



Les grands principes de la physique

PRINCIPE, LOI OU THÉORÈME ?



Faut-il parler du principe d'Archimède, du théorème d'Archimède, ou de la loi d'Archimède ? À en croire la littérature scientifique, les trois énoncés sont équivalents. En revanche, lorsqu'il s'agit de la conservation de l'énergie, on n'évoque jamais un théorème ou une loi, mais bien un « principe ».

Comment faut-il donc comprendre le terme « principe » ? Étymologiquement, un « principe » renvoie à ce qui est au commencement ; il est source de cause et ne découle de rien qui le précède puisqu'il est premier. De ce fait, on ne peut le justifier : on le pose comme a priori. Il faut cependant nuancer cette considération. En effet, un principe peut être relatif à un « secteur » plus ou moins large de la science. Par exemple, la poussée d'Archimède peut être considérée comme un principe en hydrostatique dans la mesure où il gouverne ce secteur de la mécanique des fluides. Cela étant, le phénomène « poussée d'Archimède » n'est nullement un principe dans le cadre plus large de la physique, car il peut alors être justifié par des principes plus généraux : il devient alors une conséquence, un résultat démontrable. Aussi, l'on parle parfois de « théorème d'Archimède ».

De manière générale donc, le terme « principe » est relatif au cadre que l'on s'impose, les vrais principes – absolus – étant ceux posés a priori dans le cadre le plus général dans les fondements de la physique. Il faut encore nuancer cette considération, car certains principes ne sont valides que de manière approchée. C'est le cas, par exemple, du principe d'action-réaction selon lequel à toute force exercée par A sur B, il existe une force égale en intensité mais orientée en sens opposé, exercée par B sur A : il faut savoir que cela n'est valable que si le délai séparant une cause et son effet est nul, ce qui, bien sûr, n'est qu'une approximation, souvent pertinente, mais inacceptable si l'on étudie certains phénomènes électromagnétiques où l'on ne peut plus négliger ce délai. Même le principe de conservation de l'énergie

n'est – strictement parlant – pas toujours valide, puisque la physique quantique autorise des fluctuations de l'énergie... Comme on le voit, le terme « principe » possède un sens fluctuant. Nous allons nous intéresser, dans ce qui suit, aux principes de la physique en omettant ceux de la physique quantique.

QUELQUES PRINCIPES ISSUS DE L'ANTIQUITÉ

PRINCIPE D'ARCHIMÈDE

On connaît l'anecdote : c'est dans sa baignoire qu'Archimède aurait



découvert le principe qui porte son nom. Rappelons ce que dit ce principe. Tout corps plongé dans un fluide subit une force – de la part du fluide – opposée à la gravité (donc dirigée vers le haut) dont l'intensité est égale au poids du fluide déplacé par le corps. Prenons une sphère de 6 litres (taille d'un ballon de foot) et plongeons-la sous l'eau avant de l'abandonner. Puisque 6 litres d'eau pèsent 6 kg (soit 600 N en poids), la sphère coulera si elle pèse plus que 6 kg, et remontera en surface si elle pèse moins que 6 kg. Un ballon de foot (450 grammes) remontera donc en surface sous l'action de la poussée d'Archimède ; le ballon flottera alors et le volume de sa partie immergée (sous la surface d'eau) sera telle que l'eau déplacée pèsera 450 grammes, soit 450 ml. Ainsi, le ballon de foot flottera sur l'eau avec 5550 millilitres au-dessus de la surface de l'eau et 450 ml en dessous. Pour Archimède, il s'agissait là d'un principe, c'est-à-dire d'une donnée première de la nature. Aujourd'hui, la poussée d'Archimède n'est qu'une conséquence du principe selon lequel tout système tend à minimiser son énergie, qu'il s'agisse d'un atome ou d'un ballon à la surface de l'eau. À ce titre, la poussée d'Archimède devient un cas particulier d'un principe plus général.

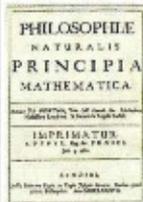
CHUTE DES CORPS

Pourquoi une pierre tombe-t-elle si on l'abandonne, alors que le feu

monte ? Pour Aristote, le principe à l'origine



de ce comportement repose sur le fait que tous les corps tendent à aller vers leurs lieux naturels. Le lieu naturel de la pierre étant la terre, elle tombe ; celui du feu étant le ciel, il monte. À la fin du xiv^e, Newton élabore une théorie selon laquelle



deux corps massifs M et M' s'attirent avec une force F proportionnelle à leur masse et inversement proportionnelle à la distance D qui les sépare. F est proportionnelle à M.M'/D². Il « explique » ainsi que la Terre étant très massive, c'est vers elle que tous les corps abandonnés se dirigent ; si l'air chaud monte, c'est parce qu'un même volume d'air frais est plus lourd : c'est donc ce dernier qui descend, faisant monter l'air chaud à sa place (poussée d'Archimède). Pourquoi les corps massifs s'attirent-ils ? À cette question, Newton ne répond pas : la nature est ainsi faite. Aussi, nous pouvons parler du principe de l'attraction gravitationnelle.

REFLEXION DE LA LUMIÈRE

Au premier siècle de notre ère, le Grec Héron d'Alexandrie pense que dans le phénomène de la réflexion



optique, la lumière prend toujours le chemin qui minimise le temps pour aller d'un point A à un point B. Beaucoup plus tard, vers 1655,

Pierre de Fermat généralise cette pensée de Héron à tous les types de trajets de la lumière, qu'il s'agisse de



réflexion ou de réfraction (changement de direction lors de

son passage d'un milieu transparent à un autre). On obtient ainsi le principe de Fermat : la lumière se propage d'un point à un autre selon la trajectoire qui minimise le temps de parcours. Bien entendu, Fermat n'explique pas le mécanisme qui permet à la lumière de « choisir » le chemin de plus court temps. Le principe de Fermat est valable en optique géométrique ; il perd sa validité dans les phénomènes ondulatoires de diffraction et interférences, où d'ailleurs la notion de rayon est caduque.

QUELQUES PRINCIPES PLUS MODERNES

PRINCIPE D'INERTIE

Depuis l'antiquité jusqu'au xiv^e, deux mille ans de réflexions ont été nécessaires aux philosophes et savants pour comprendre qu'un corps à l'arrêt ou en mouvement (vitesse nulle ou non nulle) conserve toujours sa vitesse, à moins qu'une action s'exerce sur lui de l'extérieur, autrement dit, à moins qu'il subisse une force extérieure. L'effet de cette force consiste à modifier la vitesse, en intensité ou en direction. Si la force est nulle, le corps conserve sa vitesse. On appelle cela le principe d'inertie ; on doit son énoncé moderne à Galilée et Newton. C'est en vertu de ce principe qu'une pierre lâchée par une fronde poursuit son chemin avec la vitesse qu'elle possédait à l'instant précis du lâcher. Bien sûr, la force de gravité courbe ensuite la trajectoire de la pierre... C'est également pour cela, qu'afin d'empêcher la pierre de partir en vertu de son inertie, il faut – avant le lâcher – exercer en permanence une force centripète : il faut tirer la fronde vers soi.

PRINCIPE D'ACTION-RÉACTION

C'est Newton qui énonce clairement le principe d'action et de réaction ;



ici, par « action », il faut comprendre force et par « réaction », force opposée. Voici ce que postule ce principe : lorsque le club de golf frappe la balle, il exerce une force de f Newton orientée du club vers la balle ; au même instant, la balle exerce une force également de f Newton orientée de la balle vers le club. Ce principe est toutefois mis en défaut lorsque les deux acteurs

impliqués dans l'événement (le club et la balle) ne sont pas spatialement localisés au même endroit. Si l'on prend le principe de l'attraction universelle de Newton, ou principe de gravitation, la Terre exerce une force sur la Lune. Si l'on accepte avec Newton que cette action est instantanée, alors la réaction est également instantanée et le principe d'action-réaction est valide. On admet cependant qu'entre une cause et son effet, il y a toujours un délai, rien ne s'effectue instantanément : c'est le principe de causalité. Cela signifie que l'action et la réaction n'ont pas lieu au même instant. Or, pendant le délai qui sépare l'action et la réaction, la position relative de la Terre et de la Lune a changé. Par conséquent, les



directions des deux forces ne se confondent pas (un petit angle les sépare) : les deux forces ne sont donc pas opposées. Ce même schéma peut-être repris dans le cas des forces électromagnétiques entre deux charges électriques. On est ainsi amené à revoir le principe d'action-réaction par l'introduction de la notion de « champ » (gravitationnel ou électromagnétique). C'est le champ qui exerce localement la force et qui « encaisse » la réaction. Comme on le voit, on s'éloigne du schéma newtonien du principe d'action-réaction.

PRINCIPE DE MOINDRE ACTION

C'est vers 1745 que Pierre Louis Moreau de Maupertuis, cherchant à résoudre un problème d'optique, est amené à formuler pour la première fois le « principe de moindre action », principe qui sera plus tard reformulé par Euler, Lagrange et



Hamilton. La grandeur « action » est homogène à une énergie multipliée par un temps. Plus précisément, en mécanique newtonienne, il s'agit de la différence entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle – notée souvent L, ou Lagrangien – multipliée par le temps. Voici comment Maupertuis formule ce principe : « Lorsqu'il

Quelques principes

Newton
Principe de l'attraction gravitationnelle.

Galilée et Newton
Principe d'inertie.

Newton
Principe d'action et de réaction.

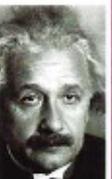
Maupertuis
Principe de moindre action.

Helmholtz
Premier principe de la thermodynamique.

Carnot
Deuxième principe de la thermodynamique.

Nernst
Troisième principe de la thermodynamique.

Principe de relativité



énoncé par Albert Einstein

Un principe célèbre

arrive quelque changement dans la Nature, la quantité d'Action employée pour ce changement est toujours la plus petite qu'il soit possible. » Le principe de Fermat devient ici un cas particulier du principe de moindre action. Le principe de moindre action est un des principes les plus fondamentaux et universel de la physique. En 1900, **Planck** montre



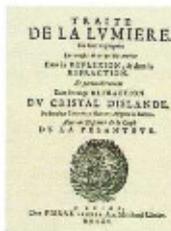
l'existence d'un quantum d'action $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ J.s. Tout phénomène met en jeu une quantité d'action égale au moins à h ; cette découverte marque le point de départ de ce qui deviendra la physique quantique.

PRINCIPE DE HUYGENS



Christian Huygens était l'un des plus tenaces de Newton dans le débat qui divisait les physiciens au XVII^e et qui portait

sur la nature de la lumière. Selon Newton, la lumière est formée de corpuscules massifs. Selon Huygens, il s'agit d'un phénomène, d'une onde. Afin de rendre compte de l'ensemble des effets optiques connus à son époque, Huygens est amené à postuler un principe relatif à la manière dont l'onde lumineuse se propage. Le principe de Huygens dit que tout point du front d'onde se comporte à son tour comme un point émetteur d'ondes. Ce principe très fécond se heurte cependant à des difficultés, en particulier celui-ci, que Fresnel et Kirchhoff tâcheront de résoudre : un point émetteur émet-il une onde secondaire indifféremment dans toutes les directions, avec la même intensité dans toutes les directions ? Si non,



quelle est l'allure que prend une onde secondaire ? Une deuxième difficulté se révèle lorsque l'on découvre

LA THERMODYNAMIQUE ET SES PRINCIPES

que l'onde lumineuse est polarisée... Malgré tout, le **principe de Huygens** est très commode dans le cadre restreint de son domaine de validité.

LE PRINCIPE ZÉRO

La thermodynamique s'appuie sur quatre principes en tout : du principe zéro au troisième principe.

comme l'énergie cinétique moyenne d'agitation des particules qui composent la matière et annonce que deux corps à des températures différentes évoluent vers l'équilibre thermique caractérisé par l'égalité de leur température. En réalité, ce principe peut se déduire du second principe et n'est donc pas un vrai principe.

LE PREMIER PRINCIPE

Le premier principe de la thermodynamique postule que la grandeur énergie se conserve. Plus précisément, au cours de toute transformation, la grandeur énergie demeure la même entre l'état initial et l'état final. C'est le principe de conservation de l'énergie énoncé par **Helmholtz** à la fin du XIX^e siècle. Ce principe interdit



l'existence d'une machine à mouvement perpétuel... de première espèce. De « première espèce » pour signaler que

LE SECOND PRINCIPE

ce genre de machine violerait le premier principe. En clair, si l'on extrait de l'énergie à une machine qui fonctionne de manière cyclique, elle finira par s'arrêter. Le second principe de la thermodynamique ou principe de Carnot est un principe d'évolution. Il a été énoncé en 1824, avant le premier principe. Il existe plusieurs formulations de ce principe, la plus simple étant sans doute celle-ci : la chaleur se transmet toujours d'un corps chaud à un corps froid, jamais l'inverse. D'un point de vue formel, on définit une grandeur notée S appelée « entropie », homogène à une énergie divisée par une température, et l'on montre que dans toute transformation d'un système fermé, l'entropie ne peut que croître. Au mieux, elle reste constante (transformation réversible). On identifie souvent l'entropie avec le désordre. Le second principe dit alors que le désordre d'un système fermé ne peut que croître au cours d'une transformation. On rétorque parfois que les systèmes biologiques violent ce principe puisqu'un être vivant est un système ordonné. En effet, mais un être vivant n'est pas un système fermé puisqu'il échange matière et énergie avec son environnement... Dans le cas contraire, il ne serait pas vivant.

TROISIÈME PRINCIPE

Le troisième principe de la thermodynamique, appelé aussi



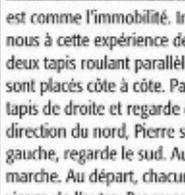
principe de Nernst car c'est **Walter Nernst** qui l'énonce en 1904, dit qu'au

zéro absolu, la capacité calorifique de tout corps tend vers zéro. En réalité, la formulation exacte de ce principe est quelque peu plus technique et compliquée que ce que nous venons d'énoncer.

PRINCIPES DE RELATIVITÉ

PRINCIPE DE RELATIVITÉ DE GALILÉE

Galilée est l'un des premiers à prendre conscience que la notion de vitesse est relative. Il est en tout cas le premier à énoncer clairement que le mouvement à vitesse constante



est comme l'immobilité. Intéressons-nous à cette expérience de pensée : deux tapis roulant parallèle nord-sud sont placés côte à côte. Paul est sur le tapis de droite et regarde dans la direction du nord, Pierre sur le tapis de gauche, regarde le sud. Aucun ne marche. Au départ, chacun voit le visage de l'autre. Progressivement, la distance qui les sépare diminue à vitesse constante, ils se croisent, puis se retrouvent dos à dos. Comment Paul peut-il savoir si c'est son tapis qui avance vers le nord ou si c'est celui de Pierre qui avance vers le sud ? Galilée répond : aucune expérience de mécanique ne permet de faire la distinction entre ces deux situations. Elles sont parfaitement équivalentes, symétriques. Cette symétrie repose sur le fait que la vitesse est une notion qui n'a pas de sens dans l'absolu. Elle est toujours relative. La seule chose que Paul peut dire est : « je suis en mouvement par rapport à Pierre. » De même, la seule chose que Pierre peut dire est : « je suis en mouvement par rapport à Paul. » La question : « suis-je en mouvement ? » n'a pas de sens. Supposons à présent que ce soit le moteur du tapis de Paul qui soit en fonctionnement, celui du tapis de Pierre étant en panne. Paul peut très bien faire tous ces raisonnements et calculs en considérant que son tapis est en panne et c'est celui de Pierre qui est en fonctionnement. Il peut aussi considérer l'inverse, comme il peut aussi considérer que chacun des tapis avance avec une vitesse moitié moindre par rapport au fonctionnement habituel, ou encore que l'un avance à 1/3 de la vitesse habituelle et l'autre à 2/3, etc.

PRINCIPE DE RELATIVITÉ D'EINSTEIN

Albert Einstein postule qu'aucune expérience de physique, pas même optique ou autre, ne permet de dire lequel des deux tapis est en mouvement, car le mouvement rectiligne uniforme est bel et bien relatif pour toute la physique et pas uniquement en mécanique. Cela signifie qu'aucune expérience ne peut me permettre de savoir si le sous-marin dans lequel je suis enfermé est à l'arrêt, moteur coupé, ou en mouvement rectiligne à vitesse constante. C'est en

imposant ce **principe de relativité** à l'électromagnétisme qu'Einstein aboutit



à la conclusion qu'espace et temps ne sont pas indépendants mais liés.

PRINCIPE DE MACH

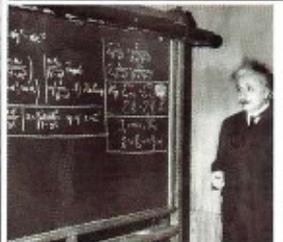
Le mouvement rectiligne et uniforme, c'est-à-dire celui qui s'effectue à vitesse constante, est relatif. Qu'en est-il si la vitesse change, c'est-à-dire s'il y a accélération ? Newton s'était déjà posé cette question et avait répondu : l'accélération, elle, n'est pas relative mais absolue. Prenons le cas d'un manège de laboratoire. De l'intérieur, je vois le paysage extérieur défilier autour de moi dans le sens des aiguilles d'une montre. Si je ne suis pas plaqué contre les bancs, c'est que c'est le laboratoire qui tourne autour de moi. Si je suis plaqué contre les bancs, c'est que c'est bien le manège qui tourne. À cela, **Mach** répond : imaginons que le



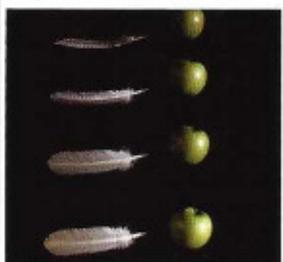
manège soit mis en rotation, puis le moteur coupé, le manège continuant son mouvement de rotation en roue libre sur son inertie. Je suis plaqué contre les bancs. Je peux donc dire que je tourne. Supposons qu'ensuite, dans un deuxième temps, tout l'univers disparaisse à part moi et le manège. Pourrais-je encore dire que je tourne ? Autrement dit, serai-je encore plaqué contre les bancs ? Si je suis toujours plaqué, c'est qu'en effet, je peux continuer à dire que je tourne. Mais comme il n'y a plus rien par rapport auquel je puisse tourner, c'est que le mouvement de rotation est absolu. Mais il est possible que contrairement à ce que pense Newton, le mouvement de rotation ne soit pas absolu. S'il est relatif, alors, à l'instant même où l'univers disparaît, je ne me sentirai plus plaqué contre les bancs. Intuitivement, on sent encore mieux l'argument de Mach, ou principe de Mach, si plutôt que de faire disparaître l'univers, on imagine que toutes les galaxies de l'univers se mettent à tourner autour du manège avec une vitesse angulaire égale à celle du manège. Dans ce cas, l'univers entier et le manège tournent ensemble, ce n'est pas en observant l'univers que nous pourrions dire que le manège tourne. C'est en observant notre laboratoire que nous pourrions percevoir la rotation. Mais dans ce cas, ne serait-il pas plus raisonnable de dire que c'est le laboratoire qui tourne et non l'ensemble constitué du manège et de l'univers ? Ainsi, Mach pense que l'accélération (pris ici dans l'exemple de

l'accélération centripète) est relative. Si, dans la pratique, lorsque nous mettons en route le moteur du manège, ce sont les passagers du manège qui sont plaqués contre les bancs et non les techniciens du laboratoire contre les murs, c'est uniquement parce que – dit Mach – la masse mise en rotation (celle du manège) est très faible par rapport à celle de l'univers. Si le manège pesait autant que l'univers ou si la mise en rotation du manège mettait également en rotation l'univers, les techniciens du laboratoire se verraient plaqués contre les murs... On le voit, il est difficile de réaliser une expérience qui permettrait de tester le principe de Mach. Difficile, mais pas impossible : les tentatives n'ont jamais abouti.

PRINCIPE D'ÉQUIVALENCE



Einstein postule une égalité, une équivalence entre la masse grave et la masse inerte. La masse grave, c'est celle qui intervient dans la formule de la gravitation : elle possède une propriété attractive. La notion de masse inerte – indépendante de la propriété attractive – met en avant le fait que modifier la vitesse d'un corps est d'autant plus difficile que le corps est massif, qu'il possède de l'inertie. Si les masses ne s'attiraient pas, cette « inertie » resterait valide. L'égalité de la masse grave et de la masse inerte, appelée principe d'équivalence a pour conséquence que dans le vide, une plume et un marteau chutent ensemble. En effet, si le marteau pèse 1 000 fois plus que la plume, la force qui la tire (appelée poids) est 1 000 fois plus importante, mais en même temps il est 1 000 fois plus difficile à mettre en mouvement. Ces deux effets se compensent et la **chute** s'effectue



indépendamment de la masse du corps en chute. Si le marteau n'était pas 1 000 fois plus difficile à mettre en mouvement mais 2 000 fois plus difficile, le marteau arriverait au sol après la plume ! L'expérience montre que, jusqu'à présent, il n'a pas été possible de déceler une différence dans les temps de chute. Aussi, on admet le principe d'équivalence... jusqu'à preuve du contraire. L'expérience ultramoderne MICROSCOPE (MICRO-Satellite à traînée Compensée pour l'Observation du Principe d'Équivalence) va peut-être justement rendre bientôt caduque le principe d'équivalence.