

**NEWTON**  
  
**À LA PLAGE**



YANN MAMBRINI

**NEWTON**



**À LA PLAGÉ**

**LES GRANDES IDÉES DE LA PHYSIQUE  
DANS UN TRANSAT**

**DUNOD**

### Crédits iconographiques

Toute omission qui nous serait signalée se verra rectifiée dans le prochain tirage.

**P. 10 :** © devke / iStock. **P. 84 :** © Wittayayut / iStock.

**P. 140 :** © ESA/Hubble & NASA; Acknowledgment: Judy Schmidt.

**P. 168 :** © EHT Collaboration.

Principe de collection, conception et illustration de la couverture:

Marie Sourd, Atelier AAAAA

Crédits typographiques: *Grotesque6* © Emilie Rigaud,

*A is for* (titraillie) & *Carrara* © Hoftype (texte courant)

Illustrations de l'intérieur: Rachid Marai

© Dunod, 2021

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

[www.dunod.com](http://www.dunod.com)

ISBN 978-2-10-081753-5

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2<sup>o</sup> et 3<sup>o</sup> 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 donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

## PROLOGUE



# DES LOIS ET DE LA PHYSIQUE

Le plus impressionnant, c'est que la Nature obéisse à des lois. Le plus étonnant, c'est que celles-ci s'expriment dans un langage commun : les mathématiques. Cette extraordinaire découverte, nous la devons aux scientifiques qui ont su repérer des motifs universels dans l'ordre du monde et les transcrire en formules. L'un d'entre eux, et peut-être le premier, fut Isaac Newton, qui a réussi à unifier des phénomènes célestes et terrestres à l'aide d'une élégante théorie mathématique.

La compréhension des phénomènes naturels a hanté l'humanité depuis des millénaires. Il s'agissait d'abord de survivre : nos ancêtres avaient par exemple intérêt à anticiper la trajectoire d'un projectile, ou encore à identifier quels objets flottent et quels objets coulent. Nous nous sommes ainsi forgé une intuition, parfois trompeuse,

des phénomènes du quotidien. Puis de grands penseurs, poussés par la curiosité, ont tenté d'élaborer des descriptions complètes du cosmos. Il faudra cependant attendre les travaux de Newton pour entrevoir une description globale des choses de la Nature.

Dans plusieurs ouvrages majeurs publiés entre 1687 et 1704, le savant anglais expose sa vision du monde, celle qui dominera tous les débats scientifiques durant plus de deux siècles. En posant le cadre de la physique dite *classique*, perfectionnée ensuite par des générations de physiciens, Newton aura ouvert la voie vers la science moderne, et définitivement déboulonné la statue d'Aristote dont l'ombre planait jusque-là sur les réflexions des savants. Qu'on en juge : Newton a introduit le concept d'action à distance dans le vide ; il a inventé le calcul infinitésimal, un outil dont la recherche actuelle ne peut se passer ; il a unifié la description du monde dans une théorie de la gravitation universelle. Il est le premier à avoir décomposé la lumière blanche, à avoir expliqué les effets de marée ainsi que les arcs-en-ciel, et à avoir décrit les mathématiques du mouvement des planètes. Même ses incursions du côté de l'alchimie ont été fécondes, en l'amenant à réfléchir sur les corps « sociables », préfigurant la théorie des « affinités chimiques » du XIX<sup>e</sup> siècle. S'intéressant à des domaines aussi variés que la gravitation, la lumière, l'astronomie ou la chaleur, Newton fut un génie universel.

Sa vision de la lumière, du mouvement et de la gravité était évidemment limitée par les connaissances de

son époque. Au xx<sup>e</sup> siècle, forts de nouveaux outils, les scientifiques ont opéré quelques retouches à sa description de la Nature, et ont investi de nouveaux territoires. Ils ont exploré le domaine de l'infiniment petit : la révolution quantique nous a révélé le monde déroutant des particules, dont le comportement échappe aux lois de la physique classique. Les scientifiques se sont également aventurés dans l'infiniment grand en tentant de saisir l'Univers tout entier. Les théories de la relativité ont ainsi bouleversé notre compréhension de la gravité et ont complètement redéfini les notions, autrefois familières, d'espace et de temps. La cosmologie considère à présent des structures exotiques comme les trous noirs, et traque des influences mystérieuses comme celle de la matière noire. En remontant aux tout premiers instants après le Big Bang, les scientifiques envisagent des formes de gravité répulsive défiant l'intuition ; celles-ci sont toujours à l'œuvre de nos jours, menant la danse de l'expansion de notre Univers, et détermineront son futur...

Avec Newton pour guide, nous allons partir à la découverte des grandes idées de la physique d'aujourd'hui. Ce voyage nous mènera du concept d'énergie à celui d'attraction gravitationnelle, et nous emportera jusqu'aux confins du cosmos tout en nous révélant les mystères de la lumière. À chaque étape, nous verrons combien la vision de Newton est toujours prégnante. Comme un organisme vivant, les lois de la physique s'adaptent aux nouvelles observations pour broser une description qui se veut la plus complète et la plus précise de notre Univers.





## CHAPITRE 1



# LA NATURE DE L'ÉNERGIE

*Newton est sans aucun doute l'un des grands génies de la science. Il est connu pour avoir compris, entre autres phénomènes, le mouvement des planètes, la chute des corps, la composition de la lumière et les effets de marée. Pour ce faire, il a su exploiter intelligemment l'un des concepts fondamentaux de la physique : celui de quantité de mouvement, intimement lié à celui d'énergie.*

La légende veut qu'Isaac Newton ne se soit jamais éloigné d'une étroite bande de terre entre Londres, Cambridge et sa région de naissance, le Lincolnshire. Newton voit le jour le 25 décembre 1642 dans la ferme familiale – le manoir de Woolsthorpe – d'un père fermier illettré et d'une mère de rang social plus élevé dont le frère a étudié à Cambridge pour devenir prêtre. Son enfance



n'est pas vraiment douce. Il ne connaîtra jamais son père, décédé quelque mois avant sa naissance. Alors que le jeune Isaac n'a que trois ans, sa mère se remarie et quitte le manoir, le laissant seul avec sa grand-mère. À douze ans, il rejoint l'école de Grantham, et est alors hébergé par le pharmacien de la ville dont la bibliothèque est bien fournie. Il entre à dix-

neuf ans à l'université de Cambridge, au Trinity College. C'est en travaillant comme valet auprès de ses condisciples plus aisés de l'université qu'il peut subvenir à ses besoins et suivre les cours magistraux. Mais Newton se comporte avant tout en autodidacte, en dévorant tous les ouvrages scientifiques disponibles à la bibliothèque et en reproduisant certaines expériences.

En 1665, alors que Newton commence à atteindre sa pleine maturité mathématique, la peste noire frappe lourdement Cambridge. L'université ferme et Newton est condamné à s'isoler pendant un an dans le manoir de Woolsthorpe. Cet isolement fut sans conteste le plus fécond de l'histoire de la science moderne. C'est en effet durant ces mois de solitude que Newton développe sa théorie de la gravitation universelle, et qu'il entrevoit les premières lueurs de la science de la lumière. Il n'a alors que 22 ans. Il reprendra ensuite ces idées dans les ouvrages majeurs que sont *Opticks* («Optique») et *Philosophiæ*

*naturalis principia mathematica* («Principes mathématiques de la philosophie naturelle»). Ses travaux sur l'optique et sur la dynamique font de lui l'un des plus grands (si ce n'est le plus grand) scientifique de tous les temps.



## L'ÉNERGIE SE CONSERVE

Ce qui étonne à la lecture des écrits de Newton, c'est la modernité avec laquelle il s'approprie les problèmes de la physique de l'époque. Encore aujourd'hui, la plupart des calculs effectués par les ingénieurs et dans les centres de recherche spatiale s'inspirent de sa théorie des forces et du mouvement. Nous aurons largement l'occasion de revenir sur les notions de force et de mouvement plus tard. Dans ce premier chapitre, je voudrais insister sur une conséquence des théories de Newton parfois sous-estimée : la conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie. Mais qu'entend-on par conservation, et qu'est-ce que la quantité de mouvement ?

En physique, une grandeur est dite *conservée* quand, dans un système isolé (un système qui ne subit aucune influence de l'extérieur et n'interagit pas avec son environnement), sa valeur ne change pas dans le temps, ou dans l'espace. La plupart des théories modernes se fondent sur ce principe, dit *de symétrie*. Cette notion de symétrie vous est sans doute familière dans le cas des objets (un papillon est symétrique par rapport à l'axe de son abdomen ; la corolle d'une fleur est symétrique par rotation ; etc.) ; elle s'applique aussi aux lois physiques.

« Platon est  
mon ami, Aristote  
est mon ami,  
mais ma meilleure  
amie est la vérité. »

Isaac Newton,  
*Quelques questions  
philosophiques* (1664)

C'est la mathématicienne  
allemande Emmy Noether  
(1882-1935) qui comprit la  
puissance du principe de  
symétrie dans les années  
1910, mais c'est Newton  
qui en élaborera les prémices.  
L'idée est que toute symé-  
trie, dans un système, est

intimement reliée à une quantité conservée. Si ce que vous étudiez ou observez est invariant par une translation dans l'espace, c'est-à-dire si les lois auxquelles obéit le système sont les mêmes ici et quelques mètres plus loin, voire aux confins de l'Univers, alors on dit que la *quantité de mouvement* est conservée, et celle-ci s'exprime comme le produit de la masse par la vitesse. Si, en plus, ces lois sont les mêmes aujourd'hui, demain et jusqu'à la fin des temps (ce qui correspond à une translation dans le temps), c'est l'*énergie* qui est conservée.

Les notions de quantité de mouvement, d'énergie et de symétrie étaient très floues à l'époque de Newton, et donnaient lieu à des débats épistolaires acharnés. Pour Newton, pas de doute : c'est la quantité de mouvement qui est conservée. Le physicien et philosophe allemand Gottfried Leibniz (1646-1716) considérait plutôt que c'était une « force vive », *vis viva*, correspondant au produit de la masse par la vitesse élevée au carré (ce que l'on pourrait actuellement identifier à l'énergie de mouvement ou *énergie cinétique*, à un facteur multiplicatif près). D'autres chercheurs comme le chimiste français Antoine

Lavoisier (1743-1794) ont vu dans la chaleur une autre forme de *vis viva*.

Finalement, après de nombreux débats, mesures et articles sur le sujet, il est confirmé que dans un système isolé, l'énergie cinétique tout comme la quantité de mouvement sont conservées. Si le système n'est pas isolé (s'il perd de la chaleur, par exemple), l'énergie n'apparaît ou ne disparaît pas pour autant : un bilan minutieux montre que des échanges d'énergie s'effectuent avec l'extérieur, et les différentes formes d'énergie qui interviennent peuvent être converties d'une forme à une autre. Le mouvement n'est donc pas la seule source d'énergie ; il existe des formes d'énergie de natures électromagnétique, nucléaire ou encore gravitationnelle, comme nous allons le voir. L'histoire de tous les phénomènes physiques peut ainsi se résumer en des conversions subtiles de l'une à l'autre forme.

**« Rien ne se crée, rien ne se perd,  
tout se transforme. »**

Cette loi de conservation a son pendant en chimie, notamment avec la conservation de la masse lors des réactions chimiques. Antoine Lavoisier, en 1772, a ainsi remarqué qu'en brûlant du soufre dans l'air, étrangement, le résidu solide qu'il récupérait sous la cloche était... plus lourd qu'avant sa combustion. C'est quand il eut l'idée de peser l'air dans la cloche et qu'il constata que sa masse avait diminué qu'il comprit que deux éléments, l'oxygène et le soufre, s'étaient

combinés lors de la combustion. La masse totale du système {soufre + oxygène} était donc bien conservée. En 1777, Lavoisier a énoncé sa célèbre loi :

« Rien ne se crée, ni dans les opérations de l'art, ni dans celles de la nature, et l'on peut poser en principe que, dans toute opération, il y a une égale quantité de matière avant et après l'opération ».

Newton a donc été l'un des premiers à mettre en équation des lois de conservation du mouvement, que Leibniz traduira par des lois de conservation de l'énergie. Newton les mettra en perspective en introduisant son concept de *force*, les forces étant les sources génératrices du mouvement. Il n'est évidemment pas seul à avoir développé ces idées, mais il est le seul à avoir su faire la synthèse de ces principes et en tirer une explication rationnelle du monde qui l'entoure, dans sa globalité.

### **Le pendule de Newton**

Une belle illustration du principe de conservation de la quantité de mouvement est offerte par un jouet que l'on trouve dans le commerce : le pendule de Newton<sup>1</sup>.



Il consiste en une série de six à dix billes métalliques, au contact les unes des autres, suspendues à une barre horizontale au moyen de fils. Pour l'actionner, il suffit de se saisir d'une bille à une extrémité et de la lâcher. Lors du choc, la bille située à l'autre extrémité du jouet se soulève, décrit un mouvement de balancier et revient à sa position initiale pour percuter sa voisine, éjectant à nouveau la première bille, et ainsi de suite. Le manège semble ne jamais vouloir s'arrêter. La physique en est toute simple : la quantité de mouvement que l'on imprime à la première bille, en l'écartant puis en la lâchant, se transmet à toutes les autres billes du système jusqu'à la dernière par une succession de chocs (on parle de chocs «élastiques», c'est-à-dire sans perte d'énergie). La dernière bille va alors remonter à la même hauteur que celle que vous avez lâchée, puisqu'elle aura reçu toute sa quantité de mouvement. Elle redescendra ensuite, et le manège repartira dans l'autre sens.

Et si maintenant vous lâchez deux billes en même temps, quel sera le résultat à l'autre bout de la chaîne ? Une bille qui ira deux fois plus haut, ou deux billes qui iront à la même hauteur ? Réponse : deux billes s'élèveront dans les airs de l'autre côté.



### **UNE HISTOIRE DE POTENTIEL**

Ce qui est assez frappant lorsqu'on se penche sur les écrits de Newton, c'est son approche très géométrique de la physique et de ses phénomènes. Il présente peu d'équations algébriques et propose beaucoup de figures,

ce qui était assez commun à l'époque (sous l'influence du savant grec Euclide, pour qui tout était géométrie). Il est donc assez difficile, pour un physicien moderne, de lire les œuvres originales de Newton. Mais tout y est : il suffit de traduire en langage algébrique, à l'aide d'équations et de symboles, les multiples droites, angles et intersections qui émaillent les pages de ses ouvrages. Leibniz lui-même, avec lequel Newton a longtemps correspondu (surtout sur des questions touchant le temps, Dieu et la physique), a proposé une interprétation intéressante des thèses de Newton, en formalisant le concept d'énergie.

Le mot énergie est lui-même tiré du grec *en* (« dans ») et *ergon* (« travail »). En résumé, l'énergie est la capacité de n'importe quel système à fournir un travail. C'est le cas de l'énergie cinétique (qu'un corps possède du fait de son mouvement), tout comme de l'énergie thermique (qui entraîne les moteurs thermiques, par exemple dans une voiture à essence) ou de l'énergie nucléaire (exploitée dans les centrales pour produire de l'électricité).

La valeur de l'énergie cinétique d'un objet, dans sa définition moderne, est égale à la moitié de sa masse, multipliée par sa vitesse au carré. Si on exprime la masse en gramme et la vitesse en centimètre par seconde, le résultat de l'opération s'exprime en *erg*. Une feuille d'arbre de 2 grammes qui tombe à la vitesse de 1 centimètre par seconde a une énergie cinétique de 1 *erg*. Un moustique en vol de 2 grammes à 3 kilomètres par heure a une énergie cinétique de 7 000 *ergs*. Par commodité, les physiciens emploient une autre unité de mesure, le