

VINCENT BOQUEHO

**TOUTE LA
PHYSIQUE**
À PORTÉE DE MAIN
NOUVELLE ÉDITION

DUNOD

Avec la collaboration scientifique de Michel Henry

Maquette de couverture : © Misteratomic

© Dunod, 2010, 2016, 2019 pour la présente édition

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-079537-6

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 donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

À mon père

SOMMAIRE

Avant-propos : comment lire ce livre ? XV

Prologue. Une introduction à la physique 1

- 1. À quelle espèce le physicien appartient-il ? 1
- 2. Un peu d'histoire des sciences 5

PARTIE 1

Mécanique – Forces et mouvement

Chapitre 1. Les bases de la mécanique : l'obsession du mouvement 13

- 1. Voyager tout en restant chez soi : la relativité du mouvement 13
- 2. Comment vaincre son inertie : le principe fondamental de la dynamique 20

Chapitre 2. Aux portes de l'infiniment grand : la force gravitationnelle 27

- 1. Une force subtile aux secrets bien gardés 27
- 2. Le pouvoir des marées : des planètes à la torture 37

Chapitre 3. Aux portes de l'infiniment petit : la force électrostatique 45

- 1. Qui s'y frotte s'y pique 45
- 2. Aux origines de toutes les forces 50

Chapitre 4. Retour à l'échelle humaine : les forces du quotidien 57

- 1. Le sol : pertes et profits des contacts rugueux 57
- 2. L'air et l'eau : des fluides visqueux 63
- 3. Pression et poussée d'Archimède 65

Chapitre 5. De mystérieuses influences issues du néant : les forces d'inertie 71

- 1. Une question de point de vue 71
- 2. Les conséquences à l'échelle terrestre 79
- 3. La force gravitationnelle est-elle une illusion ? 84

Chapitre 6. Silence, on tourne ! 89

- 1. La mise en rotation, une affaire de stratégie 89
- 2. Des conséquences qui donnent le tournis 94

PARTIE 2

Thermodynamique – De l'énergie à toutes les échelles

Chapitre 7. L'énergie : l'apologie du mouvement **109**

- | | |
|---|-----|
| 1. L'énergie au quotidien | 109 |
| 2. L'énergie cinétique : fours chauds et autres bolides | 112 |
| 3. L'énergie potentielle : pétrole et pommes bien mûres | 119 |

Chapitre 8. Comment récupérer l'énergie qui nous entoure ? **127**

- | | |
|--|-----|
| 1. Travailler plus pour gagner plus | 127 |
| 2. Le premier principe de la thermodynamique | 132 |
| 3. Créer de l'énergie : une mission impossible | 138 |

Chapitre 9. Les enseignements de l'entropie : l'effrayant destin de l'Univers **141**

- | | |
|--|-----|
| 1. L'augmentation du désordre : une fatalité | 141 |
| 2. Le secret du corps humain et des autres édifices structurés | 148 |
| 3. Effacer pour tout recommencer : une chimère | 150 |

Chapitre 10. Une plongée dans la mécanique des fluides **157**

- | | |
|--|-----|
| 1. Gaz, liquides et solides | 157 |
| 2. Les changements d'état | 162 |
| 3. La tension superficielle : des liquides qui collent à la peau | 165 |
| 4. Montgolfières et réfrigérateurs | 167 |
| 5. Ballons de foot et ailes d'avion | 170 |

Chapitre 11. Le son : une affaire de vibrations **175**

- | | |
|-------------------------------|-----|
| 1. L'onde acoustique | 175 |
| 2. Les instruments de musique | 179 |

PARTIE 3

Électricité et magnétisme – Des charges minuscules aux conséquences colossales

Chapitre 12. Quelques phénomènes électrostatiques **189**

- | | |
|---|-----|
| 1. Le moteur des charges : champ et potentiel | 189 |
| 2. Le courant électrique | 192 |
| 3. Foudre, éclairs et étincelles | 193 |

Chapitre 13. Les bases de l'électricité **203**

- | | |
|---|-----|
| 1. Un receveur universel : la résistance | 203 |
| 2. Quelques générateurs usuels : piles et condensateurs | 209 |
| 3. Propriétés de circuits simples | 212 |
| 4. La consommation énergétique des appareils | 216 |

Chapitre 14. Une interaction improbable : la force magnétique	223
1. Quelques constats autour des aimants	223
2. Les courants, créateurs de champ magnétique	229
3. Propriétés de la force magnétique	234
4. Synthèse sur l'interaction magnétique	238
Chapitre 15. Quelques phénomènes magnétiques	241
1. Plongée au cœur des aimants	241
2. Le champ magnétique terrestre	244
3. Moteurs et freins magnétiques	251
Chapitre 16. L'induction, un précieux couplage électromagnétique	255
1. Le champ magnétique, créateur de courants	255
2. Le fonctionnement des centrales électriques	260
3. Les courants sinusoïdaux au cœur de notre quotidien	265
4. La bobine, un composant qui ne se laisse pas faire	267
Chapitre 17. Quelques applications de l'induction	273
1. Équipements électroacoustiques : micros et haut-parleurs	273
2. Manipulations de très hautes tensions : les transformateurs	275
3. Oscillateurs et filtres électriques	279
Chapitre 18. La révolution du transistor	287
1. Les semi-conducteurs au cœur de la révolution	287
2. La diode : un composant à prendre du bon côté	290
3. Le transistor : un amplificateur de courant	292
4. L'ère du numérique	295

PARTIE 4

Optique – Lumière et autres ondes électromagnétiques

Chapitre 19. La lumière : un véhicule électromagnétique	303
1. Électricité et magnétisme, un couple inséparable	303
2. Les ondes électromagnétiques	305
3. La nature ondulatoire de la lumière	309
4. Des ondes radio aux rayons X : tout un spectre à disposition	315
5. L'énergie de la lumière	321
Chapitre 20. Quelques phénomènes lumineux	325
1. Une représentation commode : le rayon lumineux	325
2. Des interactions riches en couleurs	328
3. Quand la lumière taille au plus court	331
4. Déviations inopinées	335
5. Irisations et autres arcs-en-ciel	338
6. La lumière polarisée	341

Chapitre 21. Les instruments d'optique	347
1. Des miroirs pas toujours fidèles	347
2. Lentilles et autres loupes	350
3. L'œil, un instrument comme un autre	352
4. Lunettes astronomiques et télescopes	356

PARTIE 5

Physique quantique – Une plongée dans le monde de Lilliput

Chapitre 22. La lumière, onde ou corpuscules ?	363
1. Les photons, des particules que personne n'attendait	364
2. Des ondes de probabilité insaisissables	369
3. Lampes de chevet et lampes stellaires	373
4. Qu'est-ce qui est réel ?	376

Chapitre 23. La matière, corpuscules ou onde ?	381
1. Une énigme à résoudre : la stabilité des atomes	381
2. Une hypothèse lumineuse	386
3. Conséquence : à quoi ressemble un atome ?	389
4. La lumière et la matière : deux particules, une seule onde	394
5. Des particules unies... pour la vie ?	399
6. L'effet tunnel : un passe-muraille	402
7. La partie cachée de l'Univers	405

Chapitre 24. La chimie, fille naturelle de la physique quantique	411
1. La structure électronique des atomes	411
2. Les électrons atomiques en quête de camarades	416
3. Formation et transformation des molécules	420

Chapitre 25. Le spin : la danse du twist des particules	431
1. Une rotation quantique fondamentale	431
2. Application : l'informatique quantique	438

PARTIE 6

Relativité et physique nucléaire — De l'énergie à revendre

Chapitre 26. Les bases de la relativité	445
1. Des paradoxes qui donnent le tournis	445
2. Levée du paradoxe : la relativité du temps et de l'espace	450
3. Le mur de la lumière	457
4. L'énergie de masse : $E = mc^2$	460

Chapitre 27. Le magnétisme et la gravitation : des forces inutiles	463
1. Le magnétisme, fils caché de l'électrostatique	463
2. La gravitation n'est pas une force	470
Chapitre 28. La physique nucléaire : nouvelles forces et nouvelles particules	481
1. L'interaction forte, une glu pour le noyau	481
2. L'interaction faible, un transformateur de particules	487
3. Des désintégrations quantiques spontanées : la radioactivité	490
4. La fission et la fusion nucléaire	496
5. Une cinquième interaction fondamentale : le champ de Higgs	502
Épilogue. L'Univers tient-il sur un timbre-poste ?	509
Une équation, un Univers	509
Les trois piliers de l'Univers	511
Physique et métaphysique	513
Quelques conseils de lecture	519
Index	521

AVANT-PROPOS

Comment lire ce livre ?

Ce livre se fixe un double objectif :

- présenter l'ensemble des lois fondamentales de la Nature, c'est-à-dire celles qui permettent d'expliquer toutes les relations de cause à effet dans l'Univers, sans pour autant recourir à l'outil mathématique ;
- utiliser ces lois pour comprendre la plupart des phénomènes du quotidien.

Cela va des questions les plus ingénues (pourquoi fait-il plus froid en altitude ?) aux interrogations les plus complexes (comment le Soleil fait-il pour nous éclairer et nous réchauffer ?) et englobe la compréhension des phénomènes naturels (pourquoi le ciel et la mer sont-ils bleus ?) ainsi que la description des créations humaines (comment l'électricité est-elle produite et comment fait-elle marcher les transistors de nos ordinateurs ?).

En dépit de leur diversité apparente, ces manifestations sont toutes le reflet des mêmes causes fondamentales : la même loi fondamentale explique qu'on se refroidisse en altitude, que le ciel soit bleu, et que l'électricité parvienne à faire marcher nos appareils électroménagers. Quand on prend soin d'aller jusqu'aux fondements des phénomènes, la Nature semble soudain acquérir une unité presque magique.

Ce livre vous invite à redécouvrir ces liens cachés en couvrant tous les domaines de la physique : mécanique, thermodynamique, électricité et magnétisme, optique, physique quantique et relativité... Nous en viendrons à une conclusion tout à fait stupéfiante : la majorité des phénomènes qui nous entourent peuvent se résumer en une seule ligne de cause à effet qui suffit à tous les décrire ! Ce n'est pas une vaine promesse : cette équation-mère sera bel et bien écrite dans la conclusion.

Revenir systématiquement aux fondements pour expliquer les phénomènes requiert de raisonner en termes physiques. Les physiciens ont besoin des mathématiques pour démontrer leurs résultats et prévoir les chaînes de cause à effet les plus complexes, mais elles peuvent parfois voiler le sens physique qui sous-tend le raisonnement. En mettant de côté l'outil mathématique, nous vous promettons de tout vous expliquer « avec les mains ».

Nous nous contenterons de recourir aux notions mathématiques les plus élémentaires supposées acquises par le lecteur : il s'agit principalement des opérations usuelles (additions, multiplications, puissances, racines...). Nous utiliserons aussi la notion de « vecteur », mais seulement pour son rôle pédagogique dans les schémas : aucune connaissance n'est requise à ce sujet. De même, les opérateurs tels que les dérivées seront soigneusement évités.

Les raisonnements physiques peuvent être délicats par endroits et nécessiter une certaine concentration. Afin que cela ne freine pas la lecture de ce livre, nous avons reporté les justifications les plus difficiles dans des encadrés (indiqués par 

Le lecteur pourra laisser de côté ces encadrés sans perdre pour autant le fil du récit : il devra se contenter d'admettre certains résultats, mais cela ne remettra pas en cause la compréhension des chapitres suivants.

Est-il nécessaire de tout lire de A à Z ? Ce livre est structuré selon un fil logique de la première à la dernière page. Toutefois, le lecteur ayant déjà quelques notions en physique pourra se focaliser directement sur le chapitre qui l'intéresse.

Ce livre a également été conçu pour pouvoir répondre rapidement à une question que le lecteur se pose. Dans cette optique, une liste de questions a été établie, à la fin de cet ouvrage, et renvoie le lecteur vers le chapitre adéquat.

Finalement, à qui est destiné ce livre ? Il passe en revue la grande majorité des notions de physique depuis le programme de lycée (électricité, mécanique, optique) jusqu'à la troisième année de licence (physique quantique, relativité, physique nucléaire). Par ailleurs, il reprend les concepts depuis la base, et sa lecture ne nécessite pas de pré-requis particuliers.

Il s'agit donc d'un livre tout spécialement adapté à un étudiant en fin de secondaire ou en début de supérieur, désireux d'aborder les années post-bac sereinement : ce livre consolidera ses connaissances de lycée et sera bonne une introduction – sans oripeaux mathématiques – aux cours du supérieur.

En présentant les concepts d'un point de vue souvent original, ce livre propose une approche pédagogique qui pourra intéresser les professeurs en sciences physiques ou les étudiants préparant l'agrégation de physique.

Enfin et surtout, ce livre est destiné à tous les curieux désireux de comprendre plus en profondeur son environnement naturel et technologique.

Note sur la troisième édition : Cette nouvelle édition intègre les dernières découvertes en physique. Elle propose un passage approfondi sur la physique des lasers pour mieux comprendre les enjeux des travaux du Français Gérard Mourou, prix Nobel de physique 2018. La partie dédiée aux ondes gravitationnelles a également été modifiée pour tenir compte de leur détection en septembre 2015.

PROLOGUE

UNE INTRODUCTION À LA PHYSIQUE

1. À QUELLE ESPÈCE LE PHYSICIEN APPARTIENT-IL ?

Qu'est-ce que la physique ?

Le but de la physique est, ni plus ni moins, de déterminer les lois fondamentales qui régissent l'Univers et son évolution : connaissance du passé, compréhension du présent, prévision de l'avenir. Au-delà de la découverte des mécanismes en jeu dans la Nature, c'est elle qui a permis la ruée technologique qui se poursuit encore de nos jours : voitures et avions, télévisions et réfrigérateurs, ordinateurs et chaînes hi-fi, machines industrielles les plus diverses confectionnant nos vêtements, les parpaings de nos maisons...

C'est encore la physique qui nous permet de répondre aux questions les plus ingénues : qu'est-ce que la matière, qu'est-ce que la lumière ? Pourquoi ne pouvons-nous pas passer à travers les murs, à l'instar de la lumière mais contrairement au son ? Pourquoi notre environnement est-il coloré, pourquoi le ciel est bleu ? Pourquoi la Terre est ronde et pourquoi tourne-t-elle ? Qu'y a-t-il derrière le mot « magnétisme », qu'est-ce que l'électricité, qu'est-ce que la foudre ?

La force de la physique, son côté absolument magique, c'est que toutes – absolument toutes ! – ces questions trouvent leur réponse en une phrase. De même, toutes les technologies recensées plus haut sont issues de cette phrase. Cette phrase, la voici :

« De l'échelle des atomes à celle des galaxies, il existe dans l'Univers deux forces fondamentales, celle gravitationnelle et celle électromagnétique. »

On comprend pourquoi l'unification de ces deux forces est l'enjeu majeur des physiciens-chercheurs de ce ^{xxi}e siècle : quelle élégance que de tout ramener à une seule Force qui piloterait tout l'Univers !

En fait, l'existence de ces deux forces, qu'on ne peut que constater, est la base de ce qu'on appelle la « physique classique ». Mais nous avons un peu triché en énonçant la phrase censée contenir tout l'Univers : en disant « de l'échelle des atomes à celle des galaxies », nous semblons sous-entendre que cela reste vrai à toutes les échelles. Ce n'est pas le cas !

Si l'on observe l'intérieur d'un atome, on voit en effet apparaître deux nouvelles forces, l'interaction faible et l'interaction forte. À cette échelle émerge une toute nouvelle physique, dont les propriétés paraissent radicalement différentes de celles de la physique classique : il s'agit de la « physique quantique ». Les lois à cette échelle deviennent un savant jeu de probabilités, où les questions « où ? » et « quand ? » elles-mêmes perdent leur sens.

Cela signifie-t-il qu'il faille composer avec deux jeux de lois bien distinctes, celles classiques et celles quantiques ? Non, car la physique quantique *englobe* la physique classique, qui n'en est qu'un cas particulier. Par exemple, fidèle aux lois quantiques, notre corps lui-même n'a pas de limite spatiale nette. Mais cette périphérie floue s'étend sur des distances très inférieures à celles observables au microscope...

C'est la raison pour laquelle il est inutile de recourir à un marteau-pilon (la physique quantique) pour écraser une mouche (comprendre l'Univers à notre échelle). C'est aussi pourquoi toutes les questions que nous nous sommes posées au début de cette section trouvent leur réponse dans la physique classique.

Bien sûr, dans ce livre, nous nous ferons un plaisir de parler aussi des lois quantiques, car elles permettent de répondre à quelques questions supplémentaires qui sont de première importance : pourquoi ne brillons-nous pas dans le noir, contrairement à la flamme d'une bougie ? D'où vient l'énergie du Soleil ? Qu'est-ce que la radioactivité ?...

Par ailleurs, ces lois décrivent un monde étrange et passionnant – le nôtre, qui plus est !

Penser comme un physicien

Penser comme un physicien, c'est adopter une démarche scientifique, à savoir : observer, modéliser, expérimenter.

Observer

À la différence des maths, le but de la physique est de comprendre la réalité des choses, pas d'élaborer des édifices abstraits. Tout commence donc par une observation rigoureuse des phénomènes autour de nous.



LES MATHÉMATIQUES SONT-ELLES UNE SCIENCE ?

Les mathématiques constituent un ensemble d'outils développables à l'infini, qui forment en soi un édifice cohérent, à la logique inattaquable. Pourtant, cela reste une discipline abstraite, par essence découplée du monde réel. Pas d'observation des phénomènes, pas d'expérimentation : les maths prises isolément sont donc sans lien avec la « démarche scientifique » que nous avons mise en avant.

En revanche, il s'agit d'une « boîte à outils » extrêmement précieuse pour les sciences, et notamment pour la physique : c'est en cela qu'il s'agit d'une discipline scientifique.

Modéliser

Tisser des liens entre des phénomènes *a priori* différents, pour obtenir une théorie unifiée et synthétique, voilà l'étape centrale en physique !

Par exemple, constater que le mouvement de la Lune dans le ciel et la chute d'une pomme sont la manifestation d'une même loi, cela n'avait rien d'évident de prime abord... Mais l'établissement de ce lien a ouvert tout un champ de prédictions, qui permet aujourd'hui d'envoyer des sondes jusqu'à Mars et bien au-delà...

C'est aussi à cette étape que les physiciens ont souvent besoin d'un outil ô combien précieux : les maths... Dans ce livre, nous préférons expliquer les choses en évitant l'outil mathématique. Nous verrons que bien des conclusions intéressantes peuvent être établies sans lui !



LE RASOIR D'OCCAM

Parfois, deux théories peuvent rester longtemps en concurrence sans qu'on puisse en rejeter une de façon tranchée. C'est notamment le cas lorsqu'on ne peut pas réaliser un nombre suffisant d'expériences.

L'Histoire des sciences semble indiquer que c'est toujours la théorie utilisant le moins d'hypothèses qui s'avère juste, dans le sens où elle seule reste en accord avec toutes les expériences ultérieures : c'est la règle du « rasoir d'Occam », du nom du philosophe Guillaume d'Occam qui l'a mise en avant au ^{xiv}^e siècle. En d'autres termes, la théorie la plus simple, la plus « élégante », est la bonne...

L'exemple le plus célèbre est la rivalité qui opposa au ^{xvi}^e siècle la vision traditionnelle mettant la Terre au centre de l'Univers à celle de Copernic la faisant tourner autour du Soleil. Les mesures augmentant peu à peu en précision, il fallait sans cesse réadapter la théorie traditionnelle en ajoutant de nouveaux cercles artificiels à la voûte céleste (les épicycles). Copernic, lui, par sa simple hypothèse (« la Terre tourne autour du Soleil »), expliquait toutes les nouvelles mesures avec une précision diabolique. L'ancien modèle finit par voler en éclats, puisqu'il était incapable de prédire les nouvelles observations, et il fait rire aujourd'hui tant il paraît artificiellement complexe.

Pourtant, peut-être l'Histoire se répète-elle en ce début de ^{xxi}^e siècle : car le modèle standard, qui décrit les particules élémentaires et leurs interactions, a dû intégrer de nombreuses particules « sorties du chapeau » pour rester en accord avec les nouvelles expériences. Aussi certains s'attendent-ils à voir un jour ou l'autre le modèle standard découpé en lamelles par le rasoir d'Occam...

Notons toutefois que, contrairement à l'époque de Copernic, il n'existe aucun modèle rival à ce jour : pour l'instant, le modèle standard est donc le meilleur.

Expérimenter

La physique ne doit surtout pas s'enfermer dans certains écueils. Ainsi, parfois, une dizaine de théories radicalement différentes s'évertuent à rendre compte d'une observation donnée. Laquelle est la bonne ? Pour le savoir, il faut mener des expériences qui mettent à l'épreuve les prédictions de ces différentes théories. Cette « épreuve du feu » est l'angoisse des physiciens-chercheurs : des années de dur labeur peuvent ainsi s'achever par un tampon définitif « non conforme à la réalité, donc faux », qui relègue la théorie aux oubliettes... Et la tentation peut être grande alors de renier les faits qui s'accumulent.

Si suffisamment d'expériences ont pu être conduites, il ne doit normalement rester qu'une théorie, LA théorie. Les grands débats d'aujourd'hui concernent ainsi les domaines difficilement accessibles par l'expérience : l'infiniment grand (astrophysique et cosmologie), et l'infiniment petit (physique des particules).

Les limites de la physique

Jusqu'où la physique peut-elle aller dans la description du Monde ? En fait, ses lois fondamentales doivent permettre d'expliquer la totalité des phénomènes du monde objectif. Mais en pratique, on ne parle plus de « physique » lorsque les systèmes étudiés deviennent très complexes et le lien avec les lois fondamentales de l'Univers beaucoup plus ténu.

Or l'un des systèmes les plus complexes qui soient est sans doute le corps humain, et plus généralement le monde du Vivant. Là commence le domaine de la biologie : du fait de la complexité des processus en jeu, on est obligé de se contenter de constatations empiriques très éloignées des lois fondamentales de la Nature.

Par exemple, qu'est-ce qui fait que tel gène, constitué de tels atomes, donne les cheveux châtons ? On l'ignore, et la physique doit rendre les armes ; même si, au bout du compte, il est probable que seules les deux forces fondamentales mentionnées en début de chapitre entrent en jeu...

À la limite entre la physique et la biologie, se trouve la chimie : en fait, le Vivant n'est autre qu'une chimie particulièrement complexe. La chimie fait, elle aussi, intervenir des lois largement empiriques : elle dispose d'ouvrages énormes débitant des tables remplies de valeurs purement expérimentales...

La chimie étudie des processus à l'échelle microscopique : aussi, de plus en plus, la physique quantique tente d'entrer dans les détails pour comprendre et prédire les réactions observées. La chimie est d'ailleurs affichée comme partie intégrante des « sciences physiques », aux côtés bien sûr de la physique.

Revenons à la biologie : plus complexe encore que tout le reste, sont les processus à l'œuvre dans le cerveau, dont l'étude en est encore à ses balbutiements. Notamment, comment se passe la transition entre l'objectif et le subjectif, c'est-à-dire entre le corps et la Conscience ? Sommes-nous entièrement pilotés par les lois de la physique ? Ces questions,

passionnantes mais pour l'heure insolubles, ouvrent la voie vers toutes les autres disciplines : elles sont à la base des « lois » à l'œuvre dans ce qu'on appelle les « sciences sociales ».

L'étude du fonctionnement du cerveau et le lien avec la Conscience semblent totalement en dehors du sujet de ce livre ; pourtant il n'est pas exclu que la physique puisse un jour lui fournir des éléments de réponse, comme elle l'a fait dans le passé pour beaucoup d'anciennes interrogations philosophiques. C'est pourquoi une ouverture à la fin de l'ouvrage est consacrée à ce passionnant domaine d'avenir...

2. UN PEU D'HISTOIRE DES SCIENCES

L'héritage des Grecs

La démarche scientifique n'est pas innée : les premières civilisations du Monde, en Égypte et en Mésopotamie, ne la connaissaient pas, malgré leur savoir. Les Hommes se contentaient alors d'observer la Nature, et d'utiliser directement le résultat de ces observations. Par exemple, les Égyptiens constataient les crues annuelles fertilisantes du Nil, mais ne cherchaient pas à en comprendre les origines, en dehors de l'influence divine.

Ce sont les Grecs, dès le VII^e siècle avant J.-C., qui associent les premiers un sens aigu de l'observation avec un désir de comprendre et de théoriser. Le grand atout d'une théorie bien bâtie est d'ouvrir de nouveaux champs d'application, sans lien apparent avec l'observation initiale. Ainsi, en « inventant » la démarche scientifique, les Grecs posent les bases d'une discipline qui décuple les capacités d'innovation : la physique. L'Europe saura en tirer bénéfice à la Renaissance...

En fait, les Grecs sont surtout connus comme mathématiciens (Thalès, Pythagore, Euclide), ou comme philosophes (Socrate, Platon, Aristote), plutôt que physiciens. Mais à cette époque, tous les grands penseurs étaient un peu des trois.

Ainsi, au III^e siècle avant J.-C., Ératosthène savait non seulement que la Terre était ronde, mais il en avait mesuré la circonférence (40 000 km) avec une grande précision, par une méthode rudimentaire mais très pertinente. S'il avait pris au sérieux les écrits d'Ératosthène, Christophe Colomb ne se serait sans doute pas lancé à la conquête de l'Inde par la Route de l'Ouest, 1 700 ans plus tard, lui qui croyait la Terre beaucoup plus petite... Sans parler de certains penseurs du Moyen Âge qui jugeaient la Terre plate...

L'érudit grec le plus célèbre en tant que physicien reste toutefois Archimède (III^e siècle av. J.-C.), surtout connu pour avoir déterminé avec justesse la réaction d'un fluide sur un corps immergé.

Après cette période faste, les Romains récupèrent ces connaissances, mais ne montrent pas les mêmes capacités scientifiques. Ensuite, pendant que l'Europe sombre dans son Moyen Âge, ce sont les Arabes qui prennent le relais, mais là encore sans innovation majeure dans le domaine de la physique. Pendant ce temps, les Chinois utilisent déjà la boussole et la

poudre à canon, mais ne cherchent pas à en comprendre le principe de fonctionnement : comme les Égyptiens et les Sumériens avant eux, ce sont surtout des observateurs, pas des théoriciens. Les Européens plus tard sauront récupérer leurs découvertes en leur trouvant des applications bien plus pratiques...



LES GRECS, PHYSICIENS DE GÉNIE ?

Grands adeptes de raisonnements mathématiques et philosophiques élaborés, les Grecs ont parfois délaissé l'expérience pour valider leurs théories...

Ainsi, dès 500 avant J.-C., Pythagore considérait que la Terre devait être ronde ; mais il basait cette théorie sur la sacro-sainte perfection du cercle, et non sur la moindre observation (grec jusqu'à la moelle est le nombre π , indéboulonnable rapport du périmètre d'un cercle sur son diamètre...). Ce n'est que plus tard que les observations confirmeront (par chance !) cette hypothèse.

Autre anecdote : Aristote au IV^e siècle avant J.-C., suite à des constatations un peu rapides, croyait qu'un homme placé dans un véhicule lancé à 50 km/h serait littéralement plaqué contre le dossier de son siège... Il est heureux que les voyages actuels en avion, à plus de 900 km/h, ne confirment pas cette théorie !

Si les Grecs se sont beaucoup trompés en physique, au moins avaient-ils fait les premiers pas vers une démarche très prometteuse. Et n'oublions pas qu'ils obtinrent aussi de bien beaux succès...

L'édification de la physique classique

Au XVI^e siècle, l'Europe se réveille : en chassant les Arabes d'Espagne, les Européens ont pu récupérer leurs connaissances héritées des Grecs, et l'invention de l'imprimerie a pu les diffuser auprès des savants : c'est l'époque de Nicolas Copernic.

Il faut toutefois attendre 1600 pour voir émerger une véritable démarche scientifique en Europe. Galilée est le premier vrai physicien de la Renaissance, et non des moindres : expérimentateur hors pair, il découvre de nombreux principes physiques qui seront précisés et formalisés un peu plus tard par Isaac Newton. Comprendre le mouvement des corps est alors la préoccupation première, et cela ouvre une discipline à part entière, la mécanique.

À la même époque, René Descartes s'intéresse aussi à la lumière, posant les bases de l'optique ; il considère toutefois la lumière comme des petites billes en mouvement, et se fonde donc sur des analogies avec la mécanique.

Le siècle suivant reste calme. Antoine Lavoisier rompt notamment avec l'alchimie traditionnelle, à moitié ésotérique, au profit de la chimie, vraie discipline scientifique.

La véritable révolution scientifique a lieu à la charnière du XIX^e siècle : c'est là, en l'espace d'un siècle, qu'a été comprise et formalisée presque toute la physique classique. Les découvertes accompagnent de près l'apparition de nouvelles technologies : ainsi, le développement brutal de la physique permet-il à la Révolution Industrielle de se déclencher ; les conséquences en sont omniprésentes aujourd'hui.

La machine à vapeur est inventée dès la fin du XVIII^e siècle : la discipline associée, qui fait le lien entre la mécanique et les aspects thermiques, s'appelle la thermodynamique. Elle ouvrira bien d'autres innovations dans les années à venir.

Dans le même temps, l'existence d'une force étrange, la force électromagnétique, commence à être mise en avant ; elle est l'objet de nombreuses études. Charles de Coulomb, André-Marie Ampère, Carl Friedrich Gauss et Nikola Tesla y attachent leur nom. James Clerk Maxwell parachève leur œuvre en apportant une vision synthétique et magistrale de l'électromagnétisme.

L'électricité, incontournable aujourd'hui, en est un cas particulier d'application. Autre domaine d'application d'une importance capitale : l'étude de la lumière et des autres rayonnements, comme les ondes radio ou les rayons X. Soudain, on découvre que l'information et l'énergie peuvent être transportées quasi instantanément d'un point à l'autre du globe, par des fils (électricité), ou sans (rayonnements).

À la fin du XIX^e siècle, la physique a révolutionné le monde, et est alors montée sur un piédestal...

L'irruption de la physique moderne

À l'aube du XX^e siècle, tout semble bien en place. La Nature paraît définitivement apprivoisée. Pourtant, d'une part les lois de l'électromagnétisme contiennent une contradiction en leur sein, d'autre part certaines expériences d'optique ne trouvent pas d'interprétation.

C'est là qu'intervient un jeune physicien, Albert Einstein : en acceptant l'idée que le temps ne s'écoule pas de la même manière pour tous, il met sur pied une théorie qui résout tous les problèmes : la relativité. Les écueils théoriques de la physique classique sont enfin résolus, les bouleversements du XIX^e siècle semblent achevés, la physique forme enfin un tout cohérent qui se résume à l'expression de deux forces fondamentales : la gravitation et l'électromagnétisme.



EINSTEIN, GÉNIE SOLITAIRE ?

Albert Einstein est parfois vu comme un esprit isolé tant il était génial. En fait, sa relativité restreinte (contenant sa célèbre formule $E = mc^2$), établie en 1905, s'inscrivait très logiquement dans l'ère du temps. Henri Poincaré puis Hendrik A. Lorentz avaient déjà posé les bases de la nouvelle théorie, et Einstein s'est contenté d'en faire un tout cohérent. Il eut surtout le mérite d'accepter ce que tout le monde refusait d'admettre : le temps et les distances sont des notions relatives.

Avec la relativité générale qui suivit, il a confirmé son génie en s'attaquant à la vision traditionnelle de la gravitation. Mais Einstein n'en reste pas moins un physicien résolument classique de la tête aux pieds : en fait, c'est lui qui boucle en apothéose la physique classique inaugurée par Galilée.

Quant à la physique quantique, Einstein en fut le principal initiateur, là encore en 1905 (année faste de la physique s'il en est !). Mais par la suite, elle lui apparaîtra toujours comme un animal bizarre et bancal...

Mais la Nature est cruelle : à l'époque même où les physiciens peuvent être satisfaits de leur œuvre, elle leur tourne le dos. Dès 1900, certains constats expérimentaux soulèvent des problèmes majeurs. La lumière elle-même semble soudain avoir un comportement bizarre et paradoxal, apparaissant parfois sous forme de billes à la Descartes, parfois comme ces ondes chères à Maxwell. Plus étrange encore, la matière semble adopter le même comportement dual, parfois corpusculaire, parfois ondulatoire. Bref, c'est l'édifice dans son ensemble qui file en quenouille, tout du moins aux échelles microscopiques.

C'est Max Planck qui, sans le savoir, pose la première pierre d'une toute nouvelle physique destinée à résoudre ces paradoxes : la physique quantique. Les phénomènes microscopiques, complètement contre-intuitifs, nécessitent les apports de nombreux physiciens pour être compris et théorisés : outre Max Planck, Albert Einstein, Louis De Broglie, Niels Bohr, Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli et bien d'autres apportent chacun leur pierre à l'édifice.

Dès 1925, la physique quantique est en place. Bien qu'intuitivement bizarre et même dérangement, cette théorie vérifie tous les critères d'une bonne théorie : par un nombre limité de postulats cohérents, elle a expliqué avec une précision parfaite toutes les observations faites jusqu'à nos jours. Au passage, l'association des résultats relativistes et quantiques a permis de comprendre la radioactivité et tous les processus très violents qui se produisent à l'échelle du noyau atomique : la physique nucléaire ainsi maîtrisée a pu trouver l'occasion de s'exprimer pleinement en 1945...



PLANCK : « MA CONSTANCE N'A AUCUN AVENIR »

La physique quantique stipule qu'une particule est à plusieurs endroits à la fois, mais se recompose en un lieu donné partiellement aléatoire dès qu'on cherche à l'observer...

À leurs débuts, les fondateurs de cette théorie eux-mêmes ne croyaient pas à leur « bébé » : ainsi Max Planck avait-il l'impression de « colmater les brèches » en attendant que la réalité fût mieux comprise.

Pourtant, la constante de Planck est toujours là, et c'est l'une des constantes fondamentales les plus incontournables aux côtés de la vitesse de la lumière chère à Einstein. Aujourd'hui, la physique quantique s'est solidement enracinée dans le paysage des sciences, malgré ses bizarreries : car elle seule est compatible avec l'expérience, et le physicien ne doit jamais oublier que la Nature a toujours raison...

Ainsi la physique quantique clôt-elle un siècle et demi de découvertes intenses. Après 1925, les évolutions en physique concernent surtout la découverte de nouvelles particules, et la formalisation de deux nouvelles forces à l'échelle du noyau atomique : l'interaction forte et l'interaction faible.

La théorie chargée d'intégrer ces nouvelles découvertes pour en faire un édifice cohérent s'appelle le modèle standard. Celui-ci se contente toutefois d'appliquer les lois quantiques du début du ^{xx}e siècle aux particules découvertes plus récemment, en y intégrant les deux

nouvelles forces fondamentales. Achievé en 1973, le modèle standard n'a pas été remis en cause jusqu'à aujourd'hui.

La recherche en physique aujourd'hui

Il reste toutefois beaucoup de travail à faire sur la compréhension des processus complexes à l'œuvre dans le Monde, même à notre échelle. Prenons un exemple : le champ magnétique terrestre a beaucoup varié dans le passé, de façon très irrégulière. On comprend mal encore aujourd'hui les mécanismes à l'œuvre dans ce phénomène, et on est incapable de prédire l'évolution future du champ magnétique, ne serait-ce que pour les cent prochaines années. Or ces variations jouèrent sans doute un rôle dans l'évolution de la vie sur Terre...

Voilà un exemple de question, parmi tant d'autres, sans réponse claire encore aujourd'hui. Pourtant, il est certain que les lois fondamentales que nous connaissons suffisent pour comprendre tous ces processus, mais les phénomènes sont tellement complexes qu'il est difficile de déceler tous les mécanismes présents.

Il faut donc bien distinguer deux disciplines : la physique fondamentale, qui s'intéresse aux lois pilotant l'Univers, et dont l'édifice s'est surtout constitué à la fin du XIX^e et au début du XX^e siècle. Et la physique appliquée, qui tente de comprendre les mécanismes complexes à partir des lois à sa disposition.

Ceci explique que les innovations technologiques, elles, se poursuivent à un rythme effréné ; dans leur grande majorité, elles sont basées sur des lois physiques établies au XIX^e siècle. C'est ce qui peut donner l'illusion d'une physique en permanent renouvellement en ce moment même.

Bien sûr, rien n'exclut qu'un jour, de nouvelles expériences conduisent à la découverte de nouvelles lois, et à l'essor d'une nouvelle branche de la physique. Cela concernera certainement les échelles minuscules, ou les domaines d'énergies les plus élevées, et cela ouvrira peut-être de nouveaux domaines d'application, y compris dans la vie quotidienne.

Par ailleurs, reste à savoir pourquoi les constantes fondamentales ont telle valeur et pas telle autre, pourquoi les nouvelles particules ont telle masse et telle charge, valeurs qui nous paraissent arbitraires. Ainsi le modèle standard se base-t-il sur pas moins de vingt-neuf paramètres purement expérimentaux. Cela paraît beaucoup pour une théorie « unitaire » de la Nature, et il est très possible qu'une nouvelle théorie fondée sur un nombre plus réduit de paramètres puisse un jour émerger.

Enfin, la relativité générale et la physique quantique sont incompatibles dans les domaines (très ésotériques certes !) où des masses énormes sont regroupées sur des volumes minuscules (trous noirs, big bang...). Il existe bien des théories en cours d'édification aujourd'hui, destinées à répondre à toutes ces questions : nous citerons par exemple la théorie des cordes, pour l'instant davantage privilégiée.

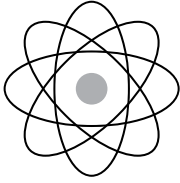
On le voit, la recherche fondamentale en physique a encore de beaux jours devant elle...

PARTIE 1

Mécanique

Forces et mouvement





LES BASES DE LA MÉCANIQUE : L'OBSESSION DU MOUVEMENT

1

Nous l'avons vu, toute la physique classique est contenue dans l'expression de deux forces, celle gravitationnelle et celle électromagnétique. Il est donc naturel de commencer par expliquer ce qu'est une force, et de déterminer ses conséquences sur le mouvement des corps. Nous suivons ainsi la démarche historique, qui a consisté à s'intéresser d'abord à la mécanique, avec Galilée, puis Newton.

1. VOYAGER TOUT EN RESTANT CHEZ SOI : LA RELATIVITÉ DU MOUVEMENT

Les référentiels

La nécessité d'une référence pour décrire un mouvement

Enfonçons des portes ouvertes en répondant à la question : qu'est-ce que le mouvement ? Nous voyons des choses qui bougent par rapport à nous (voitures, passants...), nous nous déplaçons par rapport à la route, au trottoir... « Par rapport à », voilà une locution indispensable pour décrire un mouvement.

Si nous sommes assis aux côtés d'un passager endormi dans un train, celui-ci ne bouge pas par rapport à nous ; pourtant, il bouge bien par rapport au paysage qui défile dehors. Il faut donc une référence pour préciser par rapport à quoi un objet bouge : en physique, on appelle cette référence un référentiel, notion capitale s'il en est.

Dans l'exemple précédent, le passager endormi bouge dans le référentiel du pré qui se trouve à l'extérieur (« il bouge par rapport au pré »), mais il est immobile dans le référentiel du train (« le passager est immobile par rapport au train »). Si le but est d'étudier le mouvement d'une personne dans le train, cela veut dire que nous nous plaçons dans le référentiel du train. Si le but est de savoir dans combien de temps nous arriverons à destination, il faut que nous étudions notre vitesse dans le référentiel extérieur, celui du « pré », c'est-à-dire celui de la surface terrestre.

On retiendra : « dans le référentiel de » est synonyme de « par rapport à ». Par définition, un objet est toujours immobile dans son propre référentiel : le train ne bouge pas par rapport au train...

Référentiel terrestre et référentiel géocentrique

En général, dans la vie quotidienne, nous nous intéressons aux mouvements par rapport au sol. Par « sol », on entend ici la « surface terrestre ». Ce référentiel du sol, qui nous paraît tellement fixe, est appelé simplement « référentiel terrestre », et c'est sans doute le plus important de tous.

Ce référentiel n'a pourtant rien d'absolu : en effet, la Terre tourne sur elle-même, et sa surface avec... Ainsi, même s'il est immobile par rapport au sol, un individu à l'équateur ne parcourt pas moins de 40 000 km (la circonférence de la Terre) en l'espace d'une seule journée !

Le référentiel dans lequel nous possédons cette vitesse prodigieuse s'appelle le « référentiel géocentrique » (= « centré sur la Terre »). Ainsi, par définition, une maison est immobile dans le référentiel terrestre, mais elle tourne avec la Terre dans le référentiel géocentrique.

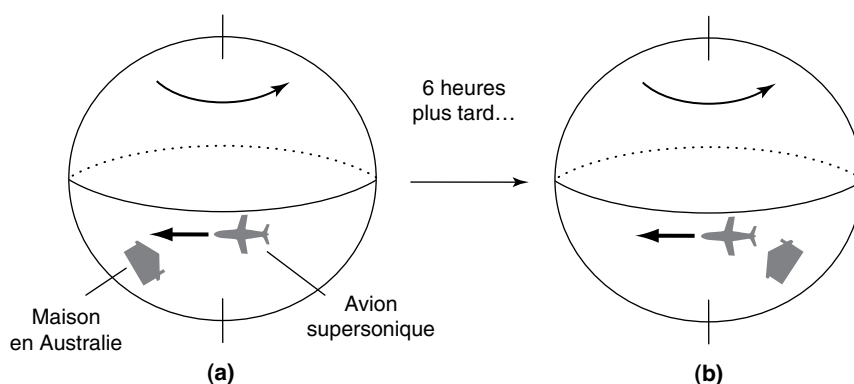


Figure 1.1 – Mouvements d'une maison et d'un avion supersonique

Nous avons représenté sur la Terre la position d'une maison en Australie, et d'un avion supersonique se dirigeant vers l'ouest. Au bout de 6 heures, l'avion qui était à l'est de l'Australie se retrouve à l'ouest de l'Australie.

La vue serait celle d'un astronaute regardant la Terre tourner depuis l'espace : dans ce référentiel géocentrique, la maison s'est déplacée au bout de 6 heures, alors que l'avion est resté immobile. Bien sûr, par rapport à la surface terrestre (référentiel terrestre), c'est l'avion qui s'est déplacé vers l'ouest et la maison qui est restée sur place.

Levons maintenant les yeux vers le ciel nocturne : les étoiles bougent dans le ciel à mesure que la nuit s'écoule. Elles bougent par rapport à nous, c'est-à-dire dans le référentiel terrestre. Mais chacun sait que leur mouvement est en fait dû à la rotation de la Terre : dans le référentiel géocentrique, les étoiles sont fixes, et c'est nous qui tournons dessous.

Les deux points de vue sont absolument équivalents : dans la vie de tous les jours, nous préférons sans doute considérer que les étoiles tournent dans le ciel, parce que c'est le mouvement qu'elles semblent avoir de notre point de vue (i. e. celui du référentiel