

LE COURS DE PHYSIQUE DE FEYNMAN

Richard Feynman | Robert Leighton | Matthew Sands

NOUVELLE ÉDITION



MÉCANIQUE 1

DUNOD

First published in the United States by Basic Books, a member of the Perseus Books Group.

L'édition originale de cet ouvrage a été publiée aux États-Unis
par Basic Books, un membre du groupe Perseus Books, sous le titre :
The Feynman Lectures on Physics

© 1963 California Institute of Technology, 2006, 2010 by Michael A. Gottlieb,
and Rudolf Pfeiffer.

Version française de Goéry Delacôte.

Coordination de M. Bloch.

Nouvelle édition révisée par Julien Leroi

Les éditions Dunod remercient Pierre-Emmanuel Leroy, professeur agrégé de
physique, et Jean-Claude Philippon, ingénieur Centrale Lille retraité,
pour leur relecture attentive de l'ouvrage.

Maquette de couverture : Raphaël Tardif

<p>Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.</p> <p>Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements</p>	<p>d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.</p> <p>Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).</p>
	

© InterEditions, Paris, 1979

© Dunod, 1999, 2014, 2018, 2020

2022 pour cette nouvelle présentation corrigée

11, rue Paul Bert, 92240 Malakoff

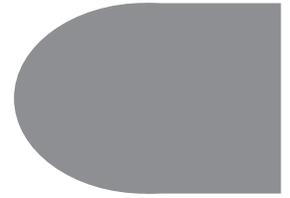
www.dunod.com

ISBN 978-2-10-084896-6

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 PROPOS DE RICHARD FEYNMAN



Né en 1918 à New York, Richard P. Feynman obtint son doctorat en 1942 à l'université de Princeton. En dépit de sa jeunesse, il joua un rôle important au sein du Projet Manhattan développé à Los Alamos pendant la Seconde Guerre mondiale. Il enseigna ensuite à Cornell et au California Institute of Technology. Il reçut le prix Nobel de Physique en 1965, aux côtés de Sin-Itiro Tomonaga et Julian Schwinger, pour ses travaux en électrodynamique quantique.

Si c'est la résolution de certains problèmes posés par la théorie de l'électrodynamique quantique qui lui valut son prix Nobel, Feynman mit également au point une théorie mathématique rendant compte du phénomène de superfluidité de l'hélium liquide. Puis, avec Murray Gell-Mann, il travailla sur les interactions faibles telles que la radioactivité bêta. Par la suite, Feynman joua un rôle crucial dans la mise au point de la théorie des quarks, en élaborant son modèle des processus de collision de protons à hautes énergies.

Outre ces réussites remarquables, Feynman fut aussi à l'origine de l'introduction de nouvelles techniques de calcul et de nouvelles notations en physique – et surtout des diagrammes de Feynman, qui sont maintenant omniprésents, et qui ont transformé la manière de concevoir et calculer certains processus physiques élémentaires.

Feynman sut faire montre d'une incroyable efficacité en tant que pédagogue. Il était particulièrement fier, parmi ses nombreux prix et distinctions, de la médaille Oersted pour l'enseignement, qu'il avait obtenue en 1972. Le *Cours de Physique de Feynman*, publié pour la première fois en 1963, fut décrit par un chroniqueur de la revue *Scientific American* comme « difficile, mais nourrissant et plein de saveur. Vingt-cinq ans après, c'est la référence pour les enseignants et les meilleurs des étudiants ». Afin d'améliorer la compréhension et la diffusion de la physique dans le grand public, Feynman publia *The Character of Physical Law et QED : The Strange Theory of Light and Matter*. Il fut également l'auteur d'articles scientifiques qui sont devenus des classiques et de manuels pour les étudiants et les chercheurs.

Richard Feynman était aussi un homme engagé, de manière constructive. Son travail pour la commission Challenger est bien connu, en particulier sa célèbre démonstration de la sensibilité des joints au froid : une expérience simple et élégante ne nécessitant rien d'autre qu'un verre d'eau glacée et une pince. Moins connus sont les efforts déployés par Feynman pour lutter contre la médiocrité des manuels scolaires, lorsqu'il siégeait à la commission des programmes de l'État de Californie durant les années 1960.

On ne peut saisir avec justesse l'essence de l'homme qu'était Feynman à travers un récital de la myriade des réussites scientifiques et pédagogiques qui furent les siennes. Comme le sait tout lecteur de ses publications, y compris les plus techniques, la person-

nalité riche et vivante de Feynman illumine tout son travail. En plus d'être physicien, il fut tour à tour réparateur de radios, spécialiste de cadenas, artiste, danseur, joueur de bongo et même déchiffreur de hiéroglyphes mayas. Toujours curieux du monde alentour, il était d'un empirisme exemplaire.

Richard Feynman disparut le 15 février 1988 à Los Angeles.

PRÉFACE À LA NOUVELLE ÉDITION AMÉRICAINNE

Près de 50 ans se sont écoulés depuis que Richard Feynman donna, à Caltech, son cours d'introduction à la physique, duquel sont nés ces volumes : *Le cours de physique de Feynman*. Au fil de ces 50 ans, notre compréhension du monde physique a considérablement changé, mais *Le cours de physique de Feynman* a tenu bon. Les cours de Feynman gardent aujourd'hui la même force qu'au jour de leur première publication, grâce aux qualités uniques qui étaient celles de Feynman, tant sur le plan de la compréhension de la physique que sur celui de la pédagogie. Des débutants aussi bien que des physiciens confirmés ont étudié ce cours ; il a été traduit au moins dans une douzaine de langues et plus d'1,5 million d'exemplaires en langue anglaise ont été vendus. Sans doute aucune autre série de livres de physique n'a laissé une empreinte aussi grande, et durable.

Cette nouvelle édition ouvre une nouvelle ère pour *Le cours de physique de Feynman* (*CPF*) : l'ère de l'édition numérique, celle du XXI^e siècle. Le *CPF* est devenu l'*eCPF*, le texte et les équations ont été convertis dans le langage typographique électronique LaTeX, et toutes les figures ont été refaites à l'aide de logiciels modernes.

Les conséquences pour la version papier de cette édition ne sont pas spectaculaires ; elle a presque la même allure que les livres connus et appréciés des étudiants en physique depuis des décennies. Les différences principales sont la prise en compte des erreurs signalées par des lecteurs durant les années écoulées depuis la précédente édition, et l'aisance avec laquelle les éventuelles coquilles repérées par les futurs lecteurs pourront être corrigées.

La version *eBook* de cette édition et sa *version électronique augmentée* constituent des innovations numériques. Contrairement à ce qui se passe avec la plupart des versions électroniques de livres techniques du XX^e siècle, dont les équations, les figures et parfois même le texte se « pixelisent » lorsqu'on essaie de les agrandir, le manuscrit LaTeX de cette nouvelle édition permet de créer des livres numériques de la plus grande qualité, dans lesquels tout ce qui figure sur la page (sauf les photographies) peut être agrandi sans limite, tout en gardant des contours et des détails nets. Et la version électronique augmentée, grâce à ses enregistrements audio et ses instantanés du tableau des cours magistraux de Feynman, ainsi que ses liens vers d'autres ressources, constitue une innovation qui aurait beaucoup plu à Feynman.

Souvenirs des cours de Feynman

Ces volumes forment un tout pédagogique et complet. Ils sont aussi la trace historique des cours de physique de premier cycle donnés par Feynman entre 1961 et 1964 à tous les étudiants de premières années à Caltech, quelle qu'ait été leur matière principale.

Les lecteurs se demanderont peut-être, en tout cas je me le suis demandé, quelle impression les cours de Feynman ont laissé aux étudiants qui les suivirent. Feynman, dans sa propre préface, exprimait une opinion plutôt négative : « Je ne crois pas avoir eu beaucoup de succès auprès des étudiants », écrivait-il. Matthew Sands, dans son texte paru avec les *Feynman's Tips on Physics*, a exprimé un point de vue nettement plus positif. Par curiosité, au cours du printemps 2005, j'ai envoyé un message ou parlé à un ensemble quasi aléatoire de 17 étudiants (sur environ 150) ayant suivi les cours de Feynman entre 1961 et 1963 – certains les avaient suivis avec difficulté, d'autres avec aisance, les matières principales allant de la biologie aux mathématiques en passant par la chimie, l'ingénierie, la géologie, l'astronomie et aussi la physique.

Les années ont peut-être teinté leurs souvenirs d'une certaine euphorie, mais environ 80 % se souvenaient des cours de Feynman comme de grands moments dans leurs années universitaires. « C'était comme aller à la messe. » Les cours constituaient « une véritable expérience », « l'expérience de toute une vie, sans doute la chose la plus importante que j'ai retirée de mon passage à Caltech ». « J'étudiais la biologie en matière principale, mais les cours de Feynman ressortent comme un moment fort de mes années de premier cycle... même si je dois avouer que je n'arrivais pas à faire les exercices à l'époque et j'en rendais donc très peu. » « J'étais l'un des étudiants les moins prometteurs dans ce cours, et pourtant je ne ratais jamais une séance... je me souviens et peux encore même ressentir la joie de la découverte qu'avait Feynman... Ses cours avaient un impact émotionnel qui s'est probablement perdu dans la version papier. »

En revanche, certains des étudiants avaient des souvenirs négatifs, principalement dus à deux problèmes : (a) « On ne pouvait pas apprendre à résoudre les exercices en suivant le cours. Feynman était trop lisse – il connaissait les astuces et savait quelles approximations pouvaient être faites, et il avait une intuition, du recul ainsi que du génie ; toutes choses qu'un étudiant débutant ne possède pas. » Feynman et ses collègues remédièrent en partie à ce problème avec les suppléments désormais inclus dans les *Feynman's Tips on Physics* : trois séances de travaux dirigés données par Feynman et un ensemble d'exercices corrigés réunis par Robert B. Leighton et Rochus Vogt. (b) « Le malaise suscité par le fait de ne pas savoir ce qui allait être traité au cours suivant, l'absence de manuel ou de références bibliographiques en lien direct avec le contenu du cours, et de ce fait l'impossibilité de préparer le cours suivant, étaient des aspects très frustrants. Je trouvais les cours passionnants et compréhensibles dans l'amphithéâtre, mais c'était du chinois après coup [lorsque j'essayais de les reprendre en détail]. » Ce problème bien sûr fut résolu par la parution du présent ouvrage, la version papier du *Cours de physique de Feynman*. Ce livre devint le manuel des étudiants de Caltech pendant de nombreuses années, et il demeure aujourd'hui un des joyaux que nous a légués Feynman.

Une histoire d'errata

Le travail de Feynman et de ses coauteurs, Robert B. Leighton et Matthew Sands, pour l'édition du CFP se fit en un temps très court, à partir d'enregistrements audio du cours

magistral et de photographies des tableaux¹ (deux sources disponibles dans la *version électronique augmentée* de cette édition du *millenium*). Étant donné la vitesse record à laquelle Feynman, Leighton et Sands travaillèrent, il était inévitable que de nombreuses erreurs se glissent dans la première édition. Au fil des années qui suivirent, Feynman consulta de longues listes d'errata supposées – rapportées par des étudiants ou des collègues de Caltech, ainsi que par des lecteurs du monde entier. Dans les années 1960 et au début des années 1970, Feynman dégagea un peu de temps dans sa vie bien remplie pour vérifier la plupart (mais pas la totalité) des errata rapportés dans les volumes I et II, et pour insérer les corrections requises lors des ré-impressions. Néanmoins, son sens du devoir ne s'éleva pas si haut, en particulier face à l'enthousiasmante idée de faire des découvertes, qu'il aille jusqu'à prendre le temps de s'occuper des errata du volume III². Après sa précoce disparition, en 1988, les listes d'errata pour les trois volumes furent déposées aux Archives de Caltech, et y tombèrent dans l'oubli.

En 2002, Ralph Leighton (fils de feu Robert Leighton et compatriote de Feynman) m'informa de l'existence de ces anciens errata et d'une nouvelle (longue) liste établie par un ami de Ralph, Michael Gottlieb. Leighton proposa que Caltech réalise une nouvelle édition du CFP, avec toutes les corrections, et qu'elle soit publiée avec un nouveau volume contenant quelques annexes, les *Feynman's Tips on Physics*, que lui et Gottlieb préparait.

Feynman avait été mon idole et un ami très proche. Voyant les listes d'errata et le contenu du nouveau volume proposé, je décidai rapidement d'assurer la supervision de ce projet au nom de Caltech (le port d'attache universitaire de Feynman pour une grande partie de sa carrière, et auquel lui, Leighton et Sands avaient confié tous les droits et responsabilités liés au CFP). Après un an et demi de travail méticuleux avec Gottlieb, et un examen minutieux mené par Michael Hartl (un formidable postdoctorant de Caltech, qui a revu toutes les errata et relu le nouveau volume), l'*édition définitive* de 2005 vit le jour, avec près de 200 corrections et accompagnée des *Feynman's Tips on Physics* de Feynman, Gottlieb et Leighton.

Je *pensais* que cette édition serait la « Définitive ». Mais c'était sous-estimer l'enthousiasme avec lequel des lecteurs du monde entier allaient répondre à l'invitation lancée par Gottlieb pour repérer d'autres erreurs, et les indiquer sur un site internet qu'il avait créé et dont il continue d'assurer la maintenance : *The Feynman Lectures Website*, www.feynmanlectures.info. Dans les cinq ans qui suivirent, 965 nouvelles erreurs furent inventoriées et passèrent sous les fourches caudines de Gottlieb, Hartl et Nate Bode (un doctorant exceptionnel, qui a pris à Caltech la succession de Hartl au poste d'examineur d'errata). Sur ces 965 erreurs relevées, 80 furent corrigées dans le quatrième tirage de l'*édition définitive* (août 2006) et les 885 restantes le sont dans le premier tirage de

1. Pour une description de la genèse des cours de Feynman et de ces ouvrages, cf. la préface de Feynman et les avant-propos de chaque tome, ainsi que le mémoire de Matt Sands publié dans *Feynman's Tips on Physics*, et la *Préface à l'édition anniversaire* du CFP écrite en 1989 par David Goodstein et Gerry Neugebauer, reprise dans l'*Édition définitive* de 2005.

2. En 1975, il avait commencé à examiner les errata du volume III, mais il fut distrait de cette tâche par d'autres choses avant de l'avoir terminée, si bien qu'aucune correction ne fut faite.

cette *Nouvelle Édition du Millénum* (322 dans le volume I, 263 dans le volume II et 300 dans le volume III). Pour connaître le détail de ces errata, reportez-vous au site www.feynmanlectures.info.

Il est clair que l'entreprise visant à expurger le CFP de toute coquille et erreur est devenue une démarche coopérative mondiale. De la part de Caltech, je tiens à remercier les 50 lecteurs qui ont contribué depuis 2005 à cette entreprise, et les très nombreux lecteurs qui y contribueront sans doute dans les années à venir. Les noms de tous les contributeurs sont publiés sur www.feynmanlectures.info/flp_errata.html.

Les erreurs relevées tombent presque toujours dans l'une des trois catégories suivantes : (i) des erreurs typographiques dans le texte ; (ii) des erreurs typographiques ou mathématiques dans les équations, les tableaux ou les figures – erreurs de signes, nombres erronés (par exemple un 5 qui devrait être un 4), indices, symboles de sommation, parenthèses ou termes manquant dans des équations ; (iii) références erronées à des chapitres, tableaux ou figures. Ces types d'erreurs, si peu graves qu'elles puissent être pour un physicien chevronné, peuvent induire en erreur et contrarier le public visé en priorité par Feynman : les étudiants.

Il est remarquable que, sur les 1 165 erreurs corrigées sous ma supervision, seules quelques-unes aient été, selon moi, véritablement des erreurs de physique. Par exemple, dans le Volume 2, pages 5-9, où l'on peut maintenant lire « ... aucune distribution statique de charges à l'intérieur d'un conducteur fermé et *relié à la terre* ne peut produire de champs (électriques) à l'extérieur » (les termes *relié à la terre* ne figuraient pas dans les éditions précédentes). Cette erreur avait été signalée à Feynman par un certain nombre de lecteurs, dont Beulah Elizabeth Cox, une étudiante du College of William and Mary, qui s'était appuyée sur ce passage erroné du cours de Feynman lors d'un examen. Feynman lui écrivit, en 1975³ « Votre professeur a eu raison de ne pas vous mettre de points. En science, ce sont des arguments et des raisonnements soigneusement menés qu'il faut suivre, pas des autorités. Aussi, vous avez lu le livre correctement, et l'avez compris. Je me suis trompé, et donc le livre est erroné. Je pensais sans doute à une sphère conductrice reliée à la terre, ou au fait que déplacer les charges en différents points à l'intérieur n'affecte pas la situation à l'extérieur. Je ne sais ce qui m'est arrivé, mais j'ai fait une bourde. Et vous aussi, en me croyant sur parole. »

Comment cette nouvelle édition du Millénum a vu le jour

Entre novembre 2005 et juillet 2006, 340 errata furent rapportés au *Feynman Lectures Website* www.feynmanlectures.info. De façon remarquable, l'essentiel de ces errata avaient été relevés par une seule et même personne : Rudolf Pfeiffer, alors postdoctorant à l'université de Vienne, en Autriche. L'éditeur, Addison Wesley, corrigea 80 errata, mais rechignait à en corriger plus, pour des raisons de coût : les livres étaient imprimés à partir d'un procédé *d'offset* photographique, basé sur les images photographiques des pages imprimées dans les années 1960. Corriger une erreur impliquait de recomposer toute la

3. Pages 288-289 de *Perfectly Reasonable Deviations from the Beaten Tracks, The Letters of Richard P. Feynman*, édition dirigée par Michelle Feynman (Basic Books : New York, 2005).

page, et pour s'assurer qu'aucune nouvelle erreur ne se glissait dans la page, elle était re-tapée deux fois, par deux personnes différentes, puis les deux versions étaient comparées et relues par plusieurs personnes – un processus très coûteux en effet, dès lors qu'il s'agit de corriger des centaines d'erreurs.

Gottlieb, Pfeiffer et Ralph Leighton étaient très mécontents de cette situation, et mirent donc sur pied un plan visant à faciliter la correction de toutes les erreurs, ainsi qu'à permettre l'édition d'un livre électronique et de versions électroniques augmentées du CFP. Ils me soumirent leur projet en 2007, étant le représentant de Caltech pour ces questions. Je fus enthousiaste, bien que prudent. Après avoir examiné le projet plus en détail, et notamment un chapitre de démonstration de la version électronique augmenté, je recommandai à Caltech de s'associer avec Gottlieb, Pfeiffer et Leighton pour la réalisation de leur projet. Celui-ci fut approuvé par trois titulaires successifs de chaires à la Faculté de Physique, Mathématiques et Astronomie de Caltech – Tom Tombrello, Andrew Lange et Tom Soifer – et Adam Cochran, le juriste de Caltech pour les questions de droits et propriété intellectuels, s'occupa des détails légaux et contractuels complexes. Avec la publication de cette *Nouvelle édition du Millénium*, le projet a été mené à bien, malgré sa complexité. En particulier :

Pfeiffer et Gottlieb ont converti au format LaTeX les trois volumes du CFP (et aussi plus de mille exercices tirés du cours, inclus dans les *Feynman's Tips on Physics*). Les figures de CFP ont été refaites, directement sous formes électroniques, en Inde, sous la direction du traducteur allemand du CFP, Henning Heinze, pour l'édition allemande du CFP. Gottlieb et Pfeiffer ont négocié le droit non exclusif d'utiliser les figures de Heinze dans l'édition anglaise du *Nouveau Millénium* contre celui, pour l'éditeur allemand Oldenbourg, d'utiliser leurs équations LaTeX. Pfeiffer et Gottlieb ont relu méticuleusement tout le texte et toutes les équations en LaTeX, ils ont revu toutes les figures et apporté les corrections nécessaires. Nate Bode et moi-même, pour le compte de Caltech, avons relu des passages du texte, des équations et des figures pris au hasard : nous n'avons, et c'est remarquable, trouvé aucune erreur. Pfeiffer et Gottlieb sont d'une méticulosité et d'une précision incroyables. Ils ont également demandé à John Sullivan, de la *Huntington Library*, de numériser les photographies des tableaux de Feynman prises entre 1962 et 1964, et à George Blood Audio de numériser les enregistrements sur bande magnétique des cours – avec le soutien moral et financier de Carver Mead, professeur à Caltech, le soutien logistique de Shelley Erwin, Archiviste à Caltech et le soutien juridique de Cochran.

Les questions juridiques ont été épineuses : dans les années 1960, Caltech avait cédé à Addison Wesley les droits de publication de l'édition papier, et, dans les années 1990, les droits de distribution de l'enregistrement audio des cours de Feynman ainsi que ceux d'une version électronique. Au cours des années 2000, une succession de cessions de ces droits avait conduit à ce qu'ils soient détenus par le groupe Pearson pour l'édition papier, et par le groupe Perseus pour les éditions audio et électronique. Cochran, avec l'aide de Ike Williams, avocat spécialiste des questions d'édition, est parvenu à réunifier ces droits au sein du groupe Perseus (Basic Books), ce qui a rendu possible l'*Édition du nouveau Millénium*.

Remerciements

De la part de Caltech, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont rendu possible cette nouvelle édition. En particulier celles qui ont joué des rôles clés : Ralph Leighton, Michael Gottlieb, Tom Tombrello, Michael Hartl, Rudolf Pfeiffer, Henning Heinze, Adam Cochran, Carver Mead, Nate Bode, Shelley Erwin, Andrew Lange, Tom Soifer, Ike Williams et les 50 personnes qui ont signalé des erreurs (leurs noms sont sur www.feynmanlectures.info). Et je remercie également Michelle Feynman (la fille de Richard Feynman) pour son soutien sans faille et ses conseils, Alan Rice pour l'aide en coulisses et ses conseils à Caltech, Stephan Puchegger et Calvin Jackson pour l'aide et les conseils apportés à Pfeiffer concernant la conversion du *CPF* en LaTeX, Michael Figl, Manfred Smolik et Andreas Stangl pour les discussions relatives aux corrections et coquilles ; et toute l'équipe de Perseus/Basic Books et (pour les éditions précédentes) celle de Addison Wesley.

Kip S. Thorne

Professeur émérite de Physique théorique,
Titulaire de la chaire Feynman au California Institute of Technology

Octobre 2010

TABLE DES MATIÈRES

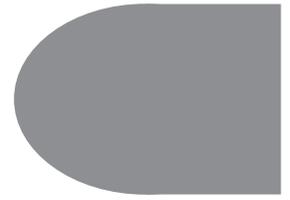
À propos de Richard Feynman	III
Préface à la nouvelle édition américaine	V
Préface de Richard Feynman	XV
Liste des symboles	XIX
Introduction	XXIII
Chapitre 1. Atomes en mouvement	1
1.1 Introduction	1
1.2 La matière est faite d'atomes	3
1.3 Processus atomiques	7
1.4 Réactions chimiques	10
Chapitre 2. Physique de base	15
2.1 Introduction	15
2.2 La physique avant 1920	18
2.3 Physique quantique	22
2.4 Noyaux et particules	25
Chapitre 3. La physique par rapport aux autres sciences	31
3.1 Introduction	31
3.2 Chimie	31
3.3 Biologie	33
3.4 Astronomie	40
3.5 Géologie	41
3.6 Psychologie	43
3.7 Comment en est-on arrivé là?	43
Chapitre 4. Conservation de l'énergie	47
4.1 Qu'est-ce que l'énergie?	47
4.2 Énergie potentielle gravitationnelle	49
4.3 Énergie cinétique	54
4.4 Autres formes de l'énergie	55
Chapitre 5. Temps et distance	59
5.1 Mouvement	59
5.2 Temps	60
5.3 Courts intervalles de temps	61
5.4 Longs intervalles de temps	63
5.5 Unités et étalons de temps	66
5.6 Grandes distances	66
5.7 Petites distances	69

Chapitre 6. Probabilité	75
6.1 Chance et probabilité	75
6.2 Fluctuation	77
6.3 Le parcours aléatoire	81
6.4 Une distribution de probabilité	85
6.5 Le principe d'incertitude	88
Chapitre 7. La théorie de la gravitation	91
7.1 Mouvements planétaires	91
7.2 Lois de Kepler	92
7.3 Développement de la dynamique	93
7.4 Loi de gravitation de Newton	94
7.5 Gravitation universelle	97
7.6 L'expérience de Cavendish	103
7.7 Qu'est-ce que la gravitation?	104
7.8 Gravitation et relativité	107
Chapitre 8. Mouvement	109
8.1 Description du mouvement	109
8.2 Vitesse	112
8.3 La vitesse considérée comme une dérivée	116
8.4 La distance considérée comme une intégrale	118
8.5 L'accélération	120
Chapitre 9. Lois de Newton de la dynamique	125
9.1 Quantité de mouvement et force	125
9.2 Célérité et vitesse	127
9.3 Composantes de la vitesse, de l'accélération et de la force	127
9.4 Quelle est la force?	129
9.5 Signification des équations dynamiques	130
9.6 Solution numérique des équations	131
9.7 Mouvements planétaires	133
Chapitre 10. Conservation de la quantité de mouvement	139
10.1 Troisième Loi de Newton	139
10.2 Conservation de la quantité de mouvement	141
10.3 La quantité de mouvement est conservée!	145
10.4 Quantité de mouvement et énergie	149
10.5 Quantité de mouvement relativiste	151
Chapitre 11. Vecteurs	155
11.1 La symétrie en physique	155
11.2 Translations	156
11.3 Rotations	158
11.4 Vecteurs	161
11.5 Algèbre vectorielle	163
11.6 Les lois de Newton en notations vectorielles	165
11.7 Produit scalaire de vecteurs	167

Chapitre 12. Caractéristiques d'une force	171
12.1 Qu'est-ce qu'une force?	171
12.2 Frottement	174
12.3 Forces moléculaires	178
12.4 Forces fondamentales. Champs	180
12.5 Pseudo-forces	185
12.6 Forces nucléaires	188
Chapitre 13. Travail et énergie potentielle (A)	189
13.1 Énergie d'un corps qui tombe	189
13.2 Travail réalisé par la gravitation	193
13.3 Addition de l'énergie	197
13.4 Champ gravitationnel d'objets étendus	199
Chapitre 14. Travail et énergie potentielle (conclusion)	203
14.1 Travail	203
14.2 Mouvement contraint	205
14.3 Forces conservatives	206
14.4 Forces non conservatives	211
14.5 Potentiels et champs	213
Chapitre 15. La théorie de la relativité restreinte	219
15.1 Le principe de la relativité	219
15.2 La transformation de Lorentz	221
15.3 L'expérience de Michelson-Morley	223
15.4 Transformation du temps	226
15.5 La contraction de Lorentz	229
15.6 Simultanéité	230
15.7 Quadri-vecteurs	230
15.8 Dynamique relativiste	231
15.9 Équivalence entre la masse et l'énergie	233
Chapitre 16. Énergie et quantité de mouvement relativistes	237
16.1 La relativité et les philosophes	237
16.2 Le paradoxe des jumeaux	240
16.3 Transformation des vitesses	241
16.4 Masse relativiste	244
16.5 Énergie relativiste	248
Chapitre 17. Espace-Temps	251
17.1 La géométrie de l'espace-temps	251
17.2 Intervalles d'espace-temps	254
17.3 Passé, présent et futur	256
17.4 Davantage sur les quadri-vecteurs	257
17.5 Algèbre des quadri-vecteurs	260
Chapitre 18. Rotation à deux dimensions	265
18.1 Le centre de masse	265
18.2 Rotation d'un corps rigide	267
18.3 Moment cinétique	271
18.4 Conservation du moment cinétique	273

Chapitre 19. Centre de masse; moment d'inertie	277
19.1 Propriétés du centre de masse	277
19.2 Comment situer le centre de masse	281
19.3 Comment trouver le moment d'inertie	283
19.4 Énergie cinétique de rotation	287
Chapitre 20. Rotation dans l'espace	291
20.1 Couples en trois dimensions	291
20.2 Les équations de rotation en utilisant les produits vectoriels	296
20.3 Le gyroscope	298
20.4 Moment cinétique d'un corps solide	302
Chapitre 21. L'oscillateur harmonique	305
21.1 Équations différentielles linéaires	305
21.2 L'oscillateur harmonique	306
21.3 Mouvement harmonique et mouvement circulaire	309
21.4 Conditions initiales	311
21.5 Oscillations forcées	312
Chapitre 22. Algèbre	315
22.1 Addition et multiplication	315
22.2 Les opérations inverses	316
22.3 Abstraction et généralisation	317
22.4 Comment obtenir une valeur approchée des nombres irrationnels	319
22.5 Nombres complexes	324
22.6 Exposants imaginaires	327
Chapitre 23. Résonance	331
23.1 Nombres complexes et mouvement harmonique	331
23.2 L'oscillateur forcé avec amortissement	334
23.3 Résonance électrique	337
23.4 Résonance dans la nature	340
Chapitre 24. Régimes transitoires	347
24.1 L'énergie d'un oscillateur	347
24.2 Oscillations amorties	349
24.3 Régimes transitoires en électricité	353
Chapitre 25. Systèmes linéaires et révision	357
25.1 Équations différentielles linéaires	357
25.2 Superposition des solutions	359
25.3 Oscillations dans les systèmes linéaires	364
25.4 Analogies en physique	366
25.5 Impédances en série et en parallèle	369
Index	371

PRÉFACE DE RICHARD FEYNMAN



Voici les cours de physique que j'ai donnés l'année dernière et l'année précédente aux élèves de première et de deuxième année au Caltech. Bien sûr, ces cours ne rapportent pas mot pour mot ce qui fut dit — certains passages sont retranscrits dans leur intégralité, d'autres seulement partiellement. Ces leçons ne forment qu'une partie du cours complet. Le groupe des 180 étudiants se rassemblait dans une grande salle deux fois par semaine pour assister à ces cours, puis se divisait en petits groupes de quinze à vingt étudiants dans des sections de travaux dirigés sous la direction d'un assistant. Il y avait de plus une séance de travaux pratiques une fois par semaine.

Le problème particulier que nous avons essayé de résoudre avec ces leçons était de maintenir l'intérêt des étudiants, très enthousiastes et assez brillants, qui venaient de sortir des écoles secondaires et rentraient au Caltech. Ils avaient entendu beaucoup de choses sur les aspects intéressants et excitants de la physique — la théorie de la relativité, la mécanique quantique et d'autres idées modernes. Après avoir suivi deux années de nos cours précédents, beaucoup se seraient sentis découragés parce qu'on ne leur aurait présenté que très peu d'idées modernes, grandes et nouvelles. Ils auraient étudié les plans inclinés, l'électrostatique, etc., et au bout de deux ans cela est passablement ridicule. Le problème était de savoir si, oui ou non, nous pouvions faire un cours qui pourrait maintenir l'enthousiasme des étudiants les plus avancés.

Les cours qui suivent ici ne sont pas du tout considérés comme une vue d'ensemble, mais sont très sérieux. J'ai pensé les adresser aux plus intelligents de la classe et je fis en sorte, dans la mesure du possible, que même l'étudiant le plus intelligent ne fut pas capable de saisir complètement tout ce qui se trouvait dans les cours — en suggérant un développement des idées et des concepts dans diverses directions s'écartant de la principale ligne d'attaque. Pour cette raison, j'ai essayé avec beaucoup d'attention de rendre les énoncés aussi précis que possible, d'indiquer dans chaque cas l'endroit où les équations et les idées trouvaient leur place dans l'ensemble de la physique et comment — lorsqu'ils en apprendraient davantage — les choses se modifieraient. J'ai pensé également que pour de tels étudiants, il est important d'indiquer ce qu'ils doivent — s'ils sont suffisamment intelligents — être capables de comprendre par déduction de ce qui a été dit précédemment et ce qui est introduit comme quelque chose de nouveau. Lorsque de nouvelles idées apparaissaient, j'ai essayé soit de les déduire, quand on pouvait le faire, ou d'expliquer que *c'était* une nouvelle idée qui ne s'exprimait pas en fonction des choses qu'ils avaient apprises jusqu'alors, qu'on ne pouvait pas la démontrer — mais qu'elle était simplement ajoutée.

Pour le début de ces cours, j'ai supposé que l'étudiant avait certaines connaissances en science lorsqu'il sortait de l'enseignement secondaire — telles que l'optique géométrique, les idées de chimie élémentaire, etc. Je n'ai pas vu de raison particulière pour

faire les cours dans un ordre défini au sens où je ne me serais pas permis de mentionner une chose avant d'être prêt à la discuter en détail. De nombreuses notions étaient apportées sans discussions complètes, puis étaient détaillées par la suite, lorsque la préparation était plus avancée. Des exemples en sont les discussions de l'induction et des niveaux d'énergie qui sont introduites une première fois d'une manière très qualitative et sont plus tard développées plus en détail.

En même temps que je m'efforçais d'intéresser les étudiants les plus actifs, je voulais également prendre soin de ceux pour lesquels les applications marginales et ces feux d'artifices supplémentaires sont simplement inquiétants et dont on ne peut attendre qu'ils apprennent la totalité du matériau dans chaque leçon. Pour de tels étudiants, je souhaitais qu'il y ait au moins un noyau central, une ossature, qu'ils *puissent* acquérir. Même s'ils ne comprenaient pas tout dans une leçon, j'espérais qu'ils ne se décourageraient pas. Je ne m'attendais pas à ce qu'ils comprennent tout, mais seulement les caractéristiques centrales et les traits les plus directs. Il fallait bien sûr une certaine intelligence de leur part pour voir quels sont les théorèmes centraux, les idées centrales et quelles sont les issues latérales plus avancées et les applications qu'ils pouvaient ne comprendre que dans les années à venir.

J'ai rencontré une difficulté sérieuse en donnant ces cours : selon la manière dont le cours était donné, il n'y avait aucune expression en retour venant des étudiants pour indiquer comment les leçons étaient assimilées. Ceci est en effet une difficulté très sérieuse et je ne sais pas effectivement quelle est la qualité de ces cours. L'ensemble était essentiellement une expérience. Et si je devais le refaire je ne le ferais pas de la même manière — j'espère que je *n'aurai pas* à le refaire ! Je pense, cependant, que les choses se sont bien passées, du moins en ce qui concerne la physique, durant la première année.

Pendant la deuxième année je ne fus pas aussi satisfait. Dans la première partie du cours traitant de l'électricité et du magnétisme, je n'ai pas trouvé de moyen d'amener les choses de façon plus excitante que la manière habituelle de présentation. Je ne pense pas avoir apporté beaucoup dans ces cours sur l'électricité et le magnétisme. Je pensais initialement continuer à la fin de la deuxième année après l'électricité et le magnétisme, en donnant quelques cours supplémentaires sur les propriétés des matériaux, mais essentiellement en insistant sur des choses telles que les modes fondamentaux, les solutions de l'équation de diffusion, les systèmes vibratoires, les fonctions orthogonales, etc., développant les premières étapes de ce qu'on appelle habituellement « les méthodes mathématiques de la physique ». À y repenser, je considère que si je devais le refaire, je reviendrais à cette idée initiale. Mais comme il n'était pas prévu que je donnerais à nouveau ces leçons, on suggéra que cela serait une bonne idée que d'essayer – de présenter une introduction de la mécanique quantique – ce que vous trouverez au volume III¹.

Il est parfaitement clair que les étudiants qui s'orienteront vers la physique peuvent attendre jusqu'à leur troisième année pour étudier la mécanique quantique. D'un autre côté l'argument fut avancé que nombreux étaient les étudiants dans notre cours qui étu-

1. Volume I de l'édition américaine : *Mécanique 1 et 2* pour l'édition française. Volume II : *Électromagnétique 1 et 2* pour l'édition française. Volume III : *Mécanique quantique* pour l'édition française.

diaient la physique comme un bagage qui pourrait servir de complément à leurs préoccupations fondamentales dans d'autres domaines. Et la manière habituelle de traiter la mécanique quantique rend ce sujet presque inaccessible pour la plus grande partie des étudiants, parce qu'il leur faut trop de temps pour l'apprendre. De plus, dans ses applications réelles, spécialement dans ses applications les plus complexes telles que dans les techniques électriques et la chimie — le mécanisme complet de l'approche par l'équation différentielle n'est pas effectivement utilisé. Aussi ai-je essayé de décrire les principes de mécanique quantique d'une manière qui ne nécessite pas que l'on connaisse d'abord les mathématiques des équations différentielles partielles. Je pense que, même pour un physicien, c'est une chose intéressante à essayer — que de présenter la mécanique quantique de manière inversée — pour plusieurs raisons qui peuvent être apparentes dans les cours eux-mêmes. Cependant je pense que l'expérience, dans la partie de mécanique quantique, ne fut pas complètement un succès — pour une large part parce que je n'ai pas eu, à la fin, suffisamment de temps (j'aurais dû, par exemple, faire trois ou quatre cours supplémentaires, de manière à traiter plus complètement des sujets tels que les bandes d'énergie et la dépendance spatiale des amplitudes). De plus je n'avais jamais auparavant présenté ce sujet de cette manière, ce qui fait que l'absence de réaction en retour fut particulièrement sérieuse. Je pense maintenant que la mécanique quantique devrait être enseignée plus tardivement. Il se peut que j'aie un jour la chance de le refaire. Alors je le ferai correctement.

La raison pour laquelle il n'y a pas de cours sur la manière dont on résout les problèmes est qu'il y avait des sections de travaux dirigés. Bien que j'ai mis dans trois cours, en première année, ce qu'il faut savoir pour résoudre les problèmes, ceci n'est pas inclus ici. Il y avait également un cours sur le guidage par inertie qui se situe certainement après les cours sur les systèmes en rotation mais qui fut malheureusement omis. Les cinquième et sixième cours sont en réalité dus à Matthew Sands, car j'étais absent à cette époque.

La question est bien sûr de savoir comment cette expérience a réussi. Mon propre point de vue — qui cependant ne semble pas être partagé par la plus grande partie des personnes qui ont travaillé avec les étudiants — est pessimiste. Je ne pense pas avoir réellement bien travaillé avec les étudiants. Lorsque je considère la manière dont la majorité des étudiants traitaient les problèmes aux examens, je pense que ce système est un échec. Bien entendu, mes amis m'ont fait remarquer qu'il y avait une ou deux douzaines d'étudiants qui — d'une manière très surprenante — comprenaient presque tous les cours et qui étaient très actifs, travaillant avec le contenu de ces leçons et se préoccupant des divers points d'une manière intéressée et passionnée. Ceux-ci ont maintenant, je le pense, un bagage fondamental de première qualité en physique — et ils sont après tout ceux auxquels je désirais m'adresser. Mais alors, « La puissance de l'instruction est rarement de grande efficacité à l'exception de ces dispositions heureuses où elle est pratiquement superflue » (Gibbons).

Toutefois je ne désirais laisser aucun étudiant complètement en arrière, comme peut-être je l'ai fait. Je pense qu'une manière par laquelle nous pourrions aider davantage les étudiants serait de faire plus d'efforts pour développer un ensemble de problèmes qui permettraient d'élucider certaines des idées dans les cours. Les problèmes donnent

une bonne occasion d'utiliser les matériaux des leçons et de rendre plus réalistes, plus complètes et plus ancrées dans les esprits, les idées qui ont été exposées.

Je pense cependant qu'il n'y a aucune solution à ce problème d'éducation autre que de réaliser que le meilleur enseignement ne peut être obtenu que lorsqu'il y a une relation directe et individuelle entre un étudiant et un bon professeur — une situation dans laquelle l'étudiant discute les idées, pense sur les choses et parle des choses. Il est impossible d'en apprendre beaucoup simplement en assistant à un cours ou même simplement en faisant les problèmes qui sont demandés. Mais à notre époque moderne nous avons tellement d'étudiants à qui enseigner qu'il nous faut essayer de trouver quelques substituts à l'idéal. Peut-être mes cours pourront-ils apporter une certaine contribution. Peut-être, çà et là se trouvent en nombre restreint des enseignants et des étudiants qui pourront tirer un peu d'inspiration ou quelques idées de ces cours. Peut-être auront-ils du plaisir à les lire et à y réfléchir ou à essayer de pousser plus loin le développement de certaines de ces idées.

RICHARD P. FEYNMAN

LISTE DES SYMBOLES

Mécanique 1

$ $	valeur absolue	I	courant électrique
$\binom{n}{k}$	coefficient binomial n sur k	I	moment d'inertie
a^*	conjugué complexe de a	\mathbf{j}	vecteur unité de direction y
$\langle \rangle$	valeur attendue	\mathbf{k}	vecteur unité de direction z
∇	opérateur nabla, $\nabla = \partial/\partial x + \partial/\partial y + \partial/\partial z$	\mathbf{L}	vecteur moment angulaire
\approx	approximativement	L	magnitude ou composante du vecteur moment angulaire
\sim	de l'ordre de	L	self-induction
\propto	proportionnel à	m	masse
α	accélération angulaire	m_0	masse au repos
ϵ_0	constante diélectrique ou permittivité du vide, $\epsilon_0 = 8,854187817 \times 10^{-12}$ F/m	$p_\mu = (E, \mathbf{p})$	quadri-vecteur quantité de mouvement
λ	longueur d'onde	\mathbf{p}	vecteur quantité de mouvement
μ	coefficient de friction	p_x, p_y, p_z	composantes cartésiennes du vecteur quantité de mouvement
ν	fréquence	p	magnitude ou composante du vecteur quantité de mouvement
σ	rayon	P	puissance
τ	couple total	$P(k, n)$	probabilité de Bernouilli ou binomiale
$\boldsymbol{\tau}$	vecteur de couple total	$P(A)$	probabilité d'observer l'événement A
ω	vitesse angulaire	q	charge électrique
$\boldsymbol{\omega}$	vecteur vitesse angulaire	\mathbf{r}	vecteur position
\mathbf{a}	vecteur d'accélération	r	rayon ou distance
a_x, a_y, a_z	composantes cartésiennes du vecteur accélération	R	résistance
a	magnitude ou composante du vecteur accélération	s	distance
A	aire	S	étrangeté
\mathbf{B}	vecteur champ magnétique (induction magnétique)	t	temps
B_x, B_y, B_z	composantes cartésiennes du vecteur champ magnétique	T	demi-vie
c	vitesse de la lumière, $c = 2,99792458 \times 10^8$ m/s	T	énergie cinétique
C	capacitance	u	vitesse
d	distance	U	énergie potentielle
\mathbf{E}	vecteur champ électrique	\mathbf{v}	vecteur vitesse
E_x, E_y, E_z	composantes cartésiennes du vecteur champ électrique	v_x, v_y, v_z	composantes cartésiennes du vecteur vitesse
E	énergie	v	magnitude ou composante du vecteur vitesse
\mathbf{F}	vecteur force	V	vitesse
F_x, F_y, F_z	composantes cartésiennes du vecteur force	V	différence de potentiel
F	magnitude ou composante du vecteur force du vecteur champ électrique	W	poids
g	accélération de la pesanteur	W	travail
G	constante gravitationnelle	x	coordonnée cartésienne
h	constante de Planck, $h = 6,62606896 \times 10^{-34}$ J·s	y	coordonnée cartésienne
\hbar	constante de Planck réduite, $\hbar = h/2\pi$	z	coordonnée cartésienne
i	nombre imaginaire unité	Z	impédance complexe
\mathbf{i}	vecteur unité de direction x		

Mécanique 2

γ coefficient de capacité de chaleur (index adiabatique ou coefficient spécifique de chaleur)	k_x, k_y, k_z composantes cartésiennes du vecteur d'onde
κ conductivité thermique	\mathbf{k} vecteur d'onde
ρ densité	k magnitude ou composante du vecteur d'onde, nombre d'ondes
σ constante de Stefan-Boltzmann, $\sigma = 5,6704 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$	n index de réfraction
C_V chaleur spécifique à volume constant	P pression
\mathbf{e}_r vecteur unité dirigé vers \mathbf{r}	Q chaleur
\mathcal{E} énergie	S entropie
f longueur focale	T température absolue
I intensité	U énergie interne
k constante de Boltzmann, $k = 1,3806504 \times 10^{-23} \text{ J/K}$	V volume
$k_\mu = (\omega, \mathbf{k})$ quadri-vecteur onde	$x_\mu = (t, \mathbf{r})$ quadri-vecteur position

Électromagnétisme 1

∇^2 opérateur Laplacien, $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$	j_x, j_y, j_z composantes cartésiennes du vecteur densité de courant électrique
κ permittivité relative	λ longueur d'onde réduite, $\lambda = \lambda/2\pi$
μ moment magnétique	\mathcal{L} Lagrangien
$\boldsymbol{\mu}$ vecteur moment magnétique	L self-induction
ρ densité de charge électrique	\mathfrak{M} inductance mutuelle
ϕ potentiel électrostatique	\mathbf{n} vecteur unité normal
χ susceptibilité électrique	\mathbf{p} vecteur moment dipolaire
\mathbf{A} potentiel vecteur	p magnitude ou composante du vecteur moment dipolaire
A_x, A_y, A_z composantes cartésiennes du potentiel vecteur	\mathbf{P} vecteur polarisation
\mathbf{D} vecteur déplacement électrique	P magnitude ou composante du vecteur polarisation
ε force électromotrice	S action
\mathbf{h} vecteur flux de chaleur	\mathcal{V} différence de potentiel
\mathbf{j} vecteur densité de courant électrique	

Électromagnétisme 2

\square^2 opérateur d'Alembertien, $\square^2 = \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2$	K compressibilité
μ module de cisaillement	\mathbf{M} vecteur aimantation
σ coefficient de Poisson	M inductance mutuelle
$\boldsymbol{\Omega}$ vorticité	\mathcal{M} moment de flexion
$A\boldsymbol{\mu} = (\phi, \mathbf{A})$ quadrivecteur	p pression
$F_{\mu\nu}$ tenseur électromagnétique	\mathcal{R} nombre de Reynold
\mathbf{H} vecteur champ d'aimantation	\mathbf{S} vecteur de Poynting
I_{ij} tenseur d'inertie	S_{ij} tenseur de contrainte
\mathbf{J} vecteur moment angulaire de l'orbite de l'électron	U irréalité totale de l'Univers
$J_0(x)$ fonction de Bessel de premier ordre	Y module de Young

Mécanique quantique

$ 1\rangle, 2\rangle$ un choix spécifique de vecteurs de base pour un système à deux états	$ L\rangle$ état d'un photon polarisé circulairement à gauche
$ I\rangle, II\rangle$ un choix spécifique de vecteurs de base pour un système à deux états	m_{eff} masse effective d'un électron dans une structure cristalline
$\langle\phi $ état, écrit comme un vecteur d'état (<i>bra</i>)	\mathbf{n} n ième chiffre romain, \mathbf{n} prenant les valeurs I, II, \dots, \mathbf{N}
$\langle f s\rangle$ amplitude pour qu'un système de condition initiale $ s\rangle$ se trouve dans la condition finale $ f\rangle$	N_n nombre d'électrons par unité de volume
$ \phi\rangle$ état, écrit comme un vecteur d'état (<i>ket</i>)	N_p nombre de trous par unité de volume
κ constante de Boltzmann, $\kappa = 1,3806504 \times 10^{-23}$ J/K	$P_{\text{spin exch}}$ opérateur d'échange de spin de Pauli
σ vecteur de matrices de spin de Pauli	$ R\rangle$ état d'un photon polarisé circulairement à droite
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ matrices de spin de Pauli	$U(t_2, t_1)$ opérateur désignant l'opération « attendre du moment t_1 au moment t_2 »
Φ_0 unité de base du flux	$Y_{l,m}(\theta, \varphi)$ harmoniques sphériques
C coefficients de Clebsch-Gordan	
E_{gap} énergie de gap	
\mathcal{E}_{tr} vecteur de champ électrique vertical	
\mathcal{E} vecteur de champ électrique	
I intensité	

INTRODUCTION



Ce livre est réalisé d'après un cours d'introduction à la physique, donné par le Professeur R. P. Feynman à l'Institut de Technologie de Californie pendant l'année universitaire 1961-62 ; il recouvre la première année d'un cours d'introduction de deux ans, suivi par tous les élèves de première et de deuxième année de Caltech et fut suivi en 1962-63 par un cours analogue couvrant la deuxième année. Les leçons constituent la partie essentielle d'une révision fondamentale, réalisée sur une période de quatre ans, du cours d'introduction.

La nécessité d'une révision fondamentale provenait à la fois du développement rapide de la physique dans les dernières années et du fait que les nouveaux étudiants montraient une capacité mathématique en augmentation constante comme résultat de l'amélioration du contenu des cours mathématiques de l'enseignement secondaire. Nous espérions tirer avantage de cette connaissance mathématique améliorée et également introduire suffisamment de matériau moderne pour rendre ce cours attirant, intéressant et plus représentatif de la physique actuelle.

Afin de faire naître une grande variété d'idées sur le type de matériau à inclure et sur la manière de le présenter, un nombre élevé de Professeurs appartenant à la Faculté furent encouragés à donner leurs idées sous forme de lignes directrices pour un cours révisé. Plusieurs de celles-ci furent présentées, furent discutées complètement et d'une manière critique. On se mit d'accord pratiquement immédiatement sur le fait qu'une révision fondamentale du cours ne pouvait être réalisée soit en adoptant simplement un autre manuel soit même en écrivant un *ab initia*, mais que le nouveau cours devait être centré sur un ensemble de leçons devant être présentées au rythme de deux ou trois par semaine ; le texte approprié serait alors produit dans un deuxième temps au fur et à mesure que le cours se développerait et des expériences de laboratoire convenables seraient également mises au point pour s'adapter au contenu des cours. En conséquence, un schéma approximatif du cours fut établi, mais il fut reconnu que ceci était incomplet, que c'était une tentative, et sujet à des modifications considérables par qui que ce soit qui prendrait la responsabilité de préparer effectivement les leçons.

Pour ce qui est du mécanisme par lequel le cours devait finalement prendre forme, plusieurs plans furent considérés. Ces plans étaient pour la plupart assez semblables, prévoyant un effort coopératif de N professeurs qui se partageraient l'entière besogne d'une manière symétrique et égale : chaque professeur prendrait la responsabilité de $1/N$ du matériau, ferait les cours et écrirait le texte pour sa partie. Cependant l'impossibilité d'obtenir une équipe en nombre suffisant, les difficultés de maintenir un point de vue uniforme à cause des différences de personnalités et de philosophies entre les participants, donnèrent l'impression que ces plans étaient irréalisables.

L'idée que nous possédions effectivement les moyens de créer non seulement un cours de physique nouveau et différent mais peut-être un cours unique, fut une heureuse inspiration du Professeur Sands. Il suggéra que le Professeur R.P. Feynman prépare et donne les leçons, et qu'elles soient enregistrées sur magnétophone. Transcrites et éditées, ces leçons deviendraient alors le manuel de ce nouveau cours. C'est essentiellement ce plan qui fut adopté.

Nous espérions que le travail nécessaire d'édition serait mineur, consistant simplement à tracer les figures et à vérifier la ponctuation et la grammaire. Il devait être réalisé par un ou deux assistants sur la base d'un travail à temps partiel. Malheureusement cet espoir fut de courte durée. Ce fut en réalité une opération considérable d'édition que de transformer la transcription mots pour mots, en une forme lisible, même sans la réorganisation ou la révision du matériau qui s'est avérée quelquefois nécessaire. De plus ce n'était pas un travail pour un éditeur scientifique ou pour un étudiant en cours de thèse, mais un travail qui nécessitait l'attention serrée d'un physicien professionnel à concurrence de dix à vingt heures par cours !

Les difficultés du travail d'édition jointes à la nécessité de placer un texte entre les mains d'étudiants aussi rapidement que possible imposa une limite stricte au degré réalisable de « polissage » du matériau et nous fumes ainsi forcés de réaliser un produit préliminaire, mais correct du point de vue technique, qui pourrait être utilisé immédiatement, plutôt que de réaliser un produit qui pourrait être considéré comme achevé. À cause de la nécessité urgente d'un nombre croissant de copies pour nos étudiants et d'un intérêt croissant de la part d'instructeurs et d'étudiants de différentes autres institutions, nous décidâmes de publier le matériau dans sa forme préliminaire plutôt que d'attendre une révision fondamentale qui pourrait très bien ne jamais arriver. Nous n'avons aucune illusion sur le degré d'achèvement, de polissage ou d'organisation logique du matériau ; en fait, nous prévoyons plusieurs modifications mineures du cours dans le futur immédiat et nous espérons qu'il ne restera pas statique en forme comme en contenu.

En plus de ces leçons qui constituent une partie centrale importante du cours, il était nécessaire de donner des exercices adaptés pour développer l'expérience et le savoir-faire des étudiants et des expériences convenables pour donner un premier contact en laboratoire avec le contenu de la leçon. Aucun de ces deux aspects n'est dans un état aussi élaboré que le matériau du cours, mais des progrès considérables ont été réalisés. Certains exercices ont été réalisés au fur et à mesure que les leçons progressaient, et ils furent développés et amplifiés pour être utilisés au cours des années suivantes. Cependant, parce que nous ne sommes pas encore maintenant convaincus du fait que les exercices puissent apporter suffisamment de variété et de richesse dans les applications sur le matériau des leçons pour rendre l'étudiant parfaitement conscient de la puissance extraordinaire placée à sa disposition, les exercices sont publiés séparément sous une forme moins permanente, afin d'encourager une révision fréquente.

Un certain nombre de nouvelles expériences, pour ces nouveaux cours, ont été mises au point par le Professeur H.V. Neher. Parmi elles, il y en a plusieurs qui utilisent le frottement extrêmement faible manifesté par un support gazeux : un nouveau conduit linéaire à coussin d'air avec lequel furent réalisées des mesures quantitatives de mou-

vement à une dimension, de collisions et de mouvement harmonique et une toupie de Maxwell supportée et conduite par l'air, avec laquelle les mouvements de rotation accélérés, la précession gyroscopique et la nutation purent être étudiés. Le développement de nouvelles expériences de laboratoire doit se continuer pendant une très longue période de temps.

Le programme de révision fut placé sous la direction des Professeurs R.B. Leighton, H.V. Neher et M. Sands. Les participants officiels au programme étaient les Professeurs R.P. Feynman, G. Neugebauer, R.M. Sutton, H.P. Stabler, F. Strong et R. Vogt, de la division de Physique, de Mathématique et d'Astronomie et les Professeurs T. Caughey, M. Plesset et C.H. Wilts, des divisions des Sciences de l'Ingénieur. L'aide utile de tous ceux qui ont contribué au programme de révision appelle de vifs remerciements. Nous sommes particulièrement redevables à la fondation Ford sans l'aide financière de laquelle ce programme n'aurait pu être réalisé.

ROBERT B. LEIGHTON

ATOMES EN MOUVEMENT

1

1.1 INTRODUCTION

Ce cours de physique qui s'étend sur deux ans suppose que vous, lecteur, allez devenir un physicien. Ce n'est pas nécessairement le cas, bien sûr, mais c'est ce qu'en chaque discipline tout professeur suppose ! Si un jour vous devenez un physicien, vous aurez beaucoup à apprendre : deux siècles de connaissances dans le domaine ayant le développement le plus rapide qui soit. Une si grande somme de connaissances en réalité, que vous allez penser ne pouvoir tout apprendre en quatre années, et certainement vous ne le pourrez pas ; il vous faut également continuer vos études au-delà de la licence !

Il est assez surprenant, malgré l'œuvre gigantesque qui a été réalisée pendant toute cette période, de constater qu'il est possible dans une large mesure de condenser cette masse immense de résultats – c'est-à-dire de trouver des *lois* qui résument tout notre savoir. Même ainsi, les lois sont si difficiles à saisir qu'il serait déloyal à votre égard de commencer l'exploitation de ce si vaste sujet sans une sorte de plan ou de vue d'ensemble des relations des disciplines scientifiques entre elles. Suivant ces remarques préliminaires, les trois premiers chapitres décriront donc brièvement les relations de la physique à l'ensemble des autres sciences, les relations des sciences entre elles et la signification de la science, ceci pour nous aider à acquérir une première « intuition » du sujet.

Vous pouvez vous demander pourquoi nous n'enseignons pas la physique en donnant simplement les lois de base à la page 1, et en vous montrant ensuite ce qui en découle dans toutes les circonstances possibles, comme cela se fait pour la géométrie euclidienne, où nous énonçons les axiomes dont nous tirons ensuite toutes les déductions possibles. (Ainsi non contents d'apprendre la physique en quatre ans, vous voulez l'apprendre en quatre minutes !) Nous ne pouvons faire cela pour deux raisons : premièrement nous ne *connaissons* pas encore toutes les lois fondamentales : la frontière de l'ignorance recule sans cesse. Deuxièmement, l'énoncé correct des lois de physique implique certaines idées très peu familières dont la compréhension demande l'usage de mathématiques avancées. De ce fait, on a besoin d'un entraînement préparatoire considérable, ne serait-ce que pour apprendre ce que les *mots* signifient. Non, il n'est pas possible de procéder ainsi. Nous ne pouvons avancer qu'étape après étape.

Chaque fragment de l'ensemble de la nature n'est en fait qu'une simple *approximation* de la vérité totale ou de ce que nous croyons être à l'heure actuelle la vérité totale. En fait tout ce que nous savons n'est qu'approximation parce que *nous savons que nous ne connaissons pas encore toutes les lois*. De ce fait, les choses doivent être apprises seulement pour être désappries ensuite ou, plus probablement, pour être corrigées.

Le principe de la science, sa définition, pour ainsi dire, est ce qui suit : *toute notre connaissance est à l'épreuve de l'expérience*. L'expérience est *seul juge* de la « vérité »

scientifique. Mais quelle est la source du savoir ? D'où viennent les lois qui doivent être vérifiées ? L'expérience elle-même nous aide à faire apparaître ces lois, en ce sens qu'elle nous donne des suggestions. Mais aussi il est nécessaire d'avoir de l'*imagination* pour créer à partir de ces suggestions les grandes généralisations – pour deviner les structures magnifiquement simples, mais très étranges, derrière toutes ces suggestions, et ensuite pour expérimenter, afin de vérifier si nous avons fait la bonne supposition. Cette démarche d'imagination est si difficile qu'il y a une division du travail en physique : il y a des physiciens *théoriciens* qui imaginent, déduisent et inventent de nouvelles lois, mais ne font pas d'expériences ; et il y a des physiciens *expérimentaux* qui font des expériences, imaginent, déduisent, et devinent.

Nous disons que les lois de la nature sont approchées : que nous trouvons d'abord celles qui sont « fausses », et que nous trouvons ensuite celles qui sont « justes ». Comment une expérience peut-elle être « fausse ? » Premièrement, de façon évidente : s'il y avait quelque chose de faux que vous n'avez pas remarqué dans votre appareillage. Mais ces choses sont facilement décelées et vérifiées plusieurs fois. Ainsi sans s'arrêter à des détails de si peu d'importance, comment les résultats d'une expérience *peuvent-ils* être faux ? Simplement en étant imprécis. Par exemple, la masse d'un objet ne semble jamais changer : une toupie en rotation a le même poids qu'une toupie au repos. Une « loi » fut donc inventée : la masse est constante, indépendante de la vitesse. On a maintenant découvert que cette « loi » est incorrecte. On a trouvé que la masse augmente avec la vitesse, mais on n'obtient des augmentations appréciables qu'aux vitesses proches de celles de la lumière. La *véritable* loi est : si un objet se déplace à une vitesse inférieure à 160 km/s, la masse est constante à raison d'une part pour un million. Dans une telle forme approchée, cette loi est correcte. Ainsi en pratique, on peut penser que la nouvelle loi n'apporte pas de différences significatives. Eh bien, oui et non. Pour les vitesses ordinaires nous pouvons certainement l'oublier et utiliser la loi de la masse constante comme une bonne approximation. Mais pour les vitesses élevées nous avons tort, et plus la vitesse est élevée, plus nous nous trompons.

Finalement, et c'est ce qu'il y a de plus intéressant, *d'un point de vue philosophique, nous sommes*, avec la loi approchée, *complètement dans l'erreur*. Notre description entière du monde doit être modifiée même si la vitesse ne change que d'une petite quantité. Ceci est une chose très particulière si l'on se place sur le plan de la philosophie ou des idées au-delà des lois. Même un très petit effet nécessite quelquefois des modifications profondes de nos idées.

Que devons-nous enseigner d'abord ? Devons-nous enseigner les lois *correctes* mais non familières, avec leurs concepts étranges et difficiles, par exemple la théorie de la relativité, l'espace-temps à quatre dimensions, etc. ? Ou devons-nous d'abord enseigner la loi simple de la « masse constante », qui est seulement approchée, mais qui ne comporte pas d'idées aussi difficiles ? La première méthode est plus passionnante, plus merveilleuse et plus amusante, mais la seconde est plus facile à suivre au début, et constitue une première étape pour une compréhension réelle de la deuxième idée. Ce problème apparaît très souvent dans l'enseignement de la physique. À différents moments nous aurons à le résoudre de différentes manières, mais à chaque étape cela vaut la peine

d'apprendre ce que l'on sait maintenant, avec quelle précision, comment cela s'imbrique dans tout le reste, et comment cela peut changer au moment où nous en apprendrons davantage.

Voyons maintenant ce résumé, notre plan général de compréhension de la science d'aujourd'hui (la physique en particulier, mais aussi d'autres sciences voisines) afin que plus tard, lorsque nous concentrerons notre attention sur quelques points particuliers, nous ayons une idée de l'arrière-plan, des raisons pour lesquelles ce point particulier est intéressant, et comment il s'intègre dans la structure globale. Donc quelle *est* notre vision générale du monde ?

1.2 LA MATIÈRE EST FAITE D'ATOMES

Si, dans un cataclysme, toute notre connaissance scientifique devait être détruite, et qu'une seule phrase passe aux générations futures, quelle affirmation contiendrait le maximum d'information dans le minimum de mots ? Je pense que c'est *l'hypothèse atomique* (ou le *fait* atomique, ou tout autre nom que vous voudrez lui donner) que *toutes les choses sont faites d'atomes – petites particules qui se déplacent en mouvement perpétuel, s'attirant mutuellement à petite distance les unes des autres et se repoussant lorsqu'on veut les faire se pénétrer*. Dans cette seule phrase vous verrez qu'il y a une *énorme* quantité d'informations sur le monde, si on lui applique simplement un petit peu d'imagination et de réflexion.

Pour illustrer la puissance de l'idée atomique, supposez que nous ayons une goutte d'eau d'un centimètre de côté. Si nous la regardons de très près nous ne voyons que de l'eau – d'apparence homogène et continue. Même si nous agrandissons avec le meilleur microscope optique utilisable – approximativement de deux mille fois – alors la goutte d'eau sera à peu près large de 20 mètres et aura la dimension d'une grande pièce, et si nous regardons à nouveau de très près, nous verrons *encore* de l'eau relativement uniforme – mais çà et là de petites choses en forme de ballon de football nageant de-ci de-là. Très intéressant. Ce sont les paramécies. Vous pouvez vous arrêter là et porter tant d'intérêt aux paramécies avec leurs cils frétilants et leurs corps en train de se tordre que vous n'irez pas plus loin, sauf peut-être que vous agrandirez encore la paramécie et examinerez l'intérieur. Ceci bien sûr relève de la biologie, et pour le présent nous le laissons de côté, et regardons l'eau elle-même en agrandissant encore de deux mille fois. Maintenant la goutte d'eau atteint environ 40 kilomètres, et si nous la regardons de très près nous voyons une sorte de fourmillement, quelque chose qui n'a plus une apparence continue – mais qui ressemble à une foule assistant à une partie de football vue de loin. De manière à mieux observer ce fourmillement, nous allons agrandir à nouveau de deux cent cinquante fois et nous découvrirons quelque chose de semblable à ce qui est montré à la Fig. 1.1. C'est un dessin de l'eau agrandie un milliard de fois, mais schématisé à plus d'un point de vue. D'abord les particules sont dessinées d'une façon simpliste avec des bords nets, ce qui est inexact. Deuxièmement, pour simplifier, elles sont dessinées presque idéalement dans un espace à deux dimensions, mais bien sûr elles se déplacent dans un espace à trois dimensions. Remarquez qu'il y a deux types de « taches », de

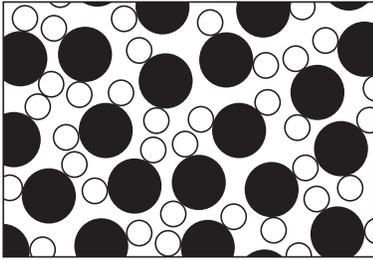


Figure 1.1 – Eau agrandie un milliard de fois.

cercles, pour représenter l'atome d'oxygène (noir) et d'hydrogène (blanc) et que chaque oxygène est relié à deux hydrogènes. (Chaque petit groupe d'un oxygène avec ses deux hydrogènes est appelé une molécule.) Le dessin est également schématisé en ce sens que les particules telles qu'on les trouve dans la nature sont continuellement en train de danser, rebondir, tourner et se tordre les unes autour des autres. Vous devez imaginer ceci davantage comme une reproduction dynamique plutôt que statique. Une autre chose qui ne peut être mise en évidence dans un dessin est le fait que les particules sont « collées » les unes aux autres – qu'elles s'attirent mutuellement, l'une étant tirée par l'autre, etc. Le groupe dans son ensemble est en quelque sorte un « agglomérat ». D'autre part, les particules ne peuvent se traverser l'une l'autre. Si vous essayez de trop les rapprocher, elles se repoussent.

Les atomes ont 1 ou 2×10^{-8} cm de rayon. Comme on appelle 10^{-8} cm un *angström* (un nom comme un autre), un atome a un rayon de 1 ou 2 angströms (Å). Une autre manière de se rappeler leur dimension est la suivante : si une pomme est agrandie à la dimension de la Terre, alors les atomes de la pomme ont approximativement la dimension de la pomme dont on est parti.

Maintenant imaginez cette goutte d'eau avec toutes ces particules dansantes agglomérées et accrochées les unes aux autres. L'eau garde son volume ; elle ne se disperse pas à cause de l'attraction mutuelle des molécules. Si la goutte est sur une pente, où elle peut se déplacer, l'eau coulera mais elle ne disparaît pas – les choses ne se dispersent pas comme cela – à cause de l'attraction moléculaire. Par ailleurs cette agitation est ce que nous représentons comme étant de la *chaleur* : lorsque nous augmentons la température, nous augmentons le mouvement. Si nous chauffons l'eau, l'agitation augmente ainsi que le volume entre les atomes, et si le chauffage continue, il arrive un moment où l'attraction entre les molécules n'est plus suffisante pour les maintenir ensemble ; elles se *dispersent* en tous sens et se séparent les unes des autres. C'est ainsi que nous produisons de la vapeur à partir de l'eau – en augmentant la température ; les particules s'écartent les unes des autres à cause de l'augmentation du mouvement.

À la Fig. 1.2 nous avons un dessin de la vapeur. Ce dessin de la vapeur est incorrect sur un point : à la pression atmosphérique ordinaire, il peut n'y avoir que relativement peu de molécules dans toute une pièce, et il n'y en aurait certainement pas même trois dans cette figure. La plupart des rectangles de cette dimension n'en contiendraient aucune – et nous en trouvons accidentellement deux et demi ou trois dans ce dessin (uniquement pour qu'il ne soit pas complètement vide). Maintenant dans le cas de la vapeur nous