pas le cas : la force qu'une petite portion du fil exerce sur un pôle de l'aiguille aimantée n'est pas dirigée suivant la ligne qui relie la portion de fil et l'aiguille.

Au contraire : elle lui est perpendiculaire. À une époque où la mécanique céleste triomphait, alors que Coulomb avait mis en évidence une interaction formellement analogue à l'interaction gravitationnelle, il était difficile d'envisager une interaction dont la nature fût à ce point différente de celle que Newton avait découverte.

Il fallut alors trouver l'expression de cette force.

Une véritable course s'engagea sur cette question entre Ampère et Jean-Baptiste Biot (1774-1862). C'est finalement Biot qui, en collaboration avec Félix Savart (1791-1841), fut le premier à calculer la force qu'exerce, sur un aimant, un fil infiniment long parcouru par un courant. Cette force est perpendiculaire à la direction du fil et à la droite normale au fil passant par le pôle magnétique sur lequel elle s'exerce.

En quelques mois on était ainsi parvenu, non seulement, à établir le lien entre phénomènes électriques et magnétiques, mais aussi, à définir les concepts de courant électrique, à construire des appareils de mesure (le premier galvanomètre date de 1821 et on le doit à Ampère), à aimanter le fer et à calculer les forces magnétiques.

Tout était allé très vite. Pour autant, la naissance de l'électromagnétisme n'en était qu'à ses débuts.

## L'induction électromagnétique

Des phénomènes s'expliquant par l'induction électromagnétique avaient été observés par Ampère en 1822 et Arago en 1824 mais ces derniers n'étaient pas parvenus à expliquer leurs expériences. Les travaux de Faraday (1791-1867) allaient être décisifs sur ce point.

Faraday avait constaté que lorsque l'on approchait brusquement un aimant d'un solénoïde (c'est à dire d'un enroulement de fil conducteur), alors un courant électrique s'établissait dans le circuit du solénoïde. Si, par la suite, on éloignait cet aimant, il apparaissait un courant de sens contraire. De plus, Faraday avait remarqué que le courant disparaissait dès que le mouvement de l'aimant cessait. Il avait aussi noté que le sens du courant induit par le mouvement de l'aimant dépendait du pôle que l'on approchait.

Mais les observations de Faraday ne s'étaient pas arrêtées là : il s'était aussi aperçu que l'apparition d'un courant induit n'impliquait pas forcément le mouvement d'un circuit par rapport à un autre. La naissance d'un courant induit pouvait, en effet, être observée soit lorsque le circuit était en mouvement par rapport à un champ magnétique constant, soit lorsqu'il était immobile dans un champ magnétique variable. Ainsi, l'apparition d'un courant induit était la conséquence d'une variation du flux du champ magnétique.<sup>2</sup>

Les ingénieurs de l'époque ont mis peu de temps avant de percevoir les retombées techniques fantastiques de ces phénomènes d'induction que l'on venait de découvrir : les premiers moteurs électriques et les premiers alternateurs étaient désormais prêts à naître et on allait pouvoir convertir l'énergie mécanique d'un mouvement en énergie électrique et réciproquement. Le principe de ces machines repose en effet sur le mouvement relatif d'une source de champ magnétique par rapport à un circuit.

C'est plus précisément aux alentours de 1865 que les génératrices de courant continu prirent de l'importance. La première dynamo, conçue par le Belge Zénobe Gramme (1826-1901), comprenait, d'une part, un circuit

« inducteur », qui était constitué d'un aimant ou d'un électroaimant, et, d'autre part, un « induit », formé d'un fil métallique enroulé sur un anneau de fer doux qui pouvait tourner dans l'entrefer de l'aimant.

Les premiers alternateurs, autrement dit les premiers appareils produisant du courant alternatif, apparurent simultanément aux Etats-Unis et en Europe à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle. Leur principe de fonctionnement repose aussi sur le phénomène d'induction électromagnétique : lorsque la direction du champ par rapport à l'induit varie périodiquement au cours du temps – c'est le cas, par exemple, si l'aimant tourne à vitesse constante – alors le flux, lui aussi, varie périodiquement et le courant produit est un courant alternatif. Le premier brevet fut déposé en 1888 par Nikola Tesla (1856-1943) et c'est à partir de cette date que les alternateurs prirent toute leur ampleur à l'échelle industrielle. Les alternateurs possédaient pour la plupart un induit fixe, appelé stator, et un inducteur mobile, appelé rotor. L'inducteur était souvent entraîné par une machine à vapeur. Ainsi, l'énergie thermique était-elle convertie par la machine à vapeur en énergie mécanique et cette énergie mécanique était à son tour convertie par l'alternateur en énergie électrique...

Notons que les phénomènes précédemment décrits sont réversibles et qu'il est possible de produire un mouvement à partir d'énergie électrique. Ce phénomène fut découvert de manière fortuite, en 1873, lors de l'exposition internationale d'électricité qui se tenait à Vienne. Un ingénieur s'aperçut, en envoyant inopinément un courant dans la machine de Gramme, que l'induit de celle-ci se mettait à tourner : cette machine pouvait donc aussi fonctionner en mode récepteur et convertir l'énergie électrique en énergie mécanique. L'électricité pouvait donc être utilisée pour générer un mouvement : on pourrait donc fabriquer des moteurs électriques.

## La théorie électromagnétique - L'œuvre de Maxwell et Hertz

C'est dans la deuxième moitié du XIX<sup>e</sup> siècle que l'Écossais Maxwell (1821-1879), dont nous avons déjà cité le nom en évoquant la thermodynamique statistique, a introduit les concepts de champ électrique et de champ magnétique qui nous sont aujourd'hui familiers.

En 1831, Faraday avait déjà approché cette notion lorsqu'il avait eu l'idée de saupoudrer de limaille de fer le voisinage d'un aimant. Dans une telle expérience, chaque grain de limaille s'aimante par influence et s'oriente comme le ferait une minuscule aiguille aimantée. La disposition des grains de limailles, leur espacement ou leur concentration, mais aussi l'orientation qu'ils ont tendance à adopter, fournissent une cartographie de l'influence magnétique régnant en chaque point. Dans ses travaux, Faraday avait nommé ces tracés « courbes magnétiques » puis « lignes de forces » et c'est finalement Maxwell qui les appellera « lignes de champ magnétique ».

La prouesse de Maxwell fut d'établir quatre équations qui, non seulement résumaient toutes les connaissances dont on disposait alors en électromagnétisme, mais qui allaient aussi permettre d'établir des résultats nouveaux.

Depuis les travaux de Faraday on savait qu'une variation du flux du champ magnétique induisait l'apparition d'un courant dans un circuit fermé. La première équation de Maxwell, appelée souvent équation de Maxwell-Faraday, traduit mathématiquement ce phénomène. Cette première équation de Maxwell est indépendante du milieu dans lequel on étudie le champ électromagnétique. Il en va de même pour la deuxième équation qui traduit une propriété du flux du champ magnétique. Ainsi, les deux premières équations de Maxwell portent sur la structure propre du champ électromagnétique. Les deux dernières équations traduisent, quant à elles, le lien existant entre le champ électromagnétique et les différentes charges fixes ou mobiles qui se trouvent dans le milieu étudié. La troisième équation, dite de Maxwell-Gauss, exprime au niveau local un résultat proposé par Carl Friedrich Gauss (1777-1855) qui a montré qu'il existait un lien entre le flux du déplacement électrique à travers une surface fermée et la charge contenue dans l'espace délimité par celle-ci. La quatrième équation, appelée encore équation de Maxwell-Ampère, relie les variations spatiales du champ magnétique, les variations temporelles du déplacement électrique et les courants électriques présents dans le milieu.

Les équations de Maxwell n'ont pas seulement synthétisé les connaissances dont on disposait alors. Leur résolution mathématique a aussi révélé que le champ électrique et le champ magnétique obéissaient

tous deux à une équation analogue à l'équation de propagation d'une onde. Rappelons en effet que, en 1747, d'Alembert avait, pour la première fois, établi ce type d'équation en étudiant la propagation d'un ébranlement sur une corde. Il s'agissait alors d'ondes mécaniques.

D'autres ondes avaient aussi été étudiées en physique. Les ondes sonores, sujet de base de l'acoustique, avaient notamment intéressé Galilée qui avait appréhendé le concept de fréquence. Une théorie mathématisée des ondes sonores avait ensuite été développée par Newton, mais elle n'avait été parachevée qu'au XVIII<sup>e</sup> siècle par Euler (1707-1783), Lagrange (1735-1813) et d'Alembert (1717-1783). Ces ondes avaient un support matériel : c'est en effet une surpression se propageant dans l'air (ou dans tout autre milieu) qui constitue un son. Le son ne peut donc progresser dans le vide : c'est donc pour cela que le vide interplanétaire est un univers silencieux.

À la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, on venait de découvrir les ondes électromagnétiques, mais le milieu matériel dans lequel ces dernières se propageaient n'était pas clairement identifié : il semblait quelque peu mystérieux et avait été baptisé « éther ».

Dans le chapitre relatif à la physique moderne, nous verrons comment les physiciens du XX<sup>e</sup> siècle ont pu montrer que cet hypothétique « éther » n'avait aucune existence réelle et que, contrairement aux autres types d'ondes, les ondes électromagnétiques se propagent dans le vide.

C'est la résolution mathématique de l'équation de propagation des ondes électromagnétiques qui a permis à Maxwell de déterminer leur vitesse de propagation. Le physicien britannique a, en effet, établi que la célérité des ondes électromagnétiques était rigoureusement égale à celle de la lumière. De son vivant, Maxwell n'a jamais pu vérifier expérimentalement ce qu'il avait découvert mathématiquement. En effet, on ne fut capable de produire et de capter des ondes électromagnétiques de grande longueur d'onde qu'en 1887, grâce aux travaux de l'Allemand Hertz (1857-1894). Maxwell avait néanmoins eu le génie d'extrapoler son résultat. Il avait, en effet, affirmé que la lumière et les ondes électromagnétiques, par leur nature, partageaient bien plus qu'une même vitesse de propagation. Ainsi, comme l'a écrit Louis de Broglie (1892-1987), il avait eu

l'idée magnifique que la lumière est une perturbation électromagnétique et que toute la théorie de la lumière doit être contenue dans les équations de l'électromagnétisme.

Grâce aux travaux de Maxwell, l'optique devenait, dès lors, une branche de l'électromagnétisme...

---

2. La définition rigoureuse du flux d'un vecteur impose l'utilisation de notations mathématiques qui n'ont pas leur place dans cet exposé. L'écoulement d'un fluide dans un tube permet toutefois d'illustrer physiquement ce que représente cette grandeur : le flux du vecteur « vitesse d'écoulement » à travers une section donnée représente le débit volumique de l'écoulement à travers celle-ci. Plus généralement, pour tout champ de vecteur utilisé en physique et pour toute surface, il est possible de calculer le flux du champ à travers cette surface et cette grandeur a la dimension d'une surface multipliée par le champ de vecteur considéré.

# L'optique

Science liée à la lumière, l'optique s'intéresse à la façon dont la lumière se propage et véhicule diverses informations. Il s'agit non seulement de décrire la propagation des rayons lumineux, la formation des images, mais aussi de comprendre la nature même de la lumière et des couleurs.

## Les origines

Les premières théories d'optique assimilaient la lumière à un « feu ». Pour autant, tous les physiciens de l'Antiquité ne s'accordaient pas sur l'origine de ce feu. Les philosophes atomistes dont Leucippe de Milet (V<sup>e</sup> siècle av. J.-C.), puis Epicure (342 av. J.-C., 270 av. J.-C.) ou, plus tard, le Latin Lucrèce (98 av. J.-C., 55 av. J.-C.) , pensaient que la lumière était dans la nature même des objets. Cette théorie, dite du « feu externe », supposait que les particules constituant la lumière possédaient les mêmes caractéristiques que les objets. D'autres savants attribuaient, quant à eux, un rôle actif à l'œil et considéraient que ce dernier émettait un « feu visuel » grâce auquel la vision était possible. C'est ce mode de raisonnement qu'utilisa notamment Euclide (vers 325 av. J.-C. – vers 265 av. J.-C.) dans son *Optique* et sa *Catoptrique*.

Les Arabes, aussi, ont, par la suite, porté un grand intérêt à l'optique.

Ils avaient traduit les textes grecs d'Aristote, Euclide et Ptolémée. Ils avaient aussi en leur possession les écrits de Héron d'Alexandrie (I<sup>er</sup> siècle après J.-C.) qui avait étudié la réflexion de la lumière sur les miroirs.

Alhazen (965-1039), de son vrai nom Ibn al-Haytham, fut le premier à distinguer les concepts de vision et d'éclairement et à affirmer qu'il existait une lumière indépendante des moyens de vision : si un objet est visible c'est parce qu'un rayon lumineux issu de celui-ci se dirige vers

l'œil de l'observateur et non l'inverse. Ainsi, les rayons ne partent pas des yeux – comme le croyaient les savants de l'Antiquité – mais, au contraire, c'est vers la rétine qu'ils convergent.



Gravure de Alhazen libre de droits (celle de la couverture) (4)  
Ibn al-Haytham (Alhazen) (965-1039)

Cette découverte d'Alhazen illustre l'esprit critique de ce savant arabe comme en témoignent aussi ses mots :

Une personne qui étudie les livres scientifiques en vue de connaître la vérité, devrait se transformer en un critique hostile de tout ce qu'il étudie... Il devrait le critiquer à tous les points de vue et sous tous ses aspects. Et, engagé ainsi dans l'esprit critique, il devrait aussi se méfier de lui-même et ne pas se permettre d'être laxiste et indulgent envers l'objet de sa critique.

L'œuvre d'Alhazen a été immense : il a précisé les lois de réflexion des miroirs non plans en montrant que le rayon réfléchi et le rayon incident se trouvaient dans le même plan que la normale au miroir et, par la suite, ses travaux ont inspiré ceux de Kamāl al-Dīn al-Fārisī (1267-1320) qui, trois siècles après lui, réussira à analyser le phénomène des arcs-en-ciel.

Tandis que ces travaux théoriques majeurs étaient menés au sein du monde arabe, de nouveaux instruments optiques voyaient le jour en Occident.

À la fin du XIII<sup>e</sup> siècle, sont fabriquées à Florence les premières lunettes de vue correctrices et, au XVI<sup>e</sup> siècle, les premiers instruments grossissants sont conçus. Nous avons déjà eu l'occasion d'évoquer les

lunettes astronomiques, inventées aux Pays-Bas, dont un modèle fut construit par Galilée en 1610. Elles permirent des avancées majeures en astronomie. Les microscopes, quant à eux, sont apparus entre 1591 et 1608 et ils allaient ouvrir la voie à des découvertes notables dans le domaine de la biologie.

## Le XVII<sup>e</sup> siècle : Kepler, Descartes, Fermat

De nombreux historiens des sciences voient en Johannes Kepler (1571-1630), dont nous avons eu l'occasion d'évoquer les travaux d'astronomie, l'un des pères de l'optique géométrique. Kepler formula, en effet, une loi de la réfraction valable pour les petits angles : à la traversée de la frontière séparant deux milieux transparents, le rapport de l'angle d'incidence sur l'angle de réfraction est constant. Cette étude revêt un intérêt particulier lorsque l'un des deux milieux est l'air et l'autre le verre. En effet, lorsque la surface du verre revêt une forme sphérique, on parle de dioptrre sphérique air-verre et l'association de deux dioptres sphériques, ou d'un dioptrre sphérique avec un dioptrre plan, forme ce que l'on appelle une lentille, c'est-à-dire aussi un verre de lunettes correctrices. Kepler parvint ainsi à expliquer la propagation de la lumière à travers les lentilles convergentes (les verres convergents permettent de corriger la presbytie ou l'hypermétropie) et à travers les lentilles divergentes (les verres divergents permettent de corriger la myopie). Mais sa contribution ne s'arrêta pas là. Il comprit aussi que le phénomène de la vision résultait de la formation d'une image sur la rétine et que celle-ci se formait à l'envers sur cette membrane réceptrice. Ainsi, trois siècles après la construction de la première paire de lunettes correctrices, était-on devenu, grâce aux travaux de Kepler, capable de comprendre comment celles-ci agissaient.

Après Kepler, plusieurs autres savants se sont intéressés à la réfraction.

Ils cherchaient à déterminer une loi dont le domaine de validité ne se limiterait pas aux petits angles. L'Anglais Thomas Harriot (1560-1621), en 1598, le Néerlandais Willebrord Snell (1580-1626), en 1625, et le Français René Descartes (1596-1650), en 1637, comprirent que c'était le rapport des sinus des angles d'incidence et de réfraction qui était constant pour un dioptrre donné. Cette loi est aujourd'hui connue sous le nom de loi de Snell-Descartes. Elle fut publiée par Descartes dans sa *Dioptrique* en 1637. Dans cet ouvrage, Descartes reformulait aussi des résultats relatifs à la

réflexion de la lumière qui avaient déjà été partiellement formulés par Héron d'Alexandrie et par Alhazen. Ces résultats constituent aujourd'hui la « première loi de Descartes » relative à la réflexion, tandis que la loi de Snell-Descartes est aussi appelée « seconde loi de Descartes » relative à la réfraction.

Nous devons préciser que la démonstration que Descartes a utilisée pour prouver la loi de la réfraction était fortement critiquable. En effet, Descartes pensait que la lumière se propageait instantanément : il croyait que sa vitesse de propagation était infinie.

Parmi les détracteurs de Descartes, le Toulousain Pierre de Fermat (1607-1665) était convaincu du contraire. Ce dernier s'est employé à redémontrer les lois de Snell-Descartes en tenant compte non seulement du caractère fini de la vitesse de la lumière mais aussi de sa dépendance avec le milieu matériel (la lumière se propage d'autant plus lentement que l'indice optique du milieu est grand ; elle se propage plus lentement dans le verre que dans l'eau et plus lentement dans l'eau que dans l'air).

Fermat a ainsi énoncé, en 1662, un principe qui porte aujourd'hui son nom.

La nature agit toujours par les voies les plus courtes

Ainsi, d'après Fermat, la lumière suit forcément le trajet qui correspond au temps de parcours minimal<sup>3</sup>.

Le principe de Fermat permet de démontrer rigoureusement les lois de la réfraction que Snell et Descartes avaient établies de façon empirique. Fermat s'en félicitera et écrira :

J'ai trouvé que ce principe donnait justement et précisément la même proportion des réfractions que celle que Monsieur Descartes a établie.

On sait aujourd'hui que la lumière ne se propage pas instantanément et que Fermat avait raison contre Descartes. Mais, ce n'est qu'en 1676, c'est-à-dire plus de vingt-cinq ans après la mort de Descartes et plus de dix ans après celle de Fermat, que cela fut prouvé expérimentalement.

C'est l'astronome danois Ole Røemer (1644-1711) qui, le premier, a apporté la preuve expérimentale du caractère fini de la célérité de la lumière. Pour évaluer cette grandeur, que l'on désigne désormais par la lettre «  $c$  », Røemer s'est intéressé aux éclipses des satellites de Jupiter. Il a mesuré l'intervalle de temps qui séparait ces dernières et il a constaté que

les durées diminuaient d'une éclipse à l'autre si la Terre se rapprochait de Jupiter, et que, au contraire, elles augmentaient si la Terre s'en éloignait. Röemer parvint à déduire de ses mesures une première approximation de la vitesse de la lumière<sup>4</sup>.

### Ondulatoire ou corpusculaire ?

Au XVII<sup>e</sup> siècle, les expériences de décomposition de la lumière blanche par des prismes étaient connues mais n'étaient pas interprétées.

Les physiciens se sont alors interrogés sur la nature de la lumière.

Au début du XVII<sup>e</sup> siècle, Descartes considérait la lumière comme une pression qui se propageait instantanément. À cette époque, la physique ondulatoire n'en était qu'à ses prémices. D'Alembert (1717-1783) n'était pas encore né et les travaux sur l'équation d'onde, qu'il allait établir grâce à l'étude de la corde vibrante, ne seraient diffusés qu'un siècle plus tard. Mais l'étude des ondes acoustiques avait mobilisé les plus grands esprits de l'époque. Aussi, en 1700, les concepts de fréquence et de période étaient parfaitement maîtrisés, et, à cette époque, bien que la théorie ondulatoire de la lumière laissât de nombreux physiciens sceptiques, le concept d'onde sonore avait, quant à lui, été relativement bien accepté.

En 1690, le Hollandais Hans Christiaan Huygens (1629-1696) a réuni pour la première fois dans un seul et même ouvrage l'étude des phénomènes sonores et des phénomènes lumineux. La théorie ondulatoire lui permettait en effet d'expliquer le phénomène de diffraction lumineuse qui avait été découvert de façon fortuite en 1665. Pour justifier la propagation des ondes lumineuses, Huygens avait, en effet, imaginé un principe selon lequel chaque point atteint par la lumière à un instant donné pouvait être considéré comme une source secondaire de petites ondes sphériques.

Le problème de la couleur, intimement lié à celui de la nature de la lumière, a lui aussi passionné les esprits.

Newton, avait constaté la possibilité de séparer la lumière blanche en composantes colorées, et il avait cru pouvoir conclure que les couleurs préexistaient déjà dans la lumière blanche. Il envisagea donc l'existence de grains de lumière dont la taille aurait expliqué les couleurs. Ainsi, pour justifier qu'un prisme déviât davantage les radiations violettes que les

radiations rouges avait-il imaginé que les grains violetts étaient plus petits, donc plus mobiles, que les rouges. À cette époque, les problèmes d'aberration chromatiques des lentilles n'étaient pas résolus : ces dernières ne possédaient pas la même distance focale pour toutes les radiations colorées. La théorie de Newton excluait totalement qu'il fût possible d'éliminer ce défaut et de réaliser des lentilles achromatiques : c'est cette conviction erronée qui a poussé Newton à concevoir un nouveau type de télescope dépourvu de lentilles. C'est ainsi qu'il a construit, en 1672, un télescope à miroirs paraboliques, appelé depuis télescope de Newton.

Les travaux de Newton en optique doivent être analysés au vu de ceux qu'il avait menés en mécanique où la notion de force à distance avait été particulièrement efficace.

Newton était convaincu que les corpuscules, c'est-à-dire les « grains de lumière » dont il envisageait l'existence, subissaient des actions à distance qui étaient répulsives lors des phénomènes de réflexion. Il croyait aussi que ces corpuscules se déplaçaient d'autant plus rapidement que l'indice optique était élevé. Ainsi, d'après lui, la lumière devait progresser plus vite dans le verre que dans l'air, ce qui, on le sait aujourd'hui, est erroné. Notons que le physicien anglais eut, de lui-même, un regard relativement critique sur la théorie corpusculaire qu'il proposa en optique. Il avait, en effet, étudié les propriétés des anneaux irisés qui se formaient formés à la traversée d'une fine lame d'air entre une lentille convexe et une plaque de verre et il avait remarqué la périodicité de ces anneaux irisés (appelés depuis anneaux de Newton). Cette observation lui avait fait envisager une théorie mixte dans laquelle les grains de lumière créent un phénomène ondulatoire. Ainsi, Newton garda-t-il un regard très prudent sur la théorie de la lumière qu'il avait lui-même formulée.

L'optique corpusculaire de Newton eut un certain nombre de partisans, dont notamment Etienne Louis Malus (1775-1812) puis Jean-Baptiste Biot (1774-1862). Pour autant, elle fut controversée dès le XIX<sup>e</sup> siècle. En effet, les travaux d'optique sur la diffraction, sur les interférences et sur la polarisation qui furent menés par la suite ont corroboré l'hypothèse ondulatoire de la lumière.

Thomas Young (1773-1829), au XIX<sup>e</sup> siècle, fut le premier à réhabiliter les théories d'Huygens et à critiquer Newton.

Ce physicien anglais, qui était aussi médecin, s'était tout particulièrement intéressé à la physiologie de la vision. C'est lui qui sut expliquer le phénomène d'accommodation visuelle et la perception des couleurs par l'existence de trois types de récepteurs sur la rétine. Il fut aussi celui qui réalisa le premier système interférentiel entre deux faisceaux issus de deux sources.

Pour réaliser ces interférences, il faut que les faisceaux provenant des deux sources soient cohérents. Cela est vérifié s'ils sont issus de la même source lumineuse et si celle-ci est monochromatique et de petite taille. Young eut l'idée d'éclairer, à l'aide d'une telle source lumineuse, un écran opaque percé de deux trous, eux-mêmes quasi-ponctuels. Ce dispositif, appelé depuis dispositif des trous d'Young, permit à ce dernier d'observer sur l'écran non pas deux taches lumineuses mais des franges brillantes alternant avec des franges sombres sur toute la zone où les deux faisceaux se rencontraient. Cette expérience revêt une grande importance : au XIX<sup>e</sup> siècle, seule la théorie ondulatoire permet d'expliquer que deux faisceaux de lumière puissent s'annuler en se superposant. Les franges sombres de la figure d'interférence correspondent en effet au lieu où les deux ondes qui se superposent sont en opposition de phase (l'amplitude de la première étant opposée à celle de la seconde).

### **Le triomphe de l'optique ondulatoire : Fresnel**

Plus de cent ans après les travaux d'Huygens, ceux d'Young avaient permis d'imposer le modèle ondulatoire. Mais c'est au Français Augustin Fresnel (1788-1827) que l'on doit vraiment la diffusion de cette théorie.



Gravure de Fresnel libre de droits (celle de la couverture) (8)  
Fresnel (1788-1827)

Entre 1815 et 1819, Fresnel a repris la théorie des ondelettes secondaires qu'avait déjà proposée Huygens et parvint à ramener le phénomène de diffraction à un problème d'interférences entre ces ondes. Dès cette époque, il considérait la lumière comme une vibration sinusoïdale. Il affirmait aussi que l'amplitude et la phase de l'ondelette secondaire émise par l'obstacle diffractant étaient la même que celle de l'onde lumineuse initiale. Lorsque, en 1818, il présenta devant Laplace, Biot, Poisson, Arago et Gay-Lussac à l'Académie des sciences ses travaux sur la diffraction, il avait devant lui un jury dont trois des cinq membres étaient réticents face à la théorie ondulatoire. Il parvint néanmoins à les impressionner et remporter le prix. L'opinion de Fresnel au sujet des ondes lumineuses a évolué au cours de sa carrière. Jusqu'en 1821 il a cru que la lumière était une vibration longitudinale c'est à dire qu'elle constituait un ébranlement dirigé dans le sens de propagation de l'onde. Cette conception s'explique par les analogies qui ont souvent été faites entre la propagation lumineuse et la propagation sonore. Mais, dès 1816, il s'était heurté à l'impossibilité d'expliquer par cette théorie la non interférence de deux faisceaux pourtant issus d'une même source. Les rayons concernés étaient ceux qui émergeaient d'un cristal de spath. Un tel cristal est biréfringent : lorsqu'il est éclairé par un rayon incident, il émerge non seulement un premier

rayon (appelé rayon ordinaire) dont la trajectoire est celle du rayon émergent prévu par l'optique géométrique, mais aussi un second rayon (appelé rayon extraordinaire) qui est parallèle au premier. Le fait que les rayons ordinaire et extraordinaire, issus du spath, ne fournissent pas d'interférences a conduit Fresnel à abandonner la théorie des vibrations longitudinales et à conclure que le vecteur véhiculant l'onde lumineuse (on ne savait pas encore qu'il s'agissait du champ électromagnétique) était transverse par rapport à la direction de propagation. En effet, c'est parce que la polarisation du champ, c'est à dire sa direction dans le plan transverse, n'est pas la même pour ces deux rayons que ces derniers ne peuvent pas interférer.

Fresnel estimait que le caractère transversal des ondes lumineuses impliquait que l'éther, ce milieu hypothétique dans lequel ces ondes étaient censées se propager, possédât les propriétés de l'état solide. Mais, dans cette optique, il était difficile d'imaginer que ce milieu n'entravât pas le mouvement des corps... On s'interrogeait d'ailleurs beaucoup sur son mouvement : suivait-il la Terre dans sa rotation ou était-il absolument immobile ? Depuis 1728 et les observations de l'astronome anglais James Bradley (1693-1762), on savait que la position d'une étoile pouvait différer suivant l'époque de l'année où elle était observée. Or ce déplacement apparent, connu sous le nom d'« aberration stellaire », n'existerait pas si la Terre, dans son mouvement, entraînait avec elle l'hypothétique milieu dans lequel se propagent les ondes lumineuses... À la fin de sa vie, Fresnel avait d'ailleurs exclu cette éventualité. Tout au plus évoquait-il un entraînement partiel et très limité de l'éther par la Terre.

On sait désormais, suite aux travaux de Maxwell en 1865, et depuis la confirmation expérimentale qu'en apporta Hertz en 1887, que la lumière que nous qualifions de « visible » est une onde électromagnétique et l'on connaît les équations qui permettent de prévoir le comportement de cette onde dans différents milieux. Le domaine de sensibilité de l'œil humain est limité aux longueurs d'ondes comprises entre 400 nanomètres et 750 nanomètres mais les infrarouges, découverts en 1800 et qui ne nous sont pas visibles, ont le même comportement que les ondes visibles ; leur longueur d'onde est simplement plus grande : elle est comprise entre 750 nm et 1 mm. C'est le compositeur de musique et astronome germano-britannique William Herschel (1738-1822), celui-là même qui avait

découvert, en 1781, la planète Uranus, qui, le premier a prouvé l'existence des rayonnements infrarouges. À l'époque, on les appelait « rayons calorifiques » et c'est en utilisant des thermomètres qu'Herschell les a détectés en décomposant, à l'aide d'un prisme, de la lumière blanche. Un an plus tard, en 1801, le médecin et physicien prusse Johann Wilhelm Ritter (1776-1810), prouvait que, en deçà des longueurs d'ondes de 400 nm, se trouvent aussi des rayonnements invisibles : il s'agit des ultraviolets. Les ondes électromagnétiques produites par Hertz en 1887 avaient, quant à elles, une longueur d'onde de 60 cm : il s'agissait de micro-ondes...

En cette fin de XIX<sup>e</sup> siècle, la lumière visible apparaît comme une onde électromagnétique au même titre que les ultraviolets, les infrarouges, les micro-ondes ou les ondes radio.

Il faudra attendre 1895 pour découvrir les rayons X et 1898 pour découvrir les rayons g, ces ondes électromagnétiques de longueur d'onde inférieure au nanomètre. Ce sera aussi à cette époque où l'on croyait tout savoir sur la lumière que de nouvelles questions ont ébranlé trente ans de certitudes...

- 
- 3. On découvrira plus tard qu'il s'agit d'un temps de trajet « extrémal »
  - 4. Il la sous-estima d'environ 30 %

## La physique « moderne »

À la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, les grands domaines de la physique semblaient tous maîtrisés : le XVII<sup>e</sup> siècle avait vu se construire la mécanique, qui avait triomphé au XVIII<sup>e</sup> ; quant au XIX<sup>e</sup> siècle, il avait été celui de la thermodynamique, de l'optique ondulatoire et de l'électromagnétisme. La physique se sentait alors très puissante. En 1895, il était admis que la lumière était une onde électromagnétique, qu'il était toujours possible de calculer la trajectoire d'une particule à condition de connaître les forces s'appliquant sur celle-ci, et que le temps était absolu. C'est entre 1890 et 1920 que ces certitudes furent remises en cause et que la physique connut deux révolutions...

Au début du XX<sup>e</sup> siècle, la théorie ondulatoire de la lumière issue des travaux des physiciens du siècle précédent avait l'aval de la communauté scientifique : comme les ondes radios, comme les ultra-violets et comme les infra-rouges, la lumière visible pouvait être décrite par la théorie des ondes électromagnétiques, ce qui permet de comprendre et analyser les phénomènes d'interférence, de diffraction et de polarisation.

Pourtant, deux faits expérimentaux, inexplicables dans le cadre de cette théorie, vont faire vaciller le bel édifice que celle-ci constituait : il s'agit de l'analyse du spectre de rayonnement du corps noir et de l'effet photoélectrique.

Au même moment, alors que l'analyse de ces deux phénomènes allaient donner naissance à la physique quantique et à la physique relativiste, l'aventure atomique débutait...

Aussi, peut-on dater de 1895, l'entrée de la physique dans l'époque « moderne ».

### Les atomes

La théorie selon laquelle la matière est formée d'atomes est apparue dès le XIX<sup>e</sup> siècle et elle a été initialement portée par les chimistes. Le terme d'atome, issu du grec *átomos* (« insécable, non coupé »), avait été introduit dès l'Antiquité par les philosophes atomistes : il s'agissait, aux yeux de ces derniers, du plus petit élément qu'il était possible de trouver dans la matière.

La découverte de la notion d'élément chimique fait partie de l'histoire de la chimie et non de celle de la physique. Il nous serait, pour autant, impossible de ne pas l'évoquer, même brièvement, dans cet ouvrage. C'est le Britannique John Dalton (1766-1844) qui a écrit les premières pages de ce chapitre de la chimie en développant une théorie selon laquelle la matière est composée d'atomes de masses différentes qui se combinent suivant des proportions simples. Rappelons d'ailleurs que, bien que celle-ci donnât des résultats très satisfaisants, les chimistes du XIX<sup>e</sup> n'avaient pas tous immédiatement adhéré à cette théorie et que certains d'entre eux sont restés longtemps sceptiques sur l'existence même des atomes.

À la suite des travaux de Dalton, les arguments étayant la thèse atomique n'ont cessé de se multiplier. Et si dans la célèbre maxime attribuée à Lavoisier (« rien ne se perd rien ne se crée tout se transforme »), c'est d'élément chimique qu'il est question, c'est avant tout parce que, à cette époque, on confondait les concepts d'éléments chimiques et d'atomes...

À la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, les travaux du Russe Mendeleïev (1834-1907) avaient, eux-aussi, contribué à rallier les chimistes à la théorie atomique. En 1869, Mendeleïev avait, en effet, proposé une classification des éléments chimiques qui était l'ancêtre du tableau périodique des éléments que l'on trouve désormais dans les salles de cours des lycées et des universités. Les éléments chimiques qui se trouvaient sur une même colonne du tableau possédaient tous les mêmes propriétés chimiques, et le génie du chimiste russe avait été de laisser dans son tableau des cases vides destinées à accueillir les éléments qui, dans le futur, allaient être découverts.

Ainsi, en cette fin de XIX<sup>e</sup> siècle, une fois l'existence de l'atome prouvée par les chimistes, il incombaît aux physiciennes et aux physiciens de statuer sur la nature de ce dernier. L'atome était-il une particule

élémentaire ? Ou bien, au contraire, existait-il des particules plus petites en son sein ?

À cette époque, l'électron, le neutron et le proton restaient à découvrir...

L'étude des décharges électriques dans les gaz raréfiés allait permettre de commencer à avancer sur ce sujet. Celle-ci avait débuté dans la première moitié du XIX<sup>e</sup> siècle, à la suite des travaux de Julius Plücker (1801-1868) et elle allait désormais mobiliser de nombreux scientifiques.

À la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, le chimiste et physicien britannique William Crookes (1832-1919) avait réussi à perfectionner les tubes à décharges ce qui permit, en 1895, au Français Jean Perrin (1870-1942) d'identifier les rayons émis dans ces tubes<sup>5</sup> comme un ensemble de corpuscules chargés négativement.

Ces charges négatives avaient déjà été identifiées par les chimistes.

En effet, depuis les travaux de Faraday sur l'électrolyse, les chimistes du XIX<sup>e</sup> siècle avaient étudié les propriétés de la charge des espèces qui se trouvaient en solution aqueuse et ils avaient constaté que celle-ci était toujours multiple d'une charge élémentaire (que l'on désigne aujourd'hui par la lettre « e »). Les corpuscules présents dans les rayons étudiés par Jean Perrin portaient, quant à eux, la charge -e. George Stoney (1826-1911) proposa de nommer « électrons » ces particules. Finalement, c'est en 1897 que Joseph Thomson (1856-1940) parvint à mesurer la grandeur -e/m, où m désigne la masse des électrons, en étudiant leur trajectoire dans un champ magnétique. Joseph Thomson recevra d'ailleurs le prix Nobel de physique en 1906 « pour ses recherches théoriques et expérimentales sur la conductivité électrique dans les gaz ».

Ainsi, en 1897, les physiciens ont enfin identifié les charges négatives de l'atome et ils savent aussi que la matière est globalement neutre, c'est-à-dire non chargée. Une nouvelle question se pose alors à eux : si l'atome contient des électrons négatifs, sous quelle forme se trouvent les charges positives ?

Joseph Thomson est convaincu que les charges positives sont diffuses, c'est-à-dire réparties uniformément dans le volume de l'atome, mais un étudiant néo-zélandais, le jeune Ernest Rutherford (1871-1937), venu étudier à Cambridge sous sa direction, va montrer qu'il n'en est rien. Pour cela, Rutherford étudie le comportement d'un faisceau de particules

d'hélium ionisé que l'on bombarde sur une mince feuille d'or. Il constate que les particules sont déviées. Cela ne peut s'expliquer que si les charges positives de l'atome sont confinées dans un très petit volume dont les dimensions transversales sont près de dix mille fois plus petites que celles de l'atome. Rutherford vient de découvrir le noyau atomique dans lequel sont regroupées les charges positives... Il vient aussi de prouver que l'atome – tout comme la matière – est essentiellement composé de vide (on parle de structure « lacunaire »).

Quelques années plus tard, ce même Rutherford s'intéressera aux transformations que peuvent subir certains noyaux atomiques et, avec le jeune Anglais Frederick Soddy (1877-1956), il comprendra que les transformations radioactives correspondent à des transmutations nucléaires (c'est-à-dire à des transformations du noyau de certains atomes).

## La radioactivité

Les phénomènes liés à la radioactivité ont passionné le public. Aujourd'hui encore, ce chapitre de l'histoire de la physique, dont la famille Curie occupe de grandes pages, fait partie des plus vulgarisés. En 1895 déjà, les travaux sur l'électron que nous venons d'évoquer, avaient été quelque peu éclipsés par la découverte stupéfiante et très médiatisée de l'Allemand Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923). Ce dernier avait en effet annoncé, le 8 novembre 1895, une « nouvelle sorte de rayons » auxquels les objets étaient plus ou moins transparents.

Deux ans après la découverte de ces rayons, que l'on appelait rayons X, les hasards de la météorologie ont permis au Français Henri Becquerel (1852-1908) d'observer un nouveau fait troublant. On connaissait déjà alors la fluorescence des sels d'uranium exposés à la lumière. Mais Becquerel s'aperçut aussi que, même dans l'obscurité, ces derniers émettaient des rayons qui impressionnaient encore les plaques photographiques sur lesquelles on les posait.

Parmi les physiciens qui se sont intéressés au sujet, Marie Skłodowska (1867-1934), qui, en 1895, avait épousé Pierre Curie (1859-1906), disposait d'un instrument de précision : l'électromètre piézo-électrique mis au point par son mari. C'est elle qui inventa le terme de radioactivité. En 1898, Marie Curie mit ainsi en évidence la radioactivité du thorium. Les

époux Curie isolèrent ensuite un élément encore plus radioactif que l'uranium qu'ils baptisèrent polonium en hommage au pays dont Marie était originaire. Enfin, la même année, ils mirent en évidence le radium, élément mille fois plus radioactif que l'uranium.

La personnalité remarquable des époux Curie, exemple type de chercheurs désintéressés et guidés par leur passion commune, a fait d'eux un véritable mythe. Ces pionniers de l'aventure atomique reçurent avec Becquerel le prix Nobel de physique en 1903. Après la mort accidentelle de Pierre en 1906, Marie continuera sa carrière de chercheuse. Elle parviendra à déterminer la masse molaire du radium et recevra le prix Nobel de chimie en 1911.



Gravure de Marie Curie libre de droits (celle de la couverture) (12)  
Marie Skłodowska, ép. Curie (1867-1934)

Les travaux sur la radioactivité, qui ont permis de mieux connaître la nature du noyau atomique, ont conduit à la découverte du neutron en 1932 par Chadwick (1891-1974). Ce dernier avait été l'élève de Rutherford qui, rappelons-le, avait découvert l'existence, dans l'atome, d'un noyau de petite taille contenant les protons.

Rutherford, aussi, avait envisagé, dès 1920, l'existence de particules neutres de masse deux mille fois plus grande que celle de l'électron : l'hypothèse de l'existence du neutron avait donc été formulée à

Cambridge. C'est probablement parce qu'il était culturellement préparé à cette éventualité que Chadwick a su interpréter correctement les résultats expérimentaux publiés en 1930 en Allemagne par Walter Bothe (1891-1957) et, en France, en 1931, par Irène Joliot-Curie (1897-1956) et son époux Frédéric Joliot (1900-1958).

Chadwick, le premier, comprit que la masse et les propriétés de certains noyaux s'expliquaient par la présence en leur sein de cette particule neutre qui était près de deux mille fois plus lourde que l'électron.

C'est le nombre de protons présents dans le noyau atomique qui caractérise l'élément chimique.

Deux atomes possédant le même nombre de protons mais un nombre de neutrons différents représentent le même élément chimique mais ils n'ont pas forcément les mêmes propriétés physiques. On les appelle des « isotopes ». Comme leur nom l'indique, deux isotopes se trouvent à la « même place » (en grec « iso » signifie « égal » et « topos » « lieu ») dans la classification périodique de Mendeleïev. Ils se comportent de la même façon dans les réactions chimiques, mais ils n'ont pas les mêmes propriétés nucléaires : pour un même élément chimique, certains atomes peuvent être radioactifs et d'autres non. Par exemple, le carbone 12 (6 protons et 6 neutrons), qui est le carbone le plus abondant sur Terre, n'est pas radioactif alors que le carbone 14 (6 protons et 8 neutrons) est radioactif.

Il existe plusieurs types de radioactivité et, jusqu'en 1930, seule la radioactivité naturelle avait été identifiée. L'Uranium 238 (92 protons et 146 neutrons) se transforme ainsi spontanément en Thorium 234 (90 protons et 144 neutrons), qui est plus léger que lui, et cette transmutation s'accompagne de l'émission d'une particule alpha (noyau d'hélium). Le cobalt 60 (dont le noyau contient 27 protons et 33 neutrons) se transmute, quant à lui, spontanément en nickel 60 (qui contient 28 protons et 32 neutrons) : à l'intérieur de son noyau, un neutron se transforme donc en proton et il y a émission d'une charge négative (un électron) et d'une particule élémentaire appelée antineutrino électronique.

La radioactivité artificielle est, quant à elle, découverte par Irène et Frédéric Joliot Curie.

Irène Curie, fille aînée de Pierre et de Marie Curie, a été initiée à la physique par trois lauréats du prix Nobel : Paul Langevin, Jean Perrin et sa propre mère. Dès 1918, alors qu'elle n'a que 21 ans, elle devient l'assistante de sa mère à l'Institut du Radium et c'est là qu'elle rencontre son mari, Frédéric Joliot qui prendra plus tard le nom de Joliot-Curie. Ensemble, les deux époux synthétisent du phosphore 30 en bombardant de l'aluminium 27 avec un noyau d'hélium. Le phosphore 30 n'existe pas à l'état naturel sur Terre : c'est un radioélément artificiel qui se désintègre ensuite en silicium 30 en émettant un positron (antiparticule de l'électron). Cette découverte vaudra à Irène et Frédéric Joliot-Curie, l'attribution, dès l'année suivante, du prix Nobel de chimie.

Depuis la découverte des Joliot-Curie, il est devenu possible de synthétiser de nouveaux isotopes, donc de nouveaux atomes et donc aussi de nouveaux éléments chimiques artificiels. Le premier élément chimique artificiel à avoir été produit a été baptisé technétium et la découverte, en 1937, de l'isotope technétium 97 (43 protons et 54 neutrons) a été attribuée à Emilio Segré (1905-1989) qui sera lauréat du prix Nobel de physique en 1959.

Depuis cette époque, de nombreux éléments artificiels, tous radioactifs et qui se désintègrent rapidement, ont été produits. La classification périodique des éléments, historiquement proposée par Mendeleïev, ne cesse de voir sa taille augmenter et, comme ce fut le cas pour le technétium, chaque nouvel élément synthétisé se voit attribuer un nom et un symbole. Ce nom est souvent lié soit à l'origine géographique du laboratoire où il a été synthétisé soit au nom d'un physicien ou d'une physicienne. Ainsi, le 8 juin 2016, l'IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) a validé le nom des quatre derniers éléments découverts à ce jour : il s'agit du nihonium, pour l'élément 113, découvert au Japon, du moscovium pour l'élément 115, en lien avec la ville de Moscou, du tennessine pour l'élément 117, en référence à l'état américain du Tennessee, et, pour l'élément 118, de l'oganesson en l'honneur du physicien nucléaire Iouri Oganessian (1933-) qui a travaillé sur les éléments lourds

À l'heure de l'impression de cette édition, les éléments 119 et 120 n'ont toujours pas été produits et découverts.

## Periodic Table of the Elements

The Periodic Table of the Elements is a tabular arrangement of all known chemical elements. It consists of 18 groups, 7 periods, and 3 transition series. The table is organized by increasing atomic number (Z) from left to right across the rows and by increasing group number (G) from top to bottom within each row. The elements are color-coded into groups: alkali metals (lightest gray), alkaline earth metals (medium gray), transition metals (dark gray), post-transition metals (black), halogens (yellow), and noble gases (light blue). Each element cell contains its symbol, name, atomic number, and various physical and chemical properties.

<https://iupac.org/what-we-do/periodic-table-of-elements/> (19)  
La classification périodique des éléments en 2023

## Quanta et discontinuités

En 1900, la plupart des physiciens admettent que la matière est discontinue : c'est un assemblage d'atomes, eux-mêmes constitués d'électrons gravitant dans le vide autour d'un noyau. Ils s'accordent aussi sur le fait que la lumière est continue puisqu'il s'agit d'une onde.

Dès lors, comment expliquer les interactions lumière-matière qui s'observent couramment ?

L'un des deux faits expérimentaux sur lequel ils se questionnent particulièrement concerne l'effet photoélectrique. Depuis 1888, on sait que, en éclairant une plaque de zinc par une lampe à vapeur de mercure, il est possible de lui arracher des particules chargées. En 1899, Philipp Lenard (1862-1947) a identifié celles-ci comme étant des électrons. Cette émission, dite photoélectrique, ne s'observe que lorsque la fréquence des rayonnements utilisés est suffisamment grande : ce sont les ultraviolets

de la lampe au mercure qui permettent d'arracher les électrons au métal et il existe une fréquence seuil en dessous de laquelle, quelle que soit la puissance du rayonnement utilisé, il est impossible d'observer l'effet photoélectrique. La physique classique et les théories de Maxwell ne permettent pas d'expliquer ce point.

Le deuxième problème auxquels sont confrontés les physiciens de cette époque concerne le spectre de la lumière émis par des corps chauds. L'expérience montre que la couleur d'un métal chauffé, autrement dit le rayonnement thermique qu'il émet, dépend de la température à laquelle on le porte. Tant que le corps émet dans l'infrarouge, nous ne percevons pas de variation de sa couleur, puis, au fur et à mesure que sa température augmente, nous le voyons rougir, puis devenir orange. Lorsqu'il blanchit finalement, c'est parce que toutes les radiations du spectre visible se superposent.

En 1895, l'étude du rayonnement thermique porte essentiellement sur le corps noir, modèle de corps qui absorbe toute l'énergie rayonnante qu'il reçoit. Cette année-là, Wilhelm Wien (1864-1928) montre qu'une enceinte isolée, maintenue à température constante et fermée à l'exception d'une petite ouverture, constitue une bonne approximation de corps noir. Le problème est désormais de relier, pour une température donnée, la densité d'énergie rayonnante dans l'enceinte à la température et à la fréquence. Les formules auxquelles la théorie classique permet d'aboutir conviennent uniquement pour les grandes longueurs d'ondes : elles donnent par contre des résultats aberrants pour l'ultraviolet et en deçà.

« Catastrophe ultraviolette », tel est le nom que le physicien Paul Ehrenfest (1880-1933) donnera à ce problème sur lequel bute la physique classique.

Le physicien allemand Max Planck (1858-1947) s'attelle immédiatement à sa résolution : il utilise la statistique de Boltzmann et, pour que la formule à laquelle il aboutit soit en excellent accord avec l'expérience, il introduit une constante  $h$  dont la dimension est celle du produit d'une énergie par un temps. Planck a alors le génie d'interpréter ce qui, au départ, ne paraît constituer qu'un simple artifice de calcul. Dans un élan relevant d'une formidable intuition, il comprend que les échanges d'énergie entre la matière et l'onde électromagnétique s'effectuent par paquets d'énergie (ou quanta d'énergie). Chacun de ces quanta transporte

une quantité d'énergie égale au produit de  $\hbar$  par la fréquence du rayonnement. Ce concept est révolutionnaire puisque, jusqu'alors, on pensait que les échanges d'énergie pouvaient à priori prendre n'importe quelle valeur.

Natura non facit saltus

« La nature ne fait pas de saut », comme l'écrivait Leibniz, et comme l'ont cru les scientifiques jusqu'en 1900, année où Planck remet cela en cause en faisant apparaître cette quantification dans laquelle la constante fondamentale  $\hbar$ , qui porte désormais le nom de « constante de Planck », joue un rôle majeur.

Notons d'ailleurs que cette constante a une grande importance en physique : ainsi, depuis mai 2019, le kilogramme est défini par le bureau international des poids et mesures, non plus par un prototype étalon matériel, comme cela a été le cas pendant plus d'un siècle, mais par rapport à la valeur numérique fixée de la constante de Planck,  $\hbar$ , égale à  $6,626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$  (unité égale au  $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$ ). La constante de Planck est donc aujourd'hui l'une des constantes fondamentales de la physique, et elle sert de base au système international d'unités.

Entre 1900 et 1905, les idées de Planck se sont rapidement répandues au sein de la communauté scientifique. Pour autant, le second problème encore en suspens, celui relatif à l'effet photoélectrique, n'était toujours pas résolu.

C'est un jeune expert de vingt-six ans, travaillant à l'office des brevets de Berne, qui va y parvenir. Ayant abandonné ses études secondaires allemandes qu'il jugeait inadaptées, il avait émigré en Suisse et intégré l'Ecole Polytechnique de Zurich. Cet homme, figure désormais emblématique de la science moderne, a toujours été conscient de ce que la physique du XX<sup>e</sup> siècle devait à Planck.

C'est dans un article publié en mars 1905 que le jeune Albert Einstein (1879-1955) interprète l'effet photoélectrique. Il postule l'existence, dans un rayonnement de fréquence donnée, de grains de lumière<sup>6</sup> transportant chacun une énergie donnée. Comme pour les quanta mis en évidence par Planck, l'énergie de ces grains de lumière est égale au produit de la fréquence par la constante  $\hbar$  : plus le rayonnement a une fréquence élevée, plus l'énergie transportée par le photon est grande. Les ultraviolets

ont des fréquences plus grandes que les rayonnements visibles, et les photons ultraviolets, qui sont plus énergétiques pourront, contrairement aux photons visibles, engendrer l'effet photoélectrique. La théorie corpusculaire permet donc d'interpréter rigoureusement cet effet.

La question est alors la suivante : comment la lumière peut-elle être simultanément une onde et un ensemble de particules qui se déplacent ?

Si la lumière est une onde, son domaine d'étude est celui de la physique ondulatoire et, par conséquent, celui de l'électromagnétisme. Si c'est un ensemble de photons en mouvement, son analyse relève plutôt de la mécanique. Ces deux théories semblent s'exclure mutuellement et être incompatibles.

Le débat sur ce sujet divise et passionne immédiatement la communauté scientifique.

À cette époque-là, la lumière était une onde les lundis, mercredis et vendredis, et un ensemble de particules les mardis, jeudis et samedis. Il restait le dimanche pour réfléchir à la question !

Cette analyse, non dénuée d'humour, est celle du physicien et prix Nobel Richard Feynman (1918-1988).

Effectivement, la théorie ondulatoire et la théorie corpusculaire semblaient coexister et se contredire. Pourtant, dès 1905, Einstein, lui-même, pensait qu'il n'y avait pas lieu de dresser une frontière immuable entre ces deux domaines. Quelques années plus tard, le Français Louis de Broglie (1892-1987) s'emploiera à prouver qu'il existe un lien plus général entre ondes et corpuscules : convaincu que la dualité onde-corpuscule ne se limite pas à la lumière, il propose, dès 1923, de généraliser celle-ci à la matière dans son ensemble. À tout corpuscule de masse donnée et de vitesse donnée, de Broglie propose d'associer une « onde de matière » dont la longueur d'onde est d'autant plus petite que la vitesse et la masse du corpuscule sont grandes.

La constante de Planck  $h$ , une fois de plus, intervient dans le calcul de cette longueur d'onde.

Elle permet de calculer précisément la longueur d'onde de l'onde de matière. Par exemple, la longueur d'onde de l'onde de matière associée à un électron accéléré sous une tension de 1 000 Volts vaut  $4 \times 10^{-11}$  mètres. Concrètement, cela signifie que si un tel faisceau rencontre des obstacles

de cet ordre de grandeur (par exemple des plans réticulaires dans un cristal), alors le faisceau d'électrons peut subir une diffraction ou des interférences comme le ferait une onde. Lorsque de Broglie propose cette hypothèse dans son travail de thèse, il ne s'agit que d'un travail théorique. Mais il a l'intuition que sa confirmation expérimentale ne se fera pas attendre. Effectivement, dès 1927, les Américains Clinton J Davisson (1881-1958) et Lester H. Germer (1896-1971) d'une part, et le Britannique George Thomson (1882-1975), fils de Joseph Thomson, d'autre part, parviennent à faire interférer des faisceaux d'électrons comme interfèreraient des faisceaux de lumière. Ainsi, si les électrons interfèrent, c'est parce qu'ils ont bel et bien un comportement ondulatoire. Cette expérience vient donc à point pour légitimer les travaux de Louis de Broglie, et ce dernier reçoit le prix Nobel deux ans plus tard pour « la découverte de la nature ondulatoire de l'électron ». Clinton Davisson partagera, quant à lui, en 1937, cette distinction avec George Thomson qui recevra un Nobel vingt et un an après son propre père Joseph. À noter que Davisson et Thomson seront primés « pour leur découverte de la diffraction des électrons par les cristaux » alors que Germer, bien qu'ayant fait l'objet de vingt-deux nominations pour le Nobel, n'obtiendra jamais cette récompense...

## Naissance de la mécanique quantique

Louis de Broglie comprend très vite que sa théorie ne constitue qu'une étape. En effet, le comportement ondulatoire de la matière, tout comme la quantification de l'énergie, qui figure aussi dans le modèle atomique qu'a proposé Niels Bohr, devraient apparaître comme des conséquences d'une théorie plus globale... Or ce n'est pas le cas pour l'instant.

C'est pour répondre aux nombreuses questions que nous venons d'évoquer que la physique quantique a vu le jour entre 1924 et 1925 grâce aux travaux menés à l'école de Copenhague par Niels Bohr (1885-1962), Werner Karl Heisenberg (1901-1976) et Pascual Jordan (1902-1980), au Royaume Uni par Paul Dirac (1902-1984) et en Allemagne par Max Born (1882-1970), Erwin Schrödinger (1887-1961) et Wolfgang Pauli (1900-1958)<sup>7</sup>.



Suggestion : Gravure de Niels Bohr (13)  
Niels Bohr (1885-1962)

Cette théorie dépasse l'apparente opposition entre les concepts d'onde et de particule. Elle montre que si les dimensions du problème étudié sont du même ordre que la longueur d'onde de la particule, alors on n'a plus le droit d'utiliser le concept de trajectoire.

Le fait que la notion de trajectoire n'ait aucun sens en physique quantique peut surprendre. Et pourtant, il est impossible de savoir exactement où se trouve un électron à l'intérieur d'un atome : tout au plus peut-on dire qu'il est dans une certaine région. C'est une conséquence de l'une des deux relations d'incertitude qu'Heisenberg transcrivit en 1927 : on ne connaîtra jamais avec une précision absolue la vitesse et la position d'une particule. La constante de Planck  $h$ , toujours elle, joue un rôle majeur dans ces relations : ce que l'on gagne en précision sur la connaissance de la position, on le perd sur la connaissance des vitesses et réciproquement. Notons que, fort heureusement pour nous, l'ordre de grandeur de  $h$  est très faible ( $6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}\text{ J s}$ ). Ceci explique que les effets quantiques ne se manifestent pas à notre échelle. Quelle que soit notre vitesse, il est toujours possible de savoir où nous nous trouvons. Si l'on voulait connaître la position d'un individu de 50 kg marchant à 3 km/heure à un milliardième de nanomètre près, l'incertitude sur la vitesse de ce dernier ne serait que de quelques milliardèmes de nanomètres par seconde, ce qui est indétectable. Si la valeur de  $h$  était toute autre, nous serions nous-même soumis aux relations d'incertitudes de Heisenberg, et serions susceptibles de nous retrouver « délocalisés » en plusieurs endroits au même moment... Il en va tout autrement pour un

électron qui se trouve à l'intérieur d'un atome. Le modèle schématique qui consiste à représenter l'atome comme un système planétaire dans lequel les électrons suivraient des orbites bien définies autour du noyau ne fonctionne pas. En effet, la relation d'incertitude de Heisenberg limite de manière intrinsèque la connaissance que nous avons de la position de l'électron dans l'atome.

Comme la notion de trajectoire n'est pas utilisable au niveau quantique, il a fallu introduire de nouveaux outils mathématiques pour étudier les particules. La notion de probabilité de présence joue un grand rôle en mécanique quantique où les corps étudiés s'identifient désormais à la fonction d'onde qui leur est associée. Ainsi, de même que pour établir la trajectoire d'un corps en physique classique il fallait résoudre les équations issues de la deuxième loi de Newton, de même, pour calculer l'onde de probabilité associée à la particule, il faut résoudre une équation. Celle-ci fut proposée par Schrödinger en 1926 et porte aujourd'hui son nom. La résolution de l'équation de Schrödinger permet, entre autres choses, de retrouver la quantification de l'énergie de l'électron à l'intérieur de l'atome...

Les recherches sur la mécanique quantique se sont ensuite poursuivies sous l'impulsion de Niels Bohr dans le cadre de l'école de Copenhague.

L'état quantique est décrit comme une description de l'histoire du système qui permet de calculer les probabilités de mesure. Selon l'interprétation de Copenhague, c'est le fait d'effectuer une mesure qui permet à un état d'exister. En 1935, Schrödinger évoque l'intrication quantique et affirme que deux systèmes quantiques différents ayant interagi ne seront plus indépendants et que les résultats des mesures des deux systèmes sont corrélés. La même année, dans un article anglophone de quatre pages intitulé « la description de la réalité par la mécanique quantique peut-elle être considérée comme complète ? », est formulé le paradoxe dit « EPR » du nom de ses trois auteurs Albert Einstein, Boris Podolsky (1896-1966) et Nathan Rosen (1909-1995) initiant une controverse qui durera près de vingt ans entre Einstein et Bohr. Einstein et ses collaborateurs considèrent en effet que la théorie quantique est incomplète et qu'il existe des variables cachées. Nous verrons, à la fin de cet ouvrage, comment, en 1961, le physicien Américain John Stewart Bell

(1928-1990) a analysé le paradoxe EPR et comment certaines expériences, dont celles du Français Alain Aspect (1947-), prix Nobel de physique 2022, ont permis de statuer sur cette question.

## Célérité de la lumière et relativité restreinte

Début du XX<sup>e</sup> siècle : au prix d'une révolution scientifique, la première zone d'ombre qui planait sur la physique – l'interprétation de l'effet photoélectrique – vient de s'éclaircir.

Exactement à cette même époque, alors même que la mécanique quantique est en train de bousculer plusieurs siècles de certitudes et commence à fasciner les philosophes des sciences, naît dans l'esprit d'Einstein une autre théorie, tout aussi révolutionnaire que la précédente. Il s'agit de la théorie de la relativité.

En 1900, la théorie ondulatoire de la lumière s'insère parfaitement dans le cadre de la théorie électromagnétique de Maxwell tandis que les lois de Newton permettent d'expliquer le mouvement des corps matériels. Or, ces deux théories semblent très difficiles à relier. Le problème est essentiellement dû à l'hypothétique milieu matériel que l'on avait nommé « éther », milieu supposé véhiculer les ondes électromagnétiques et dont on sait si peu de choses...

En 1881, Albert Abraham Michelson (1852-1931) a effectué une expérience d'optique qui, une vingtaine d'année plus tard, va permettre à Einstein de révolutionner la physique classique. Le but de Michelson était d'évaluer la vitesse de l'éther par rapport à la Terre. À la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, la plupart des scientifiques pensaient, en effet, que cet hypothétique milieu était absolument immobile dans l'Univers et que le déplacement de la Terre dans celui-ci créait un « vent d'éther ». D'après la théorie newtonienne de composition des vitesses, la vitesse de la lumière mesurée par rapport l'éther devrait être égale à la somme de la vitesse mesurée par rapport à la Terre et de la vitesse de la Terre par rapport à l'éther. Ainsi, la valeur de la vitesse de la lumière mesurée par rapport à la Terre devait différer légèrement suivant la direction : on s'attendait à ce que la valeur mesurée soit plus faible si la lumière se propageait dans le sens du mouvement de la Terre et plus grande en sens inverse. On s'attendait aussi à ce que l'écart entre les vitesses mesurées soit relativement faible.

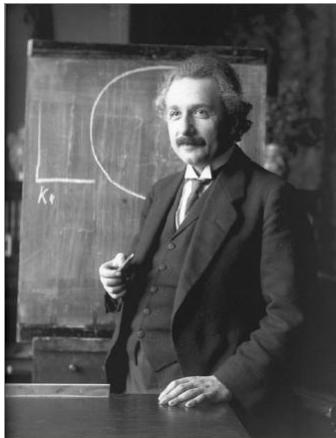
En effet, la Terre parcourt chaque seconde 30 kilomètres sur sa trajectoire elliptique autour du soleil alors que la lumière parcourt près de 300 000 kilomètres chaque seconde.

Seules des mesures extrêmement précises pouvaient permettre d'effectuer la comparaison escomptée. Les méthodes interférométriques – basées sur les interférences d'ondes lumineuses – devaient permettre d'y parvenir.

En 1881, Michelson fut le premier à réaliser cette mesure que l'histoire des sciences appelle souvent expérience de Michelson et Morley, associant au nom de Michelson celui du physicien Edward Morley (1838-1923) qui, en 1887, effectua la deuxième tentative. Cette expérience, qui fut réitérée un grand nombre de fois, ne permit jamais d'observer l'effet escompté : il était impossible, en mesurant la vitesse de la lumière, de détecter un quelconque écart suivant la direction d'observation par rapport à la Terre. Autrement dit, la vitesse de la lumière semblait indépendante du mouvement de celui qui la mesurait. Tout se passait comme si la vitesse de la Terre par rapport à l'éther était nulle. Ainsi, non seulement le « vent d'éther » n'était pas détectable mais la vitesse de la lumière semblait indépendante du référentiel dans lequel elle était mesurée.

Ce dernier point est particulièrement troublant. Pour illustrer le problème posé, nous raisonnons sur un autre type d'ondes. Prenons donc l'exemple d'une vague qui se propage à la surface de l'eau. Imaginons qu'un observateur A, posté sur une digue, mesure la vitesse de propagation de la vague et qu'un observateur B, qui se déplace sur sa planche à voile dans le même sens que l'onde effectue la même mesure. On conçoit aisément que la vitesse que mesurera A sera plus grande que celle relevée par B. Supposons maintenant que l'on puisse faire une expérience similaire en s'intéressant non plus à une onde se propageant dans l'eau mais à une onde lumineuse. On s'attend, *a priori*, à trouver un résultat analogue. Or, l'expérience de Michelson prouve qu'il n'en est rien : la vitesse de propagation de la lumière semble indépendante du mouvement de celui qui la mesure ! Tout se passe donc comme si l'éther était totalement entraîné par la Terre. Or rappelons que diverses observations effectuées par le passé (notamment la détection des aberrations stellaires) avaient permis d'exclure une telle éventualité.

Ce résultat que ne pouvaient expliquer ni les théories de Newton ni celles de Maxwell gêna de nombreux scientifiques... Leur première réaction fut de remettre en cause l'expérience même. Certains physiciens se sont employés à déterminer quel effet parasite pouvait expliquer l'échec apparent de l'expérience de Michelson. Le Néerlandais Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928), qui reçut le Nobel en 1902 pour ses recherches sur l'influence du magnétisme sur les phénomènes radiatifs, et le mathématicien et physicien français Henri Poincaré (1854-1912) effectuèrent des apports majeurs et décisifs en remettant en cause la notion de temps absolu. Poincaré était le correspondant de Lorentz et il proposa une transformation (baptisée transformation de Lorentz) permettant de rendre les équations de Maxwell invariables par changement de référentiel.



Suggestion : Photo d'Einstein (15)  
Albert Einstein (1879-1955)

Lorsque l'on utilise aujourd'hui le terme de « relativité » c'est aux théories d'Einstein que l'on fait usuellement référence. Pourtant, au XVI<sup>e</sup> siècle, c'est Galilée qui a montré que les lois de la mécanique s'expriment de la même façon dans deux référentiels si l'un est en translation rectiligne uniforme par rapport à l'autre<sup>8</sup>. On parle de principe de relativité galiléenne pour illustrer ce résultat.

Ce qui gêne Einstein, à l'aube du XX<sup>e</sup> siècle, c'est que la lumière ne semble pas obéir au principe de relativité : le milieu dans lequel celle-ci se propage paraît être absolu et il semble impossible de trouver un

référentiel qui soit en translation rectiligne uniforme par rapport à l'éther et dans lequel la lumière se propagerait de façon analogue...

De même que l'année 1666 avait été, selon sa propre expression, l'« annus mirabilis » de Newton, Einstein, lui-aussi, connaît son année merveilleuse. C'est, en effet, en 1905, l'année même où il a découvert le photon, que le jeune Einstein révolutionne la mécanique. Cet éther si mystérieux et si absurdement immobile, Einstein a le génie de comprendre qu'il n'existe pas et que la lumière se propage dans le vide. Ainsi, les ondes électromagnétiques sont les seules qui n'ont pas besoin de support matériel pour se propager.

En outre, Einstein est convaincu que le principe de relativité ne se limite pas à la matière et que la lumière doit forcément lui obéir. Il commence par postuler que la célérité de la lumière dans le vide est indépendante du référentiel et, à partir de ce point, il réécrit, en 1905, les lois de la mécanique classique.

Notons que certains historiens des sciences se sont interrogés sur l'influence qu'auraient pu avoir les travaux de Poincaré (et notamment la communication faite par ce dernier le 5 juin 1905 devant l'Académie des Sciences) sur ceux d'Einstein. Il est difficile de savoir si Einstein avait eu connaissance de cette communication. Pour autant, il est clair que, aussi immenses qu'aient été les avancées de Poincaré, ce dernier, contrairement à Einstein, n'avait pas renoncé, dans sa théorie, à l'existence de l'éther. Par ailleurs, c'est Einstein qui a montré que deux événements simultanés dans un référentiel ne l'étaient pas dans tous les autres.

Pour illustrer ce dernier point, aidons-nous d'un exemple dans lequel les intervenants possèderaient des moyens de mesures parfaitement précis : imaginons donc que A et B se fassent face sur une route et prennent une photo au flash. Imaginons qu'un troisième personnage, C, soit immobile à égale distance de A et B. C reçoit les deux éclairs lumineux en même temps. C conclut donc que « A et B ont pris la photo simultanément ». Supposons maintenant que, sur une moto, un quatrième personnage, D, se dirige vers B et passe devant C à l'instant précis où celui-ci reçoit les deux flashes. Quand A a envoyé son signal lumineux, D n'avait pas encore atteint l'emplacement de C : il était donc plus près de A que de B. Donc, par rapport à D, le signal lumineux qu'envoie A parcourt une distance

plus petite que le signal envoyé par B. D recevra les deux signaux lumineux au même moment (quand il passera devant C), mais sa conclusion sera différente de celle de C. Rappelons en effet que la vitesse de la lumière dans le référentiel lié à la moto est la même que dans celui lié à la route. Les deux signaux lumineux se propagent donc à la même vitesse par rapport à D. Or, comme celui émis par A a parcouru une plus petite distance, et comme il arrive en même temps que celui de B, D va conclure que « B a appuyé sur le flash avant A ». Il apparaît ici que ce qu'affirme C contredit ce qu'énonce D. Pourtant tous les deux ont raison : la notion de simultanéité dépend du point de vue de l'observateur

La simultanéité est relative et cela remet totalement en cause le concept d'espace absolu sur lequel repose la mécanique de Newton. La durée d'un phénomène – que l'on peut définir comme l'intervalle de temps séparant deux instants précis – n'a plus un caractère absolu puisque la simultanéité entre un instant et le déclenchement d'un chronomètre dépend du référentiel dans lequel le chronomètre se trouve. La notion de durée dépend donc du mouvement et la durée d'un phénomène va augmenter si celui qui la mesure est en mouvement par rapport au référentiel où le début et la fin du phénomène sont localisés au même point.

Notons que, compte tenu de la valeur du facteur de dilatation des durées, ce phénomène n'est perceptible que pour des vitesses très proches de celle de la lumière. À  $100\ 000\ km\cdot s^{-1}$ , les durées ne varient que de 6 %. Aussi, serait-il illusoire, en pratique, d'observer ce phénomène pour un déplacement à moto... l'exemple précédent avait, bien évidemment, seulement une vocation illustrative...

Un autre phénomène souligné par Einstein concerne les longueurs qui, elles-aussi, dépendent du mouvement de celui qui les mesure. La valeur maximale que peut prendre la longueur d'un objet donné est celle qui est mesurée dans le référentiel où celui-ci est immobile. Le mouvement provoque une contraction des longueurs.

Notons enfin que le bureau international des poids et mesures définit, depuis 1983, le mètre par rapport à la célérité de la lumière qui est l'une des constantes fondamentales de notre monde.

Le mètre, symbole  $m$ , est l'unité de longueur du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la vitesse de la lumière dans le vide,  $c$ , égale à 299 792 458 lorsqu'elle est exprimée en  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

## Masse, gravitation et relativité générale

L'année 1905 avait été particulièrement féconde pour Einstein : découverte du photon en mars, théorie de la relativité en juin... et ce n'était pas fini ! La formule la plus célèbre de la physique moderne a été énoncée, elle-aussi, cette année-là.

$$E = Mc^2$$

Cette équation qu'a retenue la postérité, présentée par Einstein comme une conséquence de la théorie relativiste, fut publiée au cours du mois de septembre. Elle traduit l'équivalence entre la masse et l'énergie : lorsqu'un corps émet une quantité  $E$  d'énergie, sa masse diminue de  $E/c^2$ .

L'existence d'une énergie « nucléaire » (libérée à partir de la fission de noyaux lourds ou de la fusion de noyaux légers) est une des conséquences directes de cette égalité.

Le travail d'Einstein avait été éblouissant. Pourtant, dès 1907, ce dernier s'est trouvé insatisfait par la théorie de la relativité qu'il avait proposée. Ce qui le contrariait, c'était le caractère particulier qui semblait imparti à la gravitation. Rappelons que, depuis Galilée, on savait que tous les corps tombent dans le vide avec la même accélération. La deuxième loi de Newton permettait de retrouver ce résultat à condition d'admettre que la masse intervenant dans cette loi (la masse inertielle) était rigoureusement la même que celle qui permet de définir la force de gravitation (la masse gravitationnelle). Pourtant ceci est loin de constituer une évidence. Ces deux grandeurs ne sauraient en effet revêtir la même signification physique. La masse gravitationnelle, ou masse pesante,  $M$  est directement liée au poids du corps, alors que la masse  $m$  figurant dans la seconde loi de Newton reflète, quant à elle, l'inertie du corps, c'est à dire sa capacité à résister à la force qui lui est appliquée (pour une force donnée, plus  $m$  est grand, plus l'accélération sera faible et moins la vitesse sera modifiée).

À partir de 1907, Einstein a du mal à se satisfaire du caractère si exceptionnel de la gravitation, qui fait intervenir dans son expression une grandeur liée à l'inertie et donc au mouvement. Cela le gêne à tel point

qu'il finit par envisager que l'inertie et la gravitation reflètent un seul et même phénomène.

Nous allons nous aider d'un exemple – qui aurait été quelque peu anachronique en 1907 – pour montrer que le point de vue que l'on utilise peut être décisif...

Imaginons qu'un astronaute s'exerce à bord d'un avion. Supposons que l'on arrête la propulsion de l'avion. Ce dernier qui est soumis uniquement au champ de pesanteur se met à décrire une trajectoire parabolique au cours de laquelle son accélération est égale à  $g$ , accélération de pesanteur terrestre.

L'astronaute se met à flotter dans la cabine. Tout se passe donc comme si l'accélération de l'avion compensait la gravité et comme si l'astronaute était dans une fusée se déplaçant à vitesse constante dans l'espace interplanétaire. Ainsi, est-il impossible que l'astronaute à bord de l'avion différencie les forces d'accélération (forces d'inerties) des forces de gravitation. Il y a donc équivalence entre les forces inertielles et gravitationnelles. Et c'est de ce principe d'équivalence qu'Einstein va partir pour élaborer la théorie de la relativité généralisée.

Les travaux dans lesquels s'engagea Einstein dès 1907 nécessitaient l'utilisation de concepts mathématiques d'avant-garde pour l'époque. Pour la partie mathématique de son œuvre, il dut se faire aider par son ami, le mathématicien suisse Marcel Grossmann (1878-1936), spécialiste des géométries non euclidiennes. Non sans humour, Einstein a parlé de cette époque en évoquant les « difficultés mathématiques » auxquelles il fut confronté.

Dans cette nouvelle théorie, publiée en 1916, Einstein n'a pas hésité à bouleverser totalement la conception que nous avons de la gravitation en raisonnant sur un « espace-temps » à quatre dimensions. Dans cette optique, la gravitation est présentée, non plus comme une force, mais comme la modification de la géométrie de ce quadri-espace. Les objets agissent sur cet espace et, réciproquement, ils subissent les déformations de ce dernier. Si l'astronaute dans l'avion en chute libre ne perçoit pas l'attraction de la Terre c'est parce que l'espace dans lequel il se trouve lui masque cet effet (dans le quadri-espace envisagé, l'avion et l'astronaute suivent la même trajectoire). Einstein affirme ainsi que tout corps se déplace en suivant le « chemin qui est le plus court » dans l'espace-temps

qui l'entoure. Ainsi, deux corps de masses différentes situés dans la même région de l'espace, vont suivre le même trajet et, s'ils sont en chute libre au voisinage d'un corps plus lourd qu'eux, ils auront le même mouvement. Le phénomène de déformation de l'espace par les corps de masse importante a aussi une autre conséquence : le trajet suivi par la lumière dans cet espace déformé sera lui aussi dévié.

On imagine à quel point, en 1916, la relativité générale pouvait surprendre. D'autant que seules les mathématiques étaient capables de donner une description rigoureuse de cet espace déformable modifié par les objets qui s'y trouvaient. Or, les mathématiques utilisées dans le cadre de cette théorie étaient tellement complexes que bien peu de personnes dans le monde étaient à même de les comprendre. Cette théorie était tellement peu intuitive et bouleversait tant les certitudes les plus profondes que de nombreux physiciens n'étaient pas convaincus. Comment imaginer un espace-temps qui n'existe pas sans les objets qui se trouvent en son sein ? Dès lors, comment définir le temps ?

La théorie suscita néanmoins l'admiration de certains scientifiques comme en témoignent ces mots de l'astronome royal britannique Arthur Eddington (1882-1944) :

Que la théorie se révèle juste ou non, en fin de compte, peu importe, elle se présente en tout cas comme un des plus beaux exemples de l'efficacité du raisonnement mathématique en général.

Nombreux étaient ceux qui avaient besoin qu'une preuve viît conforter la confiance qu'ils portaient aux travaux d'Einstein. Nous avons déjà évoqué, dans le premier chapitre de ce livre, l'expérience décisive qui permit d'apporter cette preuve. C'est, en effet, Eddington qui, avec l'aide du gouvernement britannique, organisa une expédition sur l'île de Principe au large du golfe de Guinée pour observer l'éclipse totale de Soleil qui devait avoir lieu le 29 mai 1919. Le but était de vérifier l'une des conséquences de la relativité générale : la déviation des rayons lumineux au voisinage des corps de très grande masse. Il est important de rappeler dans quel contexte historique cette expédition fut entreprise. En 1919, la Première Guerre Mondiale était dans toutes les mémoires. Et ce qu'Eddington proposait ce n'était rien moins que donner raison à un savant allemand contre une figure emblématique du Royaume-Uni, le génial Isaac Newton...

Si Einstein avait raison, Eddington devait pouvoir observer une étoile se situant derrière le Soleil. Les rayons émis par cette dernière, devaient, en effet, être déviés au voisinage de notre étoile. Cette preuve expérimentale recueillie lors de l'éclipse de mai 1919, fut communiquée à la Royal Society et à la Royal Astronomical Society le 6 novembre 1919. Dès lors, Einstein acquit une notoriété et une gloire inégalées qui lui permirent de prendre position sur de nombreux sujets. Couronné par le prix Nobel de 1921, qui officiellement ne lui était attribué que pour la partie de son œuvre relative aux quanta lumineux, Einstein verra au cours de sa vie ses théories vérifiées. Scientifique mais aussi philosophe, il s'est souvent interrogé sur les nouveaux moyens que la science fournissait aux hommes.

Après la mort d'Einstein, les recherches sur la relativité générale se sont poursuivies, avec notamment la recherche d'ondes gravitationnelles, dont Einstein avait prédit l'existence dès 1916. Sa théorie prévoyait, en effet, que les oscillations de la courbure de l'espace-temps – qui se propagent à la vitesse de la lumière – pouvaient être produites par la réunion de deux objets extrêmement massifs, par exemple des trous noirs. Il a fallu attendre près d'un siècle pour avoir la preuve expérimentale de l'existence de ces ondes : le 14 septembre 2015, aux Etats-Unis, Rainer Weiss (1932-), Barry C. Barish (1936-) et Kip Thorne (1940-) ont annoncé avoir détecté au LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) des ondes gravitationnelles produites par la réunion de deux trous noirs, situés à 1,3 milliard d'années-lumière de nous. Ces trois physiciens ont été récompensés par le prix Nobel de physique en 2017 et leurs travaux s'inscrivent directement dans la continuité de ceux d'Einstein : rappelons, en effet, que l'existence même de trous noirs – ces corps tellement massifs que ni la matière ni le rayonnement ne peuvent s'en échapper – ne peut s'expliquer que dans le cadre de la théorie de la relativité générale. En 2020, le prix Nobel de physique a d'ailleurs été attribué à Roger Penrose (1931-) pour avoir montré que « la formation d'un trou noir est une prédiction solide de la théorie de la relativité générale ». Cette année-là, l'autre moitié du Nobel avait aussi distingué pour « la découverte d'un objet compact supermassif dans le centre de notre galaxie » l'Allemand Reinhard Genzel (1952-) et l'Américaine Andrea Ghez (1965-), faisant de celle-ci la quatrième femme récompensée par cette distinction dans le domaine de la physique.

## Vers l'infiniment petit : le modèle standard de la physique des particules

Que connaissait-on en 1900 ? La microscopie optique, basée sur l'éclairage des objets avec de la lumière visible, permettait de discerner les corps jusqu'à quelques centaines de nanomètres et donc de visualiser des bactéries. Les virus, dont Louis Pasteur (1822-1895) avait découvert l'existence, étaient, en revanche, trop petits pour pouvoir être observés avec un microscope optique...

Ce n'est qu'au XX<sup>e</sup> siècle que l'on a vraiment pu se rapprocher de l'infiniment petit, « voir » les atomes, sonder le noyau et découvrir le monde au milliardième de nanomètre. En effet, avec un microscope optique, qui utilise la lumière visible pour éclairer l'objet étudié, la résolution ne peut guère dépasser 100 nanomètres (1 nanomètre correspond à 1 milliardième de mètre). Pour des détails plus fins, il faut utiliser des rayons ultraviolets ou des rayons X (dont la longueur d'onde est inférieure). Pour scruter la matière à des dimensions encore plus faibles, on n'éclaire plus l'objet avec des ondes électromagnétiques. Depuis les travaux de Louis de Broglie on connaît en effet la nature ondulatoire des électrons. Or si ces derniers sont accélérés sous plus de 10 000 volts, leur longueur d'onde est plus faible que celle des rayons X. Ainsi, la microscopie électronique développée à partir de 1931 grâce aux travaux d'Ernst Ruska (1906-1988), utilise-t-elle, non pas de la lumière, mais un faisceau d'électrons accélérés pour éclairer l'objet. Grâce à ce type de microscope, dont la technique a été constamment améliorée, on a pu observer des détails cent fois plus petits que ceux visibles avec les microscopes optiques. Depuis 1982 et les travaux de Gerd Binnig (1947-) et Heinrich Rohrer (1933-2013), grâce aux techniques en champ proche (microscopes à effet de champ), on parvient même à visualiser des structures de quelques dixièmes de nm et donc à « voir » des atomes. Cette avancée majeure a d'ailleurs valu l'attribution du prix Nobel de physique en 1986 à Ruska, Binnig et Rohrer.

Pour performante qu'elle soit, la microscopie reste toutefois incapable de sonder la matière au niveau du noyau atomique et en deçà. L'utilisation d'énergies encore plus grandes s'avère alors nécessaire. Les rayons cosmiques (provenant de l'espace et heurtant notre atmosphère) possèdent ces énergies. Ils ont d'ailleurs permis de découvrir certaines particules. Mais ces rayons sont malheureusement trop rares pour que les

expériences auxquelles ils donnent lieu soient bien reproductibles. Aussi, pour procéder de façon plus systématique a-t-il fallu pouvoir atteindre en laboratoire et de façon contrôlée les énergies nécessaires.

En 1929, l'Américain Ernest Orlando Lawrence a eu l'idée d'accélérer des particules chargées à l'aide d'un champ électrique et d'incurver leur faisceau à l'aide d'un champ magnétique : il venait d'imaginer le cyclotron qu'il fabriqua avec succès quelques années plus tard. L'énergie des particules accélérées dans les premiers cyclotrons atteignait 13 000 eV (1 électron-volt correspond à l'énergie acquise par un électron soumis à une tension de 1 volt). Quelques années plus tard, on obtenait 10 millions d'eV. Mais pour pouvoir sonder le noyau atomique, il fallait disposer d'énergies encore dix fois plus grandes...

Depuis la Deuxième Guerre Mondiale et la deuxième génération d'accélérateurs de particules (les synchrotrons), la taille et les performances de ces derniers n'ont cessé d'augmenter. Cela a impliqué la création de laboratoires internationaux et le développement de partenariats entre états. Ainsi, entre 1983 à 1989, a été construit à Genève un gigantesque collisionneur baptisé LEP (Large Electron-Positron Collidar) dans le cadre du CERN<sup>9</sup>. Abrité par un tunnel dont la circonférence mesure près de 27 km, le LEP a permis d'atteindre plusieurs centaines de milliards d'électronvolts et a été en fonction de 1989 à 2000. Dans ce même tunnel, a été construit, par la suite, un nouvel accélérateur de particules, le LHC (Large Hadron Collidar) qui est en fonction depuis 2008. Dans le LHC, ce sont des protons qui sont accélérés pour effectuer des collisions. On peut désormais y atteindre des énergies de 7 TeV (1 téraélectronvolt vaut mille milliards d'électronvolts)

Grâce à ces accélérateurs, les physiciennes et physiciens ont ainsi pu, dès les années cinquante, mettre en évidence, au cours des collisions, de nouvelles particules. La plupart d'entre elles avaient une durée de vie très brève, ne dépassant parfois pas le milliardième de seconde. Ainsi, se désintégraient-elles presque instantanément. En leur conférant une vitesse très importante, il a été possible, grâce au phénomène de dilatation des durées que nous avons évoqué dans le paragraphe sur la relativité restreinte, de les observer dans le référentiel terrestre pendant plusieurs secondes. Cela a permis de mieux les étudier.

Dès les années 1960, le nombre de particules répertoriées et découvertes grâce aux accélérateurs de particules est apparu comme colossal. Cette abondance a alors beaucoup gêné les physiciens et ces derniers se sont employés à simplifier le panorama du monde microscopique : ils ont cherché à en faire apparaître l'unité, et à proposer un modèle standard.

Le but a été d'identifier les particules élémentaires, c'est-à-dire les constituants fondamentaux de la matière. De telles particules peuvent être comparées à des briques à partir desquelles il est possible de construire tout l'Univers. Les particules élémentaires sont donc des objets pour lesquels on ne connaît pas de structure interne et qu'il est impossible de décrire comme un assemblage de particules plus petites.

Aujourd'hui, les leptons -du grec « leptos », maigre, faible - sont des particules considérées comme élémentaires. Les leptons peuvent s'observer individuellement et se déplacer librement. Ils ne sont pas soumis à l'interaction forte qui est l'une des quatre interactions existant dans notre monde.

L'électron, découvert en 1895, est un lepton de même que le neutrino électronique dont l'existence avait été prédicta par Pauli en 1934 et qui fut observé expérimentalement en 1953 dans les désintégrations radioactives artificielles. Plus lourd que l'électron, le muon possède un neutrino muonique qui fut découvert en 1962. Encore plus lourd, le tauon appelé aussi lepton lourd, de masse 3 500 fois supérieure à celle de l'électron fut découvert en 1977 et est associé au neutrino tauonique. Il y a donc trois générations de leptons, et six leptons au total.

Notons que, au niveau des particules élémentaires, c'est souvent en termes d'énergie que l'on quantifie la masse des particules. En effet, si  $E = mc^2$  alors cela signifie aussi que  $m = E/c^2$  et l'énergie des particules élémentaires s'exprime ainsi en kev/ $c^2$  (pour les plus légères d'entre elles, comme l'électron dont la masse vaut  $9,1094 \cdot 10^{-31}$  kg c'est à dire  $515$  keV/ $c^2$ ) ou en GeV/ $c^2$  pour les plus lourdes d'entre elles (comme le quark top que nous allons évoquer ci-après).

Les particules qui ne sont pas des leptons sont des hadrons. La racine grecque « hadros », signifiant « fort », rappelle que ces derniers sont sensibles à l'interaction forte. Le nombre de hadrons créés dans les accélérateurs au cours des années soixante est impressionnant. En 1964 George S. Zweig (1937-) s'aperçoit, que ses calculs décrivent ces derniers

comme l'association de deux ou trois éléments qu'il baptise « as », comme les cartes à jouer, car, à l'époque, il supposait qu'il en existait quatre types différents. Indépendamment et à la même époque, Murray Gell-Mann (1929-2019), déjà connu pour ses travaux de mécanique quantique, propose une théorie semblable qui retiendra particulièrement l'attention du public et qui lui vaudra l'attribution du prix Nobel de physique en 1969 pour « ses contributions et ses découvertes concernant la classification des particules élémentaires et leurs interactions ». Gell-Mann affirme que les particules qui ne sont pas des leptons sont composées d'entités qu'il baptise « quarks ». Le terme de quark est un néologisme créé par l'écrivain James Joyce dans son livre *Finnegans Wake*. Comme les leptons, les quarks se divisent en trois catégories : le quark « haut » et le quark « bas » entrent dans la constitution des neutrons et des protons. Ainsi, un neutron est-il l'association d'un quark « haut » et de deux quarks « bas », alors qu'un proton est l'association d'un quark « bas » et de deux quarks « haut ».

Plus lourds que ces deux premiers quarks, le quark « étrange » et le quark « charme » ont été détectés dans les rayons cosmiques et les accélérateurs de particules, de même que le quark « beauté » et le quark « top » qui constituent la troisième génération de quarks et qui sont encore plus lourds. Le quark « top » est le dernier à avoir été découvert, en 1995, au Tevatron, accélérateur de particules situé au Fermilab à Chicago qui permettait d'atteindre 2 TeV. Ce quark a ensuite été observé en 2010 au LHC à Genève et les mesures réalisées au CERN ont permis d'affiner la mesure de sa masse qui est aujourd'hui estimée à  $173,34 \text{ GeV}/c^2$  ( $\pm 0,76 \text{ GeV}/c^2$ ).

Chacun de ces quarks est ainsi caractérisé par sa charge et une valeur donnée de certains nombres quantiques (spin, isospin, étrangeté, nombre baryonique). En outre, chacun d'entre eux existe sous trois formes distinctes. Dans un langage imagé on a baptisé « couleur » cette dernière caractéristique des quarks. Ainsi existe-t-il des quarks rouges, verts ou bleus.

Si les quarks et les leptons sont les briques à partir desquelles il est possible de construire notre monde, alors on peut présenter les bosons de jauge comme le ciment qui va servir à les lier. Ces particules

fondamentales assurent, en effet, la transmission des forces et toute interaction peut être décrite comme un échange de bosons.

Il existe quatre interactions dans notre monde : l'interaction gravitationnelle, l'interaction électromagnétique, l'interaction forte et l'interaction faible.

Le premier boson de jauge connu fut le photon et, depuis les travaux d'Einstein, on sait que ce grain de lumière sans masse est associé à l'interaction électromagnétique.

L'interaction forte, quant à elle, est portée par les gluons qui collent les quarks entre eux à l'intérieur des hadrons. Contrairement à l'interaction électromagnétique, dont la portée est infinie, elle n'agit pas à notre échelle ou à l'échelle des molécules : son domaine d'action se limite au niveau du noyau atomique et ne concerne que les quarks qu'elle distingue des leptons sur lesquels elle n'agit pas. On connaît actuellement huit gluons, observés pour la première fois en 1979 au sein du laboratoire DESY en Allemagne.

L'interaction faible, enfin, peut être attractive ou répulsive. Elle est notamment responsable de la radioactivité. Sa portée est encore plus faible que celle de l'interaction forte et les bosons échangés sont ici les bosons  $W^+, W^-$  et  $Z$ . Ces particules massives ont été détectées en 1983 au CERN par le chercheur Carlo Rubbia (1934-) et l'ingénieur Simon van der Meer (1925-2011), qui obtinrent le prix Nobel de physique dès l'année suivante pour cette découverte.

La théorie du modèle standard suppose aussi l'existence d'un champ de Higgs, qui permet aux hadrons d'acquérir leur masse. Ce champ implique l'existence d'un boson (baptisé boson de Higgs), décelé au CERN le 4 juillet 2012 dans les expériences ATLAS et CMS. En 2013, l'année suivant la détection du boson de Higgs au LHC<sup>10</sup>, Peter Higgs (1929-) et François Englert (1932-) ont conjointement reçu le Prix Nobel de physique, pour

la découverte théorique du mécanisme contribuant à notre compréhension de l'origine de la masse des particules subatomiques et récemment confirmée par la découverte, par les expériences ATLAS et CMS du grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN, de la particule fondamentale prédicta par cette théorie

Ainsi, en observant que les paires de bosons W ou Z peuvent produire par désintégration un boson de Higgs, ATLAS et CMS ont permis de prouver que ces bosons acquièrent leur masse par leurs interactions avec le champ de Higgs, comme le prédit le modèle standard. Cela constitue une confirmation *a posteriori* qui est d'une très grande importance. Par ailleurs, depuis la découverte du boson de Higgs, des expériences plus fines ont permis d'obtenir une plus grande précision sur la connaissance de sa masse, que, depuis 2018, on estime à  $124,97 \text{ GeV}/c^2$  avec une précision de  $0,24 \text{ GeV}/c^2$ .

## L'antimatière

Le modèle standard que nous venons brièvement d'exposer prévoit aussi l'existence d'une antiparticule pour chaque particule...

C'est en 1920 que le concept d'antimatière a été proposé pour la première fois en physique : l'existence d'antiparticules a, tout d'abord, été prévue mathématiquement par le physicien anglais Paul Dirac (1902-1984) qui cherchait à comprendre pourquoi dans notre monde les charges négatives et positives semblaient jouer des rôles différents.

Pourquoi les premières étaient-elles portées par des particules légères (les électrons), qui pouvaient passer d'un atome à un autre, alors que les autres étaient portées par des particules lourdes (les protons) qui étaient liées au noyau ?

Pour répondre à ces questions, Dirac eut l'idée d'un monde symétrique du nôtre, dans lequel les charges positives seraient portées par des particules légères et les charges négatives par des particules lourdes. En 1929, ses calculs l'amènent à présenter comme nécessaire l'existence d'une particule de même masse que l'électron mais de charge opposée (l'antiélectron, aussi nommé positon ou positron), et d'une antiparticule du proton (l'antiproton).

Le positron fut observé pour la première fois dans le rayonnement cosmique en 1932 par Carl David Anderson et, en laboratoire, en 1934 par Frédéric Joliot et Irène Joliot-Curie.

L'antiproton, quant à lui, ne fut mis en évidence que beaucoup plus tard. Les énergies nécessaires pour le produire n'ont été disponibles qu'en 1955, année où Owen Chamberlain (1920-2006), Emilio Segrè (1905-1989), Clyde

Wiegand (1915-1996) et Thomas Ypsilantis (1928-2000) ont pu le mettre en évidence à Berkeley dans le Bévatron.

Enfin, un pas supplémentaire fut franchi, en janvier 1996, quand ont été produits et détectés au CERN, à Genève, des atomes d'antihydrogène constitués d'un antiproton et d'un positon.

Quand la matière et l'antimatière se rencontrent, elles s'autodétruisent en effet en libérant de l'énergie. Ainsi est-il difficile d'envisager que l'on produise de grandes quantités d'antimatière. Rappelons en effet que si un gramme de matière rencontrait un gramme d'antimatière, non seulement la matière s'annihilerait mais il se dégagerait une énergie correspondant à plusieurs explosions de bombes atomiques...

- 
- 5. Il s'agit de rayons cathodiques
  - 6. Le terme de photon n'apparaîtra que plus tard.
  - 7. Ce dernier travailla aussi avec Bohr à Copenhague.
  - 8. Le caractère rectiligne du mouvement uniforme a été précisé après Galilée.
  - 9. CERN : acronyme historique du « Centre Européen pour la Recherche Nucléaire », devenu depuis l'« Organisation européenne pour la recherche nucléaire »
  - 10. Large Hadron Collidor : accélérateur de hadrons du CERN

## Perspectives : la physique à toutes les échelles

La physique des hautes énergies a permis, depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle, de découvrir la structure de l'infiniment petit, ou tout au moins, les échelles inférieures au milliardième de milliardième de mètre.

Dans le LHC, le grand collisionneur de hadrons, au CERN, les protons accélérés ont une énergie de plusieurs milliers de milliards d'électronvolts et, grâce à cela, on a pu détecter de nouvelles particules, dont le boson de Higgs, clef de voûte du modèle standard de la physique des particules.

Cette physique des hautes énergies, qui permet de mieux connaître la nature de la matière, est également susceptible de nous renseigner sur le passé. En effet, comme l'a découvert, en 1929, Edwin Hubble (1889-1953), les galaxies s'éloignent les unes des autres et la vitesse à laquelle elles s'éloignent de la Terre est d'autant plus élevée qu'elles en sont plus distantes<sup>11</sup>. Cela correspond à une expansion de l'espace-temps relativiste ce que permet de justifier la théorie du Big-Bang. Notre Univers est donc en expansion, et, si l'on remonte le temps, il est de plus en plus dense, de plus en plus petit, de plus en plus chaud et de plus en plus énergétique. La physique des hautes énergies peut donc nous renseigner sur ses premiers instants.

Un dixième de milliardième de seconde après le Big-Bang, la température correspondait à une énergie de 100 milliards d'électron-volts, qui est une énergie que l'on atteint dans les accélérateurs de particules depuis la fin du XX<sup>e</sup> siècle. Une seconde plus tard, celle-ci ne valait plus qu'un million d'électron-volts. Une limite dans cette remontée vers le passé concerne la période où l'âge de l'Univers était de l'ordre du temps de Planck ( $10^{-44}$  secondes après le Big-Bang). Avant cette période, les lois de la physique, telles qu'elles sont transcrrites aujourd'hui, trouvent en effet leur limitation. Plusieurs théories sont proposées et sont débattues de nos jours pour décrire cela. Parmi celles-ci, la théorie des cordes et la théorie de la gravitation quantique à boucles sont l'objet de

multiples recherches. La théorie de la « grande unification » suppose, quant à elle, que, aux tout premiers instants de l'Univers, les quatre interactions qui existent dans notre monde<sup>12</sup> n'étaient pas différenciées. Elle a été partiellement vérifiée en 1967 pour l'interaction électromagnétique et l'interaction faible grâce aux travaux de Steven Weinberg (1933-2021), Sheldon Lee Glashow (1932-) et Abdus Salam (1926-1996) qui ont été récompensés par le prix Nobel de physique, en 1979, pour leurs contributions à la théorie unifiée des interactions faibles et électromagnétiques. Elle ne l'a pas encore été pour la gravitation...

La physique est une science en constante évolution et son histoire est loin d'être conclue...

La physique classique est née à l'époque de Galilée puis de Newton, mais elle s'est appuyée sur les travaux réalisées bien avant eux, en occident mais aussi dans le monde grec et dans le monde arabe. La physique moderne a vu le jour à l'aube du XX<sup>e</sup> siècle. Elle s'est appuyée sur la physique classique qu'elle a remis en cause en restreignant son champ d'application. Elle a donné lieu à deux révolutions intellectuelles majeures : la physique quantique et la relativité. Ces deux domaines se sont initialement développés indépendamment l'un de l'autre. Les étudier conjointement et travailler dans un cadre quantique et relativiste est désormais l'un des grands défis à relever pour les physiciens des générations à venir.

Les applications des théories relativistes font désormais partie de notre quotidien : par exemple, pour qu'un GPS fonctionne correctement il faut tenir compte, pour mesurer le temps, des effets relativistes. Les applications de la physique quantique, elles aussi, sont nombreuses. Depuis 1964, les LASER sont devenu des objets familiers et les travaux sur leur fonctionnement a donné lieu à l'attribution de onze prix Nobel, dont le dernier, qui date de 2018, a récompensé le Français Gerard Mourou (1944-) et la Canadienne Donna Strickland (1959-).

La gravitation a une place très particulière dans le cadre de la théorie de la relativité générale. La détection d'ondes gravitationnelles en 2016 et les derniers travaux sur les trous noirs ont contribué à fournir de nouvelles preuves expérimentales de cette théorie bâtie par Einstein il y a plus de cent ans.

Dans le cadre du modèle standard des particules élémentaires, enfin, un pas décisif a été franchi, en 2012, lorsque fut détecté le boson de Higgs, qui prouve l'existence du champ de Higgs. Pour autant, on n'a toujours pas identifié l'hypothétique graviton qui serait le boson de jauge de l'interaction gravitationnelle et qui devra aussi être décrit dans un cadre compatible avec la théorie de la relativité générale.

La physique quantique manie des notions de probabilité et la définition de ce qu'est un état quantique a suscité de grands débats au cours de l'histoire.

Le hasard existe-t-il en physique quantique comme le pensaient les physiciens de l'école de Copenhague, ou bien y-a-t-il des « variables cachées » comme le suggéraient les auteurs de l'article « EPR » en 1935 ?

En 1961, John Stewart Bell (1928-1990) a proposé des inégalités<sup>13</sup> que les mesures effectuées sur des états quantiques intriqués doivent respecter dans l'hypothèse où il existe effectivement des variables cachées. Cela signifie concrètement que, si les inégalités de Bell sont mises en défaut, c'est-à-dire si elles ne sont pas vérifiées pour des états intriqués, alors cela confirmerait l'absence de variables cachées et donnerait raison à l'équipe de Copenhague et à Niels Bohr. L'expérience du Français Alain Aspect (1947-), réalisée entre 1980 et 1982 a été fondamentale sur ce point et a permis de prouver qu'il n'avait pas de variables cachées. En 2022, le prix Nobel de physique a récompensé ce dernier ainsi que l'Américain John F. Clauser (1942-) et l'Autrichien Anton Zeilinger (1945-) « pour les expériences avec des photons intriqués, établissant les violations des inégalités de Bell et ouvrant une voie pionnière vers l'informatique quantique ». L'intrication quantique et ses perspectives appliquées en informatique quantique font ainsi, elles-aussi, partie des domaines de recherche actuel.

Plus généralement, la physique s'intéresse aujourd'hui à l'infiniment petit, l'infiniment ancien, l'infiniment lointain, les très basses températures, les très hautes énergies et les très courtes durées. Le prix Nobel 2023 a ainsi récompensé les recherches menées sur la physique ultra-rapide par le Français Pierre Agostini (1941-), le Hongrois Ferenc Krausz (1962-) et la Franco-Suédoise Anne L'Huillier (1958-), qui est devenue, ainsi, la cinquième femme à recevoir le prix Nobel de physique

pour avoir, avec ses collègues, créé « des impulsions extrêmement courtes de lumière qui peuvent être utilisées pour mesurer les processus rapides au cours desquels les électrons se déplacent ou changent d'énergie ».

Les situations extrêmes constituent ainsi les domaines d'investigation privilégiés des physiciennes et des physiciens d'aujourd'hui et le champ des recherches qui s'offrent à eux semble toujours immense.

Leur curiosité les pousse à toujours s'investir davantage pour progresser encore plus loin dans la connaissance de notre monde physique et permettre à l'aventure scientifique de continuer.

Il y a presque cent ans, Marie Curie résumait cela par ces mots : <sup>14</sup>

Je suis de ceux qui pensent que la science a une grande beauté. Je ne crois pas que dans notre monde l'esprit d'aventure risque de disparaître. Si je vois autour de moi quelque chose de vital, c'est précisément cet esprit d'aventure qui me paraît indéracinable et s'apparente à la curiosité.

---

11. Ce résultat est connu sous le nom de loi de Hubble

12. Il s'agit de la gravitation, de l'interaction électromagnétique, de l'interaction forte et de l'interaction faible

13. Inégalités de Bell

14. Madrid 1933, Introduction au colloque sur l'« Avenir de la culture »

# Références et conseils de lecture

## Ouvrages d'histoire des sciences et biographies de physiciennes et physiciens

Barlibar Françoise, *Galilée, Newton, lus par Einstein*, collection « Philosophie », Presses Universitaires de France 1990.

Barthélemy Georges, *Newton, mécanicien du cosmos*, collection « Mathesis », Vrin 1992.

Biezunski Michel, *Histoire de la physique moderne*, Collection histoire des sciences, La découverte 1993.

Blay Michel, Halleux Robert (dir), *La science classique, XVI<sup>e</sup> XVIII<sup>e</sup> siècle, dictionnaire critique*, Flammarion 1998.

Charpak Georges, Dominique Saudinos, *La vie à fil tendu*, Odile Jacob 1993.

Crépieux Adeline, *Petit dictionnaire illustré des femmes scientifiques – 110 noms, d'Hypatie aux récentes nobélisées*, Ellipses 2023.

Curie Eve, *Madame Curie*, Gallimard 1981.

Hamburger Jean, *La philosophie des sciences aujourd'hui* Gautier-Villars Paris 1986.

Kuhn Thomas, *La structure des révolutions scientifiques*, (édition originale 1962) Champs sciences, Flammarion 2018.

Locqueneux Robert, *Histoire de la Physique, histoire des idées en physique*, collection « Que sais-je ? » Presses Universitaires de France 1987.

Penrose Roger, *À la découverte des lois de l'univers. La prodigieuse histoire des mathématiques et de la physique*, (traduction Céline Laroche). Éditions Odile Jacob, 2007.

Rosmorduc Jean *Une histoire de la physique et de la chimie (de Thalès à Einstein)*, Seuil 1985.

Rouzé Michel *Les Nobel scientifiques Français*, La découverte collection « Histoire des sciences » 1988.

Sartori Eric, *Histoire des grands scientifiques français*, Plon 2012.

Taton René (dir), *Histoire générale des sciences*, Quadrige, PUF 1995.

## Textes historiques

Bohr Niels, *Physique atomique et connaissance humaine*, Folio Essais 1991.

Einstein Albert, *Comment je vois le monde* (publication originale 1949), Traduit par Maurice Solovine et Régis Hanrion, collection champs, sciences, Flammarion 2017.

Einstein Albert, *La relativité, Théorie générale de la relativité restreinte et générale suivie de La relativité et le problème de l'espace*, traduit de l'allemand par Maurice Solovine, (édition originale en langue française 1956) – réédition Payot et Rivage, Paris 2001.

Galilée, *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* (publication originale 1632), Points sciences 2000.

Newton, *Principia – Principes mathématiques de la philosophie naturelle* (publication originale 1687) – Traduction d'Emilie du Châtelet, préface de Voltaire, Dunod 2011.

## **Physique moderne**

- Bobroff Julien, *Bienvenue dans la nouvelle révolution quantique*, Flammarion 2022.
- Gamow George, Stannard Russel, *Le nouveau monde de M. Tompkins*, collection échappées, nouvelle édition, Éditions du Pommier 2019.
- Feynman Richard, *Lumière et matière : une étrange histoire*, Traduit par Françoise Balibar et Alain Laverne, Seuil 1992.
- Rovello Carlo, *L'ordre du temps*, Champs sciences, Flammarion 2017.
- Segré Emilio, *Les Physiciens modernes et leurs découvertes. Des rayons X aux quarks*, collection « Le temps des sciences », Fayard 1984.
- Hrabovski George Susskind Leonard, *Mécanique quantique, le minimum théorique*, Presses polytechniques et universitaires romandes 2013.
- Schrödinger Erwin, *Physique quantique et représentation du monde*, Seuil 1992.

## **Cours de physique (niveau universitaire et classes préparatoires)**

- Feynman Richard, Leighton Robert, Sands Mathew, *Le cours de physique de Feynman*, Dunod 2021.
- Landau Lev, Lifchitz Evgeni, *Physique théorique*, 5<sup>e</sup> Edition, Ellipses 2012.

# Annexe.

## Plus de 120 ans de prix Nobel de physique

1901	<b>Wilhelm Conrad Röntgen</b>	Allemagne
1902	<b>Hendrik Antoon Lorentz</b>	Pays-Bas
	<b>Pieter Zeeman</b>	Pays-Bas
	<b>Henri Becquerel</b>	France
1903	<b>Marie Curie</b>	France
	<b>Pierre Curie</b>	France
1904	<b>Lord Rayleigh</b>	Grande-Bretagne
1905	<b>Philipp Lenard</b>	Allemagne
1906	<b>Sir J.J. Thomson</b>	Grande-Bretagne
1907	<b>A.A. Michelson</b>	États-Unis
1908	<b>Gabriel Lippmann</b>	France
1909	<b>Ferdinand Braun</b>	Allemagne
	<b>Guglielmo Marconi</b>	Italie
1910	<b>Johannes Diederik van der Waals</b>	Pays-Bas
1911	<b>Wilhelm Wien</b>	Allemagne
1912	<b>Nils Dalén</b>	Suède
1913	<b>Heike Kamerlingh Onnes</b>	Pays-Bas
1914	<b>Max von Laue</b>	Allemagne
1915	<b>Sir Lawrence Bragg</b>	Grande-Bretagne
	<b>Sir William Bragg</b>	Grande-Bretagne
1917	<b>Charles Glover Barkla</b>	Grande-Bretagne
1918	<b>Max Planck</b>	Allemagne
1919	<b>Johannes Stark</b>	Allemagne
1920	<b>Charles Édouard Guillaume</b>	Suisse
1921	<b>Albert Einstein</b>	Suisse
1922	<b>Niels Bohr</b>	Danemark
1923	<b>Robert Andrews Millikan</b>	États-Unis
1924	<b>Karl Manne Georg Siegbahn</b>	Suède
		...

1925	<b>James Franck</b>	Allemagne
	<b>Gustav Hertz</b>	Allemagne
1926	<b>Jean Perrin</b>	France
1927	<b>Arthur Holly Compton</b>	États-Unis
	<b>C.T.R. Wilson</b>	Grande-Bretagne
1928	<b>Sir Owen Willans Richardson</b>	Grande-Bretagne
1929	<b>Louis de Broglie</b>	France
1930	<b>Sir Chandrasekhara Venkata Raman</b>	Inde
1932	<b>Werner Heisenberg</b>	Allemagne
1933	<b>P.A.M. Dirac</b>	Grande-Bretagne
	<b>Erwin Schrödinger</b>	Autriche
1935	<b>Sir James Chadwick</b>	Grande-Bretagne
1936	<b>Carl David Anderson</b>	États-Unis
	<b>Victor Francis Hess</b>	Autriche
1937	<b>Clinton Joseph Davisson</b>	États-Unis
	<b>Sir George Paget Thomson</b>	Grande-Bretagne
1938	<b>Enrico Fermi</b>	Italie
1939	<b>Ernest Orlando Lawrence</b>	États-Unis
1943	<b>Otto Stern</b>	États-Unis
1944	<b>Isidor Isaac Rabi</b>	États-Unis
1945	<b>Wolfgang Pauli</b>	Autriche
1946	<b>Percy Williams Bridgman</b>	États-Unis
1947	<b>Sir Edward Victor Appleton</b>	Grande-Bretagne
1948	<b>Patrick M.S. Blackett</b>	Grande-Bretagne
1949	<b>Yukawa Hideki</b>	Japon
1950	<b>Cecil Frank Powell</b>	Grande-Bretagne
1951	<b>Sir John Douglas Cockcroft</b>	Grande-Bretagne
	<b>Ernest Thomas Sinton Walton</b>	Irlande
1952	<b>Felix Bloch</b>	États-Unis
	<b>E.M. Purcell</b>	États-Unis
1953	<b>Frits Zernike</b>	Pays-Bas
1954	<b>Max Born</b>	Grande-Bretagne
	<b>Walther Bothe</b>	RFA Allemagne
1955	<b>Polykarp Kusch</b>	États-Unis
	<b>Willis Eugene Lamb, J.-R.</b>	États-Unis
1956	<b>John Bardeen</b>	États-Unis
	<b>Walter H. Brattain</b>	États-Unis

	<b>William B. Shockley</b>	États-Unis
1957	<b>Tsung-Dao Lee</b>	Chine
	<b>Chen Ning Yang</b>	Chine
1958	<b>Pavel Alekseyevich Cherenkov</b>	URSS
	<b>Ilya Mikhaylovich Frank</b>	URSS
	<b>Igor Yevgenyevich Tamm</b>	URSS
1959	<b>Owen Chamberlain</b>	États-Unis
	<b>Emilio Segrè</b>	États-Unis
1960	<b>Donald A. Glaser</b>	États-Unis
1961	<b>Robert Hofstadter</b>	États-Unis
	<b>Rudolf Ludwig Mössbauer</b>	RFA (Allemagne)
1962	<b>Lev Davidovich Landau</b>	URSS
1963	<b>J. Hans D. Jensen</b>	RFA Allemagne
	<b>Maria Goeppert Mayer</b>	États-Unis
	<b>Eugene Paul Wigner</b>	États-Unis
	<b>Nikolay Gennadiyevich Basov</b>	URSS
1964	<b>Aleksandr Mikhaylovich Prokhorov</b>	URSS
	<b>Charles Hard Townes</b>	États-Unis
	<b>Richard P. Feynman</b>	États-Unis
1965	<b>Julian Seymour Schwinger</b>	États-Unis
	<b>Tomonaga Shin'ichiro</b>	Japon
1966	<b>Alfred Kastler</b>	France
1967	<b>Hans Albrecht Bethe</b>	États-Unis
1968	<b>Luis W. Alvarez</b>	États-Unis
1969	<b>Murray Gell-Mann</b>	États-Unis
1970	<b>Hannes Alfvén</b>	Suède
	<b>Louis-Eugène-Félix Néel</b>	France
1971	<b>Dennis Gabor</b>	Grande-Bretagne
	<b>John Bardeen</b>	États-Unis
1972	<b>Leon N. Cooper</b>	États-Unis
	<b>John Robert Schrieffer</b>	États-Unis
	<b>Leo Esaki</b>	Japon
1973	<b>Ivar Giaever</b>	Norvège
	<b>Brian D. Josephson</b>	Grande-Bretagne
1974	<b>Antony Hewish</b>	Grande-Bretagne
	<b>Sir Martin Ryle</b>	Grande-Bretagne
	<b>Aage N. Bohr</b>	Danemark

1975	<b>Ben R. Mottelson</b>	Danemark
	<b>James Rainwater</b>	États-Unis
1976	<b>Burton Richter</b>	États-Unis
	<b>Samuel C.C. Ting</b>	États-Unis
1977	<b>Philip W. Anderson</b>	États-Unis
	<b>Sir Nevill F. Mott</b>	Grande-Bretagne
1978	<b>John H. Van Vleck</b>	États-Unis
	<b>Pyotr Leonidovich Kapitsa</b>	URSS
1979	<b>Arno Penzias</b>	États-Unis
	<b>Robert Woodrow Wilson</b>	États-Unis
1980	<b>Sheldon Lee Glashow</b>	États-Unis
	<b>Abdus Salam</b>	Pakistan
1981	<b>Steven Weinberg</b>	États-Unis
	<b>James Watson Cronin</b>	États-Unis
1982	<b>Val Logsdon Fitch</b>	États-Unis
	<b>Nicolaas Bloembergen</b>	États-Unis
1983	<b>Arthur Leonard Schawlow</b>	États-Unis
	<b>Kai Manne Börje Siegbahn</b>	Suède
1984	<b>Kenneth Geddes Wilson</b>	États-Unis
	<b>Subrahmanyam Chandrasekhar</b>	États-Unis
1985	<b>William A. Fowler</b>	États-Unis
	<b>Simon van der Meer</b>	Pays-Bas
1986	<b>Carlo Rubbia</b>	Italie
	<b>Klaus von Klitzing</b>	RFA (Allemagne)
1987	<b>Gerd Binnig</b>	RFA (Allemagne)
	<b>Heinrich Rohrer</b>	Suisse
1988	<b>Ernst Ruska</b>	RFA (Allemagne)
	<b>J. Georg Bednorz</b>	RFA (Allemagne)
1989	<b>Karl Alex Müller</b>	Switzerland
	<b>Leon Max Lederman</b>	États-Unis
1990	<b>Melvin Schwartz</b>	États-Unis
	<b>Jack Steinberger</b>	États-Unis
1991	<b>Hans Georg Dehmelt</b>	États-Unis
	<b>Wolfgang Paul</b>	RFA (Allemagne)
1992	<b>Norman Foster Ramsey</b>	États-Unis
	<b>Jerome Isaac Friedman</b>	États-Unis
1993		États-Unis

	<b>Henry Way Kendall</b>	
	<b>Richard E. Taylor</b>	Canada
1991	<b>Pierre-Gilles de Gennes</b>	France
1992	<b>Georges Charpak</b>	France
1993	<b>Russell Alan Hulse</b>	États-Unis
	<b>Joseph H. Taylor, J.-R.</b>	États-Unis
1994	<b>Bertram N. Brockhouse</b>	Canada
	<b>Clifford G. Shull</b>	États-Unis
1995	<b>Martin Lewis Perl</b>	États-Unis
	<b>Frederick Reines</b>	États-Unis
1996	<b>David M. Lee</b>	États-Unis
	<b>Douglas D. Osheroff</b>	États-Unis
	<b>Robert C. Richardson</b>	États-Unis
	<b>Steven Chu</b>	États-Unis
1997	<b>Claude Cohen-Tannoudji</b>	France
	<b>William D. Phillips</b>	États-Unis
	<b>Robert B. Laughlin</b>	États-Unis
1998	<b>Horst L. Störmer</b>	États-Unis
	<b>Daniel C. Tsui</b>	États-Unis
1999	<b>Gerardus 't Hooft</b>	Pays-Bas
	<b>Martinus J.G. Veltman</b>	Pays-Bas
	<b>Zhores I. Alferov</b>	Russie
2000	<b>Jack S. Kilby</b>	États-Unis
	<b>Herbert Kroemer</b>	Allemagne
	<b>Eric A. Cornell</b>	États-Unis
2001	<b>Wolfgang Ketterle</b>	Allemagne
	<b>Carl E. Wieman</b>	États-Unis
	<b>Raymond Davis, J.-R.</b>	États-Unis
2002	<b>Riccardo Giacconi</b>	États-Unis
	<b>Koshiba Masatoshi</b>	Japon
	<b>Alexei A. Abrikosov</b>	États-Unis
2003	<b>Vitaly L. Ginzburg</b>	Russie
	<b>Anthony J. Leggett</b>	États-Unis
	<b>David J. Gross</b>	États-Unis
2004	<b>H. David Politzer</b>	États-Unis
	<b>Frank Wilczek</b>	États-Unis
2005	<b>Roy J. Glauber</b>	États-Unis

		Etats-Unis
2005	<b>John L. Hall</b>	
	<b>Theodor W. Hänsch</b>	Allemagne
2006	<b>John C. Mather</b>	États-Unis
	<b>George F. Smoot</b>	États-Unis
2007	<b>Albert Fert</b>	France
	<b>Peter Grünberg</b>	Allemagne
2008	<b>Kobayashi Makoto</b>	Japon
	<b>Maskawa Toshihide</b>	Japon
	<b>Yoichiro Nambu</b>	États-Unis
2009	<b>Willard Boyle</b>	Canada/États-Unis
	<b>Charles Kao</b>	Grande-Bretagne/États-Unis
	<b>George E. Smith</b>	États-Unis
2010	<b>Andre Geim</b>	Pays-Bas
	<b>Konstantin Novoselov</b>	Russie/Grande-Bretagne
	<b>Saul Perlmutter</b>	États-Unis
2011	<b>Brian P. Schmidt</b>	États-Unis/Australie
	<b>Adam G. Riess</b>	États-Unis
2012	<b>Serge Haroche</b>	France
	<b>David J. Wineland</b>	États-Unis
2013	<b>François Englert</b>	Belgique
	<b>Peter Higgs</b>	Grande-Bretagne
	<b>Akasaki Isamu</b>	Japon
2014	<b>Amano Hiroshi</b>	Japon
	<b>Shuji Nakamura</b>	États-Unis
2015	<b>Kajita Takaaki</b>	Japon
	<b>Arthur B. McDonald</b>	Canada
	<b>David Thouless</b>	Grande-Bretagne
2016	<b>Duncan Haldane</b>	Grande-Bretagne
	<b>Michael Kosterlitz</b>	Grande-Bretagne
	<b>Barry C. Barish</b>	États-Unis
2017	<b>Kip S. Thorne</b>	États-Unis
	<b>Rainer Weiss</b>	États-Unis
	<b>Arthur Ashkin</b>	États-Unis
2018	<b>Gérard Mourou</b>	France
	<b>Donna Strickland</b>	Canada
	<b>James Peebles</b>	Canada/États-Unis
2019		Suisse

	<b>Michel Mayor</b>	
	<b>Didier Queloz</b>	Suisse
2020	<b>Reinhard Genzel</b>	Allemagne
	<b>Andrea Ghez</b>	États-Unis
	<b>Roger Penrose</b>	Grande-Bretagne
2021	<b>Klaus Hasselmann</b>	Allemagne
	<b>Manabe Syukuro</b>	Japon/États-Unis
	<b>Giorgio Parisi</b>	Italie
2022	<b>Alain Aspect</b>	France
	<b>John F. Clauser</b>	États-Unis
	<b>Anton Zeilinger</b>	Autriche
2023	<b>Anne L'Huillier</b>	France/Suède
	<b>Ferenc Krausz</b>	Autriche/Hongrie
	<b>Pierre Agostini</b>	France