



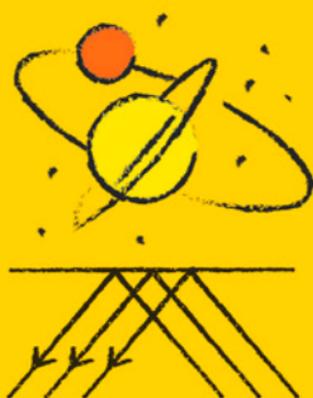
BRUNO MANSOULIÉ



TOUTE LA PHYSIQUE

[OU
PRESQUE] EN 15

ÉQUATIONS



Champs sciences

TOUTE LA
PHYSIQUE
[ou presque]
EN 15 ÉQUATIONS

Bruno Mansoulié

Illustrations de Lison Bernet

**TOUTE LA
PHYSIQUE**
[ou presque]
EN 15 ÉQUATIONS

Champs sciences

© Éditions Flammarion, Paris, 2017 ;
2023, pour cette édition « Champs »
ISBN : 978-2-0804-1947-7

Avant-propos

Le monde en équation(s)

Je suis chercheur dans le domaine de la physique des particules – qu'on devrait plutôt appeler la « physique de l'élémentaire ». Mon but est de comprendre quels sont les constituants fondamentaux de la nature et leurs interactions, des plus petites particules jusqu'aux structures les plus étendues de l'Univers.

Avec cet ouvrage, j'aimerais, dans la mesure du possible, réconcilier tous les lecteurs avec les équations. Je pense à ceux qui ne les ont jamais fréquentées, ou ceux pour qui les premières rencontres ont été décevantes, voire traumatisantes.

Nous autres physiciens vivons avec deux visions : celle de tout le monde bien sûr, mais aussi celle que procurent les lois physiques, les équations. Le public admet très bien cette dualité pour un musicien : ce dernier est un artiste, mais il possède aussi une large connaissance théorique et une solide technique. Tout le monde comprend qu'avec beaucoup de pratique, le musicien s'approprie l'aspect technique

tout en restant libre d'accéder à une vision artistique. On l'admet moins pour un physicien, que l'image d'Épinal représente perdu dans ses équations et déconnecté de la réalité.

Il est vrai qu'une grande partie du savoir scientifique se présente sous forme de lois, d'équations. Mais, même si cela peut surprendre, les équations peuvent devenir si familières que la vision du monde « par les équations » et la vision courante finissent par se confondre.

Un exemple ? Lorsque je regarde un arc-en-ciel, je n'ai pas directement à l'esprit les lois de la réfraction de la lumière. Je suis, comme tout le monde, admiratif de la beauté du paysage, soulignée par l'arc. Mais « derrière », il y a un tout un pan de savoir et de pratique sur la lumière, sa propagation, sa nature physique, qui s'intègre silencieusement à ma vision de l'arc-en-ciel. Exactement comme un musicien jouit du morceau qu'il écoute sans prendre vraiment conscience de sa tonalité, du type d'accord et de la structure rythmique utilisés. Certes, si vous l'interrogez à brûle-pourpoint, il vous répondra certainement et saura préciser chacun de ces points techniques... sans que cela ne dégrade en rien sa sensibilité pour le morceau.

De la même façon, connaître les équations de la physique ne réduit en rien ma vision d'un arc-en-ciel. Au contraire, cela en accroîtrait plutôt la beauté : quelle chance de vivre dans cet univers-là,

où les lois de la physique sont telles qu'elles engendrent des phénomènes aussi variés, et dont certains, comme un arc-en-ciel, n'ont d'autre utilité que de nous émouvoir !

Vers l'équation du tout

Le choix des équations traitées dans ce livre pourra paraître arbitraire au physicien professionnel ou amateur. Voici ce qui a guidé ma sélection : chaque équation témoigne d'une évolution ou parfois d'une véritable révolution scientifique.

Chacune trahit en effet une certaine conception du monde ou d'un phénomène : lumière, matière, chaleur, etc. Les premières lois, formulées alors que les mathématiques investissent la physique, restent timides, restreintes à un domaine d'application, comme les lois de la réflexion et de la réfraction de la lumière.

Puis l'ambition s'accroît : il s'agit de s'inscrire dans un cadre toujours plus grand avec une visée universelle. C'est ainsi que Isaac Newton comprend que l'attraction entre Terre et Lune est identique à la force qui fait tomber une pomme d'un arbre ; de même, Maxwell unifie électricité et magnétisme, tandis que la physique et la chimie moderne expliquent que tous les éléments chimiques sont construits à partir de protons, neutrons et électrons. Au début du XX^e siècle, la relativité et la mécanique

quantique remettent en cause les notions mêmes d'espace, de temps et de matière, avant que la cosmologie ne finisse par prendre l'Univers entier comme sujet d'étude.

Aujourd'hui, l'obsession des physiciens de l'élémentaire est de tout englober dans une seule théorie « minimale ». Or, comme nous le verrons à la fin de ce livre, la formulation moderne d'une théorie physique est, dans l'idéal, entièrement contenue dans une seule équation. C'est pourquoi on entend souvent dire que les physiciens cherchent « l'équation du monde », ou « l'équation du tout ». Évidemment, cette idée est caricaturale. À quoi pourra ressembler l'équation ultime ? Je n'ai pas la réponse, mais, à travers les exemples qui suivent, j'essaierai de vous donner le goût pour cette quête d'une formule élégante et puissante, susceptible de nous aider à comprendre le monde.

Sublimes équations...

Les équations de la physique suscitent à la fois respect, fascination et crainte. Même si on n'a pas fait de longues études, ou si l'on est rebelle à toute forme de mathématiques, on connaît $E = mc^2$ et on l'associe vaguement à la puissance surhumaine de l'énergie nucléaire. Dans l'imaginaire collectif, les équations restent le symbole du pouvoir de la

science, mais aussi de sa froideur, de sa déshumanisation.

Lorsque j'interviens auprès du grand public, c'est la première exigence : « Et surtout, pas d'équations ! » Je tente pourtant de leur répondre que certaines sont très simples, n'expriment rien de plus qu'une proportionnalité ou une dépendance directe d'une grandeur par rapport à une autre. L'effort pour les comprendre n'est certainement pas plus important que pour décrypter la notice de mise en œuvre d'une boîte de connexion à Internet. Rien n'y fait : pour tout organisateur de conférences ou tout journaliste, l'équation fait fuir le public.

Pourtant, l'auditoire sait aussi que les sciences, et les mathématiques à leur service, sont à l'œuvre dans tous les aspects de la vie courante, qu'un avion ou un smartphone ont été conçus et réalisés par des ingénieurs qui, eux, maîtrisent et manipulent les équations. Mais on préfère l'ignorer, leur laisser ces outils rebutants.

Je crois que cette défiance envers les mathématiques en général, et envers les mathématiques comme lois physiques en particulier, a des causes plus profondes que la simple aversion pour les formules. Les équations nous obligent à une certaine discipline intellectuelle. Elles ne disent pas le contraire de ce qu'elles indiquaient la veille. Elles nous obligent à préciser notre pensée, à ne pas rester dans le flou lorsque nous parlons à quelqu'un. Et

cette discipline peut gêner. C'est si commode parfois, le flou...

Je ne dis pas que les équations de la physique sont « vraies », je dis qu'elles sont « sincères ». En écrivant les équations de la mécanique newtonienne qui, depuis le XVII^e siècle, décrivent le mouvement des astres, des obus et des manèges, je ne prétends pas expliquer l'ensemble du monde, soit pourquoi le Soleil brille, pourquoi les petites fleurs poussent ou pourquoi j'ai mal à la tête. Mais ces équations me proposent un modèle, un ensemble cohérent de relations entre les positions observées des astres ou entre les forces que je ressens dans un manège. Libre à moi d'appliquer ce modèle à bon escient, aux objets et phénomènes que j'ai moi-même estimés faire partie de son domaine de validité. Je pourrais même tester les limites de ce domaine, faire des mesures, effectuer des expériences ou simplement explorer par l'esprit les conséquences de ces équations : décrivent-elles le monde à très grandes ou à très petites distances ? Etc.

Liberté équation

Je fais souvent aux étudiants la recommandation suivante : « Il n'est pas question de tout savoir. Ce qu'il faut, c'est savoir ce que l'on sait, et savoir ce que l'on ne sait pas. »

C'est ce que signifie une bonne équation en physique : elle résume ce que l'on sait, dans un certain domaine. Ses variables définissent les objets et les concepts dont on est en train de parler. Pas plus, pas moins.

Le maître mot est « liberté ». Cela peut sembler paradoxal, mais écrire une équation pour comprendre le monde, ce n'est pas réduire ce faisant notre vision du monde, mais bien l'inverse. C'est faire le choix d'une *certaine* vision d'une *certaine partie* du monde. Ce choix est librement consenti, et souvent consensuel. Ensemble, nous avons défini un langage commun et nous convenons qu'une partie, elle aussi convenue entre nous, des phénomènes du monde peut être décrite par cette équation. Et maintenant, nous pouvons avancer, utiliser ce modèle dans son domaine pour soigner les gens ou fabriquer des smartphones, et partir à la découverte du monde au-delà de ce domaine. Au moins nous ne risquons plus d'ergoter sur des définitions, de prendre des cas particuliers pour des généralités ni de nous laisser dicter notre vision du monde par d'autres.

Voilà pour la partie rationnelle. Mais les équations possèdent aussi un aspect sensible. Certaines simplement par leur graphisme, même si on ne comprend pas leur signification mathématique ou physique. La courbe sensuelle d'un ∂ , la flèche agressive d'un \vec{p} , ou la flèche ambiguë d'un \vec{d} ...

Certaines par l'élégance des concepts qu'elles utilisent.

D'autres, par leur puissance et l'étendue de leurs conséquences.

D'autres encore se placent sur un plan personnel : qui nous l'a enseignée, à qui nous l'avons enseignée, etc. Le moment où on l'a vue la première fois en cours ou dans un livre, et la période correspondante de notre vie privée. En quoi elle a changé notre vision du monde.

Les espaces intérieurs qu'elle évoque... Les rêves qu'elle suscite...

Chapitre premier

La loi de la réflexion de la lumière

$$\theta_r = -\theta_i$$



$$\theta_r = -\theta_i$$

Cette formule décrit comment un rayon lumineux se comporte lorsqu'il arrive sur une surface réfléchissante, la surface d'un lac ou un miroir par exemple. Elle a été établie par Euclide, au III^e siècle avant J.-C.

Cette loi est si simple qu'on pourrait presque se passer d'équation pour l'énoncer : elle nous dit que, pour trouver le rayon réfléchi par un miroir, il suffit de prendre le symétrique du rayon source par rapport à la perpendiculaire au miroir. Pourtant, parvenir à « expliquer » ce qu'est un reflet en énonçant cette loi, voilà qui constitue pour le coup une évolution fondamentale ! Avant la loi, je « vois », sans me poser trop de questions, un objet et son reflet dans l'eau. Après la loi, une partie de ce que je vois, le reflet, est « expliquée », reliée rigoureusement à une autre partie, l'objet reflété. Et pour comprendre cette relation, il est nécessaire de remettre en cause la notion même de « voir », ni plus ni moins !

Des reflets, il y en a partout. Dans la nature, à la surface de l'eau ou sur des pierres polies ; en ville, sur les vitres, les surfaces métalliques, etc. Pratiquement tout ce que nous voyons comporte ici ou là des reflets, au point que, quand nous voulons les éliminer, il faut mettre en œuvre une technologie sophistiquée : par exemple les verres « antireflets » des écrans, des lunettes ou des objectifs des appareils photos.

Mais qu'est-ce qu'un reflet ?

Nous ne pensons jamais aux lois de la réflexion. Nous ne nous demandons jamais : mais « pourquoi » ce reflet se forme-t-il donc ? On ne commence à y songer que si l'on dessine, si on peint, ou si on veut créer une image de synthèse sur un ordinateur.

Dans un environnement naturel, comme un paysage de jour, l'unique source de lumière est le Soleil. Je vois une montagne ou un arbre parce que certains rayons lumineux émis par le Soleil ont frappé cet objet et ont été réémis vers mon œil. Certains rayons du Soleil qui arrivent sur l'objet sont absorbés, d'autres sont diffusés dans toutes les directions : ces processus complexes sont à l'origine des couleurs, des teintes sombres ou claires – ils ne seront compris que bien plus tard.

Mais le cas du reflet peut être décrit simplement : un rayon lumineux qui arrive sur une surface réfléchissante en repart symétriquement au trajet d'arrivée, exactement comme une balle jetée contre un mur : qu'on la lance perpendiculairement au mur, et elle nous revient dans la main. Plus on la lancera en biais par rapport au mur, et plus sûrement elle s'éloignera du point d'impact.

C'est ce que dit l'équation de ce chapitre : les lettres θ_i et θ_r désignent les angles d'arrivée sur la surface (i pour « incident ») et de départ de la surface (r pour « réfléchi »).

Une fois cette loi énoncée, je peux « expliquer » pourquoi je vois le reflet d'une montagne dans un lac : la montagne est éclairée par le Soleil et réémet des rayons lumineux dans toutes les directions. Certains de ces rayons arrivent directement dans mon œil : je vois la montagne. Mais d'autres arrivent dans mon œil après avoir été réfléchis par la surface du lac : je vois son reflet. L'équation ci-dessus – et un peu de géométrie – montre que les rayons réfléchis forment pour moi une image symétrique de la montagne par rapport à la surface du lac.

J'y suis parfaitement habitué, et tous les peintres savent représenter les reflets, par intuition et observation : expliquer rationnellement comment se forme un reflet n'est pas en soi une révolution ! D'ailleurs, il s'agit d'une « explication » très partielle : elle ne décrit que les reflets, mais ni les couleurs, ni la diffusion, ni la réfraction... Elle ne dit

pas non plus pourquoi certaines surfaces sont réfléchissantes et d'autres non. Mais ce petit pas est fondamental dans sa démarche même : ne rien prendre de ce qu'on voit pour « sans intérêt » ou « inexplicable », interroger même les mots les plus courants, comme « voir » ou « regarder ». Tenter d'interpréter, de relier par des lois les plus simples possible, même au prix d'une profonde remise en cause.

Au fait, ça veut dire quoi, « voir » ?

J'ai eu beaucoup de chance avec mes profs de physique. Au lycée, en première, c'était un passionné, qui mettait un point d'honneur à réaliser des expériences périlleuses : pas pendant les heures de travaux pratiques, mais devant toute la classe, comme un spectacle, en *live* dirait-on aujourd'hui. Pour l'optique, on éteignait la lumière, il allumait une lampe à arc capricieuse et crépitante (il n'y avait pas de lasers à l'époque, qui lui auraient bien facilité la vie...), puis il interposait des lentilles ou des fentes, il lançait des miroirs tournants, et les rayons lumineux dessinaient sur les murs de la classe des figures étranges et éphémères qu'il nous encourageait à déchiffrer. Et ses montages marchaient presque toujours ; bref, du grand art.

Mais, avant ces démonstrations spectaculaires, ce prof avait passé la moitié d'un cours à nous expliquer que « voir » n'est pas jeter un regard, mais recevoir des