

SPOT
SCIENCES

José-Philippe Pérez

La pensée en physique

Diversité et unité



edp sciences

La pensée en physique

Diversité et unité

SPOT
SCIENCES
ÉPISTÉMÊ

José-Philippe Pérez

En physique, la pensée semble souvent moins présente que la technique mathématique ou la technique expérimentale. Pourtant, ni les formules, ni les expériences ne peuvent suffire à la compréhension complète d'un phénomène ; le contexte historique, épistémologique, voire artistique, est, lui aussi, riche d'enseignement.

Dans ce livre, l'auteur tente de rapprocher à la fois discours, formules et expériences ; pour cela, il propose au lecteur de parcourir quatre siècles d'humanité scientifique, depuis Galilée avec sa relativité, jusqu'à Fert avec la spintronique. Il n'oublie pas la thermodynamique de Boltzmann, l'optique de Fresnel, l'électromagnétisme de Maxwell, la relativité d'Einstein et la quantique de Schrödinger. Ce long parcours lui permet de souligner, au-delà du relativisme, l'universalité, et, au-delà de la diversité, l'unité de la pensée en physique.

José-Philippe Pérez est professeur émérite à l'Université Paul Sabatier de Toulouse, précisément à l'IRAP-CNRS (Institut de Recherche en Astrophysique et en Planétologie).

ISBN :

978-2-7598-2481-6



À Anne-Marie, mon épouse

À Sidonie et Joseph, nos deux petits-enfants

La pensée en physique

La pensée en physique

Diversité et unité

JOSÉ-PHILIPPE PÉREZ

edp sciences

SPOT Sciences

Collection destinée à un large public qui invite le lecteur à découvrir à travers des essais toute une palette des sciences : histoire, origines, découvertes, théories, jeux...

Dans la collection

« L'histoire du cerveau », Voyage à travers le temps et les espèces,
Y. GAHÉRY, ISBN : 978-2-7598-2479-3 (2021)

« Les clés secrètes de l'Univers », Émergence de l'Univers, de la vie et de l'Homme, M. GALIANA-MINGOT, ISBN : 978-2-7598-2534-9 (2021)

Imprimé en France

ISBN (papier) : 978-2-7598-2481-6

ISBN (ebook) : 978-2-7598-2551-6

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, 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 intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences, 2021

SOMMAIRE

<i>Avant-propos</i>	9
1. Introduction	13
Description de l'ouvrage	15
Nécessité d'une description quantitative	16
Multiples et sous-multiples	20
Alphabet grec	20
2. Galilée contre Aristote : chute libre et relativité galiléenne	21
Mouvement.....	22
Relativité galiléenne.....	29
3. Descartes et Newton : les lois du mouvement	35
Le football	37
Chute libre dans la machine d'Atwood.....	47
Lois de Newton et relativité galiléenne.....	48
4. Coriolis et Foucault : forces d'inertie et forces de marées	51
Forces d'inertie	52
Forces d'inertie terrestres.....	54
Poids d'un corps	56
Pendule de Foucault.....	60
Marées	65
5. Young et Mayer : le concept d'énergie	71
Énergie mécanique.....	73
Le premier principe de la thermodynamique.....	78
Transformations énergétiques	81
Énergie des systèmes vivants.....	83
6. Kepler et Newton : planètes et satellites	91
Lois historiques de Kepler.....	92
Problème de Kepler.....	94
Satellites de la Terre	101
Points de Lagrange	106
7. Kelvin et Onnes : température très basses températures	109
Température.....	110
Diffusion de la température	113
Basses et très basses températures	115

8. Clausius et Boltzmann: le concept d'entropie	123
Deuxième principe et entropie.....	124
Énoncés historiques du deuxième principe.....	128
Machines dithermes	130
Interprétation statistique de l'entropie.....	135
9. Euler et Zeuner : systèmes ouverts en mécanique et en thermodynamique	143
Mécanique des systèmes ouverts.....	145
Thermodynamique des systèmes ouverts.....	151
10. Huygens et Fermat : rayons lumineux et mirages	157
Principe de Huygens et Fresnel.....	159
Diffraction.....	164
Réfraction de la lumière	167
Formulation newtonienne des lois de l'optique.....	170
Principe historique de Fermat.....	173
11. Rayleigh et Fourier : images et filtrage spatial	177
Sténopé.....	178
Image dans l'approximation des rayons lumineux	179
Optique de Fourier. Filtrage spatial.....	189
12. Young et Gabor : interférence et holographie	199
Interférence de deux ondes monochromatiques.....	200
Holographie.....	212
13. Poincaré et Einstein : extension de la relativité galiléenne	217
Équations de Maxwell.....	218
Principe de relativité de Poincaré-Einstein	224
Dilatation des durées	228
Contraction des longueurs.....	233
Dynamique et énergétique einsteiniennes	235
Système de particules	240
Collisions de particules rapides.....	242
14. Einstein et Hubble : la relativité générale	247
Singularité de la force de gravitation	247
Principe de relativité générale.....	251
Problème de Kepler en relativité générale	254
Décalage spectral d'origine gravitationnelle.....	256
Déviation de la lumière par une masse.....	260
Astres obscurs et trous noirs.....	261
Cosmologie.....	263
15. Planck et Einstein : la quantification de l'énergie	271
Rayonnement du corps noir.....	273
Effet photoélectrique	277
Effet Compton.....	284
Rayonnement d'un trou noir.....	287

16. Rutherford et Bohr : le modèle atomique	289
Diffusion de Rutherford	290
Quantification de l'énergie des atomes.....	293
Atomes hydrogénoïdes.....	298
Excitation des atomes	301
Limites du modèle de Bohr	303
17. De Broglie et Ruska : le comportement ondulatoire des objets	305
Hypothèse fondamentale de de Broglie	306
Confirmations expérimentales	309
Microscope électronique	311
Interprétation probabiliste.....	316
Microscope à effet tunnel.....	319
18. Heisenberg et Schrödinger : inégalités, superposition, intrication	321
Contribution d'Heisenberg.....	322
Contribution de Schrödinger.....	329
Bases épistémologiques de la physique quantique	342
Théorie alternative de de Broglie-Bohm	344
19. Einstein et Townes : émission stimulée, lasers	345
Émission de lumière par les atomes.....	346
Réalisation d'une émission stimulée	348
Différents types de lasers	352
Propriétés des faisceaux lasers	355
Speckle.....	356
Lasers de grande puissance.....	357
20. Dirac et Purcell : spin, RMN et spintronique	359
Précession	360
Spin	367
Résonance magnétique nucléaire.....	370
Spintronique.....	374
Annexe 1 : Quelques résultats mathématiques utiles	377
Les nombres	378
Les vecteurs	379
Les fonctions sinusoïdales.....	381
Annexe 2 : Itinéraire	385

AVANT-PROPOS

Aucun homme ne pense jamais que sur les pensées d'un autre.
Alain, *Propos de littérature*, 46, Gonthier 1964.

Un ami philosophe, conscient de sa faible culture scientifique et désireux de combler cette lacune, me confia que, selon lui, pour être plus persuasifs, les professeurs de physique devraient commencer leurs leçons par « Il était une fois ». Cette réflexion saugrenue, qui m'a fait penser d'abord au western-opéra de Sergio Leone, m'a probablement influencé. On doit pouvoir le constater dans les éditions successives de la collection de physique « Fondements et applications », écrite pour accompagner mon enseignement, entre la première année universitaire et l'agrégation. Au début, je devais surtout insister sur la technique et l'efficacité pédagogiques, sans aucune préoccupation narrative. Ensuite, progressivement, je trouvais de plus en plus utile d'insister sur les aspects historiques, et sur ceux en rapport avec la philosophie des sciences, précisément l'épistémologie, c'est-à-dire le discours sur *l'épistémè* ou connaissance vraie. Je notais, en outre, que ces digressions présentaient un double avantage : d'abord, elles intéressaient une grande partie de l'auditoire, notamment ceux qui

cherchaient à se cultiver, en dehors de la préparation austère aux examens et concours ; ensuite, elles permettaient aux étudiants de se reposer de la logique calculatoire, souvent fastidieuse.

Ce livre tente de suivre le conseil de cet ami, en reprenant le même discours scientifique universitaire, mais sans l'insistance calculatoire et les exemples sans intérêt. J'aurais voulu aller encore plus loin en évitant toute formulation mathématique, mais c'était au-dessus de mes capacités pédagogiques. Pour être suffisamment convaincant, tout en évitant de longues et laborieuses périphrases, j'ai dû compléter l'énoncé verbal des lois de la science par quelques prolongements plus techniques, justifiant l'ajout d'une annexe mathématique. Un conseil au lecteur réfractaire à toute écriture symbolique : lire le texte en ignorant d'abord les formules, la musique qui accompagne la simple lecture de ces formules pouvant suffire dans une première approche, en attendant une révélation ultérieure.

En ces temps troublés de coronavirus, il n'est probablement pas inutile de rappeler que la science se distingue de la croyance, essentiellement par la méthode qui la distingue et la fonde : une intuition d'abord, une proposition ensuite, avec ses conséquences logiques, enfin une expérimentation soignée, dans laquelle on s'astreint à maîtriser le paramètre testé. Contrairement à la croyance qui fournit une affirmation, déclarée vérité parfaite et définitive, la science se construit progressivement en se rapprochant asymptotiquement « de ce qui est¹ ». Le bien reste une autre affaire, évidemment encore plus importante. Contrairement à la croyance, souvent recherchée car apaisante et réconfortante, la science est surtout exigeante. Dans ce domaine, on songe à la question que posa Napoléon au grand scientifique Laplace en commentant l'œuvre à son auteur : « Et Dieu dans tout cela, Monsieur de Laplace ? ». La réponse du physicien, sobre et magistrale, laissa l'Empereur sans voix : « Je n'ai pas eu besoin de cette hypothèse, Sire ». On sait peut-être moins que Laplace eut à préciser son point de vue, en apprenant par Napoléon lui-même

1. *Raison et Plaisir*, Jean-Pierre Changeux, Odile Jacob, 1994, p. 146.

l'avis du grand mathématicien Lagrange, très pieux, qui trouvait merveilleuse l'idée de Dieu, grâce à sa grande capacité explicative. Ici aussi, la réponse de Laplace fut à la hauteur de sa réputation : « Merveilleuse idée que celle de Dieu, en effet, qui explique tout, cependant sans jamais rien prévoir ». Précisons, dans ce contexte, que l'explication scientifique consiste essentiellement à relier le phénomène observé aux lois générales déjà établies, et de multiples fois vérifiées expérimentalement.

Certes, les résultats de la science ne sont ni complets ni définitifs, mais ils sont sûrs, précisément en raison de la méthode scientifique. Ainsi, Newton énonce, vers la fin du xvii^e siècle, une loi reliant le mouvement d'un corps à ses causes, loi qui lui a permis de prévoir ce mouvement avec une bonne précision, cela durant plus de trois siècles ; il montre, en outre, dans une synthèse magistrale, que la chute des corps dans le voisinage terrestre est de même nature que celle de la Lune sur la Terre, dans son mouvement orbital quasi circulaire. Ce n'est qu'au début du xx^e siècle qu'Einstein trouve, avec la théorie de la relativité, une explication aux écarts qui subsistent et que la théorie de Newton n'explique pas. Einstein ne corrige pas une erreur de Newton, il enrichit l'analyse de son prédécesseur, en proposant une nouvelle théorie qui englobe celle de son illustre devancier. Il apparaît alors nécessaire de distinguer la science de la recherche scientifique, en bref ce qui est connu de ce qui ne l'est pas, car encore en construction. Dans les écoles même prestigieuses, on n'enseigne que ce qui est connu.

Ajoutons que les concepts introduits par la science, afin de prédire et d'expliquer le comportement des corps, sont le plus souvent distincts des intuitions populaires. Ainsi, ce n'est pas la vitesse d'un corps qui révèle l'influence de son environnement, comme le croyait à tort Aristote, mais la variation de sa quantité de mouvement. De même, le sens commun conduit à la confusion entre le concept de température, qui participe à la caractérisation de l'état d'un corps, et celui de chaleur, qui traduit, lui, un type particulier d'échange d'énergie de ce corps avec son environnement. Quant au concept d'entropie, pourtant décisif dans la compréhension de l'orientation du temps, du passé vers

le futur, il nécessite une construction intellectuelle, difficilement accessible sans la science. En bref, dans la recherche de « ce qui est », les concepts introduits en science sont généralement élaborés, conformément au constat de Gaston Bachelard², au point d'être souvent éloignés du sens commun, contrairement à la conviction d'Isabelle Stengers³.

Le débat sur l'usage thérapeutique de l'hydroxychloroquine pour vaincre la pandémie actuelle, pourtant soulevé par un chercheur de la sphère médicale, illustre bien le fait que recherche scientifique et croyance diffèrent fondamentalement par la méthode. Lorsqu'on cherche à appréhender un phénomène inconnu, comme en cette période, cet oubli peut devenir dramatique⁴.

José-Philippe Pérez, janvier 2021

Remerciements

Je remercie les collègues et amis de l'Observatoire Midi-Pyrénées, de l'Université Paul Sabatier ou d'ailleurs, qui ont bien voulu relire, chacun, un chapitre de ce livre, en relation avec leur spécialité ou leur centre d'intérêt :

Ibrahim Ardi, Philippe Arguel, Rémi Battesti, Aziz Bouchène, Jean Cousteix, Arnaud Dupays, Thierry Fayard, David Guéry-Odelin, Laurent Koechlin, Brahim Lamine, André Lannes, Frédéric Marchal, Renaud Mathevet, Adnen Mlayah, Abdelkader Mojtabi, Marie-catherine Mojtabi, Antoine Monmayrant, Arnaud Le Padellec, Ghislaine Pérez, Olivier Pujol, Michel Rieutord, Joseph Tapia, Dominique Toubanc, Mokhtar Zagzoule.

Je remercie aussi EDP Sciences, notamment Madame France Citrini, pour sa confiance dans ce projet de livre, et Madame Sophie Hosotte pour son efficacité dans la réalisation de l'ouvrage et de sa couverture.

2. *La formation de l'esprit scientifique*, 1938.

3. *Réactiver le sens commun*, 2020.

4. Jean-Paul Krivine, *Science et pseudo-sciences*, juillet 2020.

1

Introduction

À propos de la science et donc de la physique, Valéry affirmait : « Si la science s'achève et doit s'achever en formules d'actes, la création de la science est œuvre d'art¹ ».

Une définition explicite de la physique pourrait être la suivante : la physique est le mode de pensée qui permet de comprendre rationnellement le comportement de la nature, à partir d'un petit nombre de lois réfutables par les faits. Raison et réfutabilité, par le moindre fait, distinguent l'activité du physicien des autres activités humaines (artistiques, religieuses) dans lesquelles interviennent principalement l'émotion et la conviction intime. Cependant, la création et la transmission de la physique n'excluent pas, elles, l'émotion et la conviction intime. Ainsi, Pierre-Louis Moreau de Maupertuis, un contemporain de Voltaire, énonce le principe de moindre action en mécanique, à partir d'une conviction religieuse « Dieu préconise l'économie », ce

1. Valéry, *Vues*, La Table Ronde, p. 56.

qui renvoie une nouvelle fois à Valéry lorsqu'il s'interroge : « Que serions-nous donc sans le secours de ce qui n'existe pas?² ».

Au-delà de son développement technique, la préoccupation du physicien consiste le plus souvent à chercher et à trouver ce qui ne change pas, derrière l'apparence du changement : ce qui n'évolue pas au cours du temps (la stationnarité), ce qui ne change pas dans l'espace (l'uniformité), ce qui ne varie pas lorsqu'on change de référence (l'invariance).

Finalement, la physique s'intéresse moins à ce qui est relatif qu'à ce qui est universel. Même Albert Einstein, avec ses théories de la relativité restreinte et de la relativité générale, est un universaliste : constatant que le temps en relativité (cf. Chapitre 13), comme l'espace en mécanique de Newton (cf. Chapitre 3), est relatif, il cherche et trouve ce qui est universel. Les lois de conservation sont précisément une manifestation de cette universalité en physique, tout comme la théorie atomique qui affirme que tous les électrons se ressemblent ou que tous les nucléons sont des combinaisons de quarks.

Il y a crise en physique lorsque l'universalité est prise en défaut. Dans ce cas, les physiciens, même les plus grands, sont alors tentés par l'exotisme. Par exemple, en 1913, le physicien danois Niels Bohr propose un modèle aporétique de l'atome d'hydrogène, où l'électron parcourt une orbite circulaire, autour du noyau, sans rayonner de l'énergie, alors qu'il est accéléré. Or la théorie électromagnétique, proposée dès 1873 par l'Écossais James Maxwell et de multiples fois confirmée expérimentalement, prévoit un tel rayonnement qui impliquerait un rapprochement inexorable de l'électron sur le noyau. Ce modèle atomique, même partiellement explicatif et prédictif, n'a aucun avenir scientifique ; il sera abandonné au profit d'une nouvelle théorie, la Quantique. Un second exemple est fourni, vers les années 1930, par la non-conservation de l'énergie dans la réaction caractéristique de la radioactivité bêta, dans laquelle un neutron donne un proton et un électron. Dans cette crise, Bohr propose alors rien de moins que

2. Valéry, *La Pléiade*, p. 966.

l'abandon du premier principe de la thermodynamique, pourtant de multiples fois confirmé ! Le Suisse Wolfgang Pauli (prononcer Paoli) dénoue le problème en inventant le neutrino, particule dont l'énergie est précisément celle qui manque pour satisfaire à la conservation de l'énergie. Le neutrino ne fut découvert que 25 ans plus tard par les physiciens américains Frederick Reines et Clyde Cowan !

DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

L'ouvrage est découpé en vingt chapitres, relativement indépendants les uns des autres, présentés, après une introduction générale, selon le développement historique de la pensée en physique. Le point de départ est la contribution majeure de Galilée en 1632, date généralement considérée comme celle de la naissance de la physique telle qu'on l'entend encore aujourd'hui. Certes, les contributions d'Épicure, entre le III^e et le II^e siècles avant notre ère, précisément *La lettre à Hérodote* et *La lettre à Pythoclès*, sont de remarquables traités visionnaires sur les phénomènes célestes et même la physique statistique, mais elles ont été oubliées voire dissimulées par les successeurs, à l'exclusion de Lucrèce qui s'en est fortement inspirées. Ce choix d'un développement historique est volontaire, car il permet, selon nous, un exposé progressif dans l'appréhension d'une pensée qui s'affine et se complexifie au cours du temps. Cependant, considérant l'urgence pour le lecteur pressé d'aborder les derniers chapitres de physique moderne (la relativité restreinte, la relativité générale, l'astrophysique et la quantique), le texte est construit de telle sorte qu'une lecture indépendante des chapitres soit possible, malgré quelques renvois.

Dans l'accès à la connaissance scientifique, trois stades sont généralement considérés. Le premier permet de répertorier les phénomènes perçus par l'observateur, ce qui exige la contribution d'au moins l'un de nos cinq sens (vue, ouïe, odorat, goût, toucher) ; le deuxième favorise une analyse approfondie, détaillée, quantitative et donc mathématique ; le troisième, enfin, fournit la vision générale

acquise une fois les étapes précédentes franchies. Très souvent, ce dernier stade de synthèse, essentiel à nos yeux, est escamoté. Dans ce livre, nous insistons surtout sur le premier et le troisième stades, en limitant l'outil mathématique à son point d'irréductibilité.

NÉCESSITÉ D'UNE DESCRIPTION QUANTITATIVE

La physique ne se réduit pas à une simple description qualitative et contemplative des phénomènes observés, car cette réduction la rendrait incapable de prévoir avec suffisamment de précision le comportement des objets étudiés. Aussi sommes-nous conduits à introduire la mesure de toute grandeur physique sur un objet, c'est-à-dire sa comparaison à une autre grandeur, nécessairement de même nature, prise comme unité. Ainsi, on mesure la longueur d'un fil tendu en la comparant à celle d'une règle graduée, ce que l'on réalise en faisant coïncider les extrémités du fil à deux des traits équidistants d'une règle graduée ; de même, on estime la masse d'un corps en la comparant à celle d'une masse marquée, par exemple à l'aide d'une balance, laquelle permet de comparer en réalité leurs poids qui sont proportionnels aux masses (cf. Chapitre 4) ; on mesure aussi la durée qui sépare deux événements, en un même lieu, en la comparant à celle d'un phénomène qui se répète de façon apparemment périodique ; un exemple simple est fourni par le nombre de périodes d'un pendule pesant, c'est-à-dire le nombre des passages successifs, dans le même sens, devant sa position d'équilibre verticale.

De tels rapports peuvent être de l'ordre de l'unité ou extrêmement grands ou au contraire très petits. Ainsi, la taille d'un être humain est environ 15 milliards de fois la distance qui sépare l'atome de carbone de l'un des deux atomes d'oxygène dans la molécule de dioxyde de carbone ; on préfère écrire 15×10^9 , le milliard étant 1 suivi de 9 zéros. On trouve un nombre encore plus grand en comparant la masse de notre étoile, le Soleil, à celle d'un litre d'eau ; on trouve 2 suivi de 30 zéros (!), soit deux mille milliards de milliards de milliards, ce

Du même auteur

J.-Ph. Pérez, *Relativité et invariance, fondements et applications*, 3^e édition, Dunod, 2016, 439 pages

J.-Ph. Pérez, *Mécanique, fondements et applications*, 7^e édition, Dunod, 2014, 801 pages

J.-Ph. Pérez, R. Carles et O. Pujol, *Quantique, fondements et applications*, de Boeck, mars 2013, 1150 pages

J.-Ph. Pérez, C. Lagoute, J.-Y. Fourniols et S. Bouhours, *Électronique, fondements et applications*, 2^e édition, Dunod, 2012, 868 pages

J.-Ph. Pérez, *Thermodynamique, fondements et applications*, 3^e édition, Dunod, 2011, 584 pages

J.-Ph. Pérez, *Optique, fondements et applications*, 7^e édition, Dunod, 2011, 698 pages

J.-Ph. Pérez, C. Lagoute, O. Pujol, E. Desmeules, *Physique en CPGE, une approche moderne*, de Boeck, 2011, 1500 pages

J.-Ph. Pérez, R. Carles, R. Fleckinger, *Électromagnétisme, fondements et applications*, 4^e édition, Dunod, 2009, 740 pages

J.-Ph. Pérez, O. Pujol, C. Lagoute, P. Puech, E. Anterrieu, *Physique, une introduction*, de Boeck, 2008, 492 pages

A. Lannes et J.-Ph. Pérez, *Optique de Fourier en microscopie électronique*, Masson, 1983, 200 pages