

Brahim Lamine

Méca

LE LIVRE QU'IL VOUS FAUT POUR (ENFIN)
COMPRENDRE
LA MÉCANIQUE

DUNOD

Couverture : Rachid Marai

Crédits iconographiques :

- Page 100 : Georges W. Ackerman
- Page 103 : CERN
- Page 182 : f9 photos - iStock.com
- Page 198 : geolives © Institut Géographique National belge

© Dunod, 2019

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-079764-6

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.

Table des matières

Avant-propos	IX
Remerciements	X
Liste des acronymes	XI

Partie I

Introduction	1
--------------	---

Chapitre 1	Analyse dimensionnelle	7
1.	Dimension et unité	7
1.1.	Le système international d'unités	8
1.2.	Unités dérivées	12
1.3.	Unités naturelles et changement d'unités	13
1.4.	Grandeurs sans unité et/ou sans dimension	16
2.	Analyse dimensionnelle	17
2.1.	Homogénéité	19
2.2.	Quelques remarques	20
2.3.	Analyse dimensionnelle et prévision de lois simples	22
2.4.	Loi d'échelle	25

Chapitre 2	Constantes et interactions fondamentales	27
1.	Constantes fondamentales	27
1.1.	Liste de quelques constantes fondamentales	27
1.2.	Système d'unités naturelles	29
2.	Interactions fondamentales	30
2.1.	Interaction gravitationnelle	30
2.2.	Interaction électromagnétique	33
2.3.	Interaction faible	36
2.4.	Interaction forte	36

Partie II

Cinématique	37
-------------	----

Chapitre 3	Repérage d'un point dans l'espace (-temps)	41
1.	Référentiel et repère	41
1.1.	À propos du temps	41

1.2.	Repère spatial	41
1.3.	Trajectoire et relativité du mouvement	43
2.	Système de coordonnées cartésiennes	44
2.1.	Mouvement 1D	44
2.2.	Généralisation à 3D	45
3.	Systèmes de coordonnées cylindriques et sphériques	48
3.1.	Système de coordonnées polaires (2D)	48
3.2.	Système de coordonnées cylindriques (3D)	50
3.3.	Système de coordonnées sphériques (3D)	51
Chapitre 4	Cinématique 1D	53
1.	Position et vitesse	53
1.1.	Vitesse moyenne <i>versus</i> vitesse instantanée	53
1.2.	Représentations d'espace-temps	54
1.3.	Problème inverse : équation horaire	56
1.4.	Transformations de Galilée	57
2.	Accélération	57
2.1.	Mouvement accéléré/décéléré	57
2.2.	Retour sur les diagrammes d'espace-temps	60
2.3.	Problème inverse	61
3.	Exemples de mouvements unidimensionnels	61
3.1.	Mouvement rectiligne uniforme	61
3.2.	Mouvement rectiligne uniformément accéléré	62
3.3.	Mouvement rectiligne harmonique	62
Chapitre 5	Cinématique 2D et 3D	65
1.	Vitesse et accélération	65
1.1.	Vitesse	65
1.2.	Vecteur vitesse en coordonnées polaires/cylindriques	66
1.3.	Vecteur vitesse en coordonnées sphériques	68
1.4.	Composition des vitesses	69
1.5.	Accélération	71
2.	Exemple du mouvement uniformément accéléré	75
3.	Exemple du mouvement circulaire	76
3.1.	Vitesse et vitesse angulaire	76
3.2.	Accélération d'un mouvement circulaire uniforme	80
3.3.	Accélération d'un mouvement circulaire non uniforme	82
4.	Repère de Frenet - système de coordonnées curvilignes	83

Partie III

Dynamique newtonienne 89

Chapitre 6 Les forces 97

1. Propriétés des forces 97
 - 1.1. Principe de linéarité 98
 - 1.2. Forces extérieures versus forces intérieures 99
2. Exemples de forces 100
 - 2.1. Forces à distance 101
 - 2.2. Forces de contact exercées par un fluide 105
 - 2.3. Forces de contact exercées par un solide 109

Chapitre 7 Lois de Newton 121

1. Première loi de Newton (1LN) ou principe d'inertie 121
 - 1.1. Aspect historique 121
 - 1.2. Énoncé du principe 123
 - 1.3. Référentiel galiléen 126
2. Deuxième loi de Newton (2LN) ou principe fondamental de la dynamique 128
3. Troisième loi de Newton (3LN) ou principe des actions réciproques 135
4. Exemples d'applications des lois de Newton 138
 - 4.1. Problème de statique 138
 - 4.2. Glissement avec frottement solide 139
 - 4.3. Balistique (chute libre) 141
 - 4.4. Machine d'Atwood 144
 - 4.5. Un exemple de système ouvert 145
 - 4.6. Effondrement d'un immeuble 146

Partie IV

Énergie 149

Chapitre 8 Travail et énergie cinétique 155

1. Travail et puissance 155
 - 1.1. Travail élémentaire 155
 - 1.2. Puissance d'une force 157
 - 1.3. Travail sur un chemin 158

2.	Quelques exemples de travail	159
2.1.	Travail le long d'un chemin rectiligne	160
2.2.	Travail d'une force constante	162
2.3.	Travail d'une force de rappel	163
2.4.	Travail d'une force de frottement	164
3.	Théorème de l'énergie cinétique (TEC)	165
3.1.	Théorème de la puissance cinétique (TPC)	165
3.2.	Théorème de l'énergie cinétique (TEC)	167
Chapitre 9	Énergie potentielle et forces conservatives	171
1.	Exemples d'énergie potentielle	172
1.1.	Cas d'une force constante	172
1.2.	Force gravitationnelle et force de Coulomb	173
1.3.	Force de rappel élastique	174
2.	Énergie mécanique	175
2.1.	Définition	175
2.2.	Théorème général	178
3.	Collisions (ou chocs)	179
3.1.	Collision 1D (choc frontal) élastique	181
3.2.	Collision 2D élastique	184
3.3.	Choc mou	185
4.	Un pas vers la thermodynamique : énergie interne U	188
5.	Étude qualitative des mouvements et des équilibres - 1D	189
5.1.	Position du problème sur un exemple	189
5.2.	Lien entre force et énergie potentielle	191
5.3.	Position d'équilibre	193
5.4.	Petites oscillations autour d'un équilibre	195
6.	Généralisation au cas 3D	197
6.1.	Opérateur gradient	197
6.2.	Relation locale entre force conservative et énergie potentielle	199

Partie V

Évolution temporelle des systèmes 205

Chapitre 10 Évolution des systèmes d'ordre 1 209

1.	Chute en présence de frottement fluide	209
1.1.	Position du problème	209
1.2.	Résolution du problème	210
1.3.	Cas général	215

2. Phénomènes traités par le même modèle mathématique	218
2.1. Désintégration radioactive	219
2.2. Autres exemples empruntés à la physique	222
2.3. Autres exemples empruntés à d'autres domaines	226
3. Exemples de systèmes non linéaires d'ordre 1	229
3.1. Force de traînée	229
3.2. Modèle de Verhulst (1836)	230

Chapitre 11 Évolution des systèmes d'ordre 2 sans frottement	231
1. Exemple des oscillations d'un ressort	232
1.1. Position du problème	232
1.2. Rappel des solutions d'une équation différentielle d'ordre 2 sans frottement	234
1.3. Solution de l'équation d'oscillateur harmonique	236
1.4. Cas du ressort vertical	239
1.5. Ressort à deux dimensions - courbe de Lissajous	239
2. Exemple du pendule simple	241
2.1. Position du problème	241
2.2. Solution linéarisée	242
3. Autres exemples de système d'ordre 2 sans frottement	243
3.1. Oscillations d'une molécule diatomique	244
3.2. Oscillations d'un flotteur	245
3.3. Oscillations dans un tube en U	246
3.4. Mouvement dans un champ magnétique	247
Corrigés des quiz	249
Corrigés des exercices	251
Corrigés des pauses réflexives	266
Index	269

Avant-propos

Cet ouvrage a pour vocation de vous faire comprendre la physique par le biais de ses concepts fondamentaux. Il présente les bases élémentaires de la mécanique de Newton avec une approche centrée sur la maîtrise des concepts élémentaires, en ne sacrifiant rien à la rigueur mathématique. Ainsi, le lecteur trouvera dans cet ouvrage du cours et du discours. Ce discours a pour objectif de nouer du lien entre les concepts. Pour aider encore plus le lecteur à donner du sens à ces liens, cet ouvrage contient un certain nombre de quiz, qui apparaissent au fil du cours au moment précis où il est pertinent de se « challenger » sur le concept qui vient d'être développé. Ces quiz ne sont pas destinés à vérifier que vous connaissez votre cours, ils sont là pour vous aider à comprendre. Ainsi, pour utiliser pleinement ce livre, il vous faut faire l'effort de répondre à ces quiz au fil des pages, en prenant à chaque fois le temps nécessaire de la réflexion.

La connaissance s'acquiert par l'expérience, tout le reste n'est que de l'information.

Albert Einstein

Une mauvaise réponse à ces quiz est sûrement le signe d'une compréhension partielle de la partie traitée. Avant de poursuivre la lecture d'un chapitre, assurez-vous d'arriver à répondre correctement aux quiz. Vous pouvez les retrouver (et plein d'autres encore), accompagnés de la bonne réponse, d'une explication détaillée et de retours personnalisés sur votre réponse, sur la plateforme pédagogique Adele,

<https://my-adele.fr>

Cette plateforme constitue un accompagnement en ligne de cet ouvrage. Vous y trouverez également un forum permettant d'y déposer votre propre justification à chaque question, ainsi que consulter et noter les justifications des autres lecteurs.

Pour vous connecter à ces ressources, vous devez vous créer un compte (possibilité d'utiliser un compte google), puis rejoindre le cours n°9142. Pour cela, rendez-vous sur la page Mes cours, accessible via le menu de gauche, puis cliquez sur « + Rejoindre un cours ».

Ce livre ne se résume donc pas à un simple cours de physique pour étudiant pressé. Cependant, le lecteur qui souhaite avoir un aperçu rapide des « formules à retenir » peut se référer à la dernière section de chaque partie, qui synthétise les formules à connaître par cœur et celles à savoir retrouver rapidement.

Enfin, ce livre a plusieurs grilles de lecture. Le corps du texte présente les concepts qui sont accompagnés des quiz. Les focus sont des remarques importantes à lire, même en première lecture. Les encarts sont des remarques qui peuvent être sautées en première lecture, et qui font des ponts entre les concepts abordés et d'autres concepts plus élaborés de la physique (non nécessairement traités dans cet ouvrage). Enfin, les notes de bas de page peuvent être sautées, elles contiennent des remarques accessoires, le plus souvent destinées aux lecteurs avertis qui souhaitent en savoir encore plus (éclairage historique, anecdotes etc.).



Remerciements

Cet ouvrage d'introduction à la mécanique est né de l'idée d'insister en premier lieu sur les concepts de mécanique. J'ai découvert cette approche conceptuelle dans des ouvrages universitaires des pays anglo-saxons et chez certains auteurs français tels que Laurence Viennot ou Jean-Marc Levy-Leblond. Je remercie mon collègue Alexander Rudolph pour m'avoir initié à la mise en œuvre d'une approche conceptuelle en amphithéâtre à l'université. Je remercie également tous les collègues qui m'ont fait découvrir du matériel pédagogique sur lequel j'ai pu m'appuyer pour adapter ou concevoir des quiz pertinents, en particulier Lin Ding, Raymond Serway, Eric Mazur, et les enseignants de l'université du Colorado.

Je remercie également les différents étudiants de L1 de l'université Paul Sabatier, sur lesquels j'ai testé depuis plusieurs années les questions qui sont rassemblées dans ce livre et sur la plateforme Adele. Enfin, je remercie José-Philippe Perez, qui n'a eu de cesse de m'encourager lors de la rédaction de cet ouvrage, et avec lequel j'ai eu de nombreux échanges qui m'ont beaucoup apporté. Finalement, je termine par remercier ma compagne Laetitia Gomé, enseignante de physique/chimie au lycée, pour sa relecture attentive, ses commentaires constructifs et son soutien inconditionnel tout au long de la rédaction de cet ouvrage.

Liste des acronymes

- 1LN : première loi de Newton
- 2LN : deuxième loi de Newton
- 3LN : troisième loi de Newton
- PFD : principe fondamental de la dynamique
- TEC : théorème de l'énergie cinétique
- TPC : théorème de la puissance cinétique
- TEM : théorème de l'énergie mécanique
- TPM : théorème de la puissance mécanique
- EDL1 : équation différentielle linéaire d'ordre 1
- EDL2 : équation différentielle linéaire d'ordre 2

Partie I

Introduction

Objectifs

- Faire la différence entre dimension et unité.
- Savoir utiliser l'analyse dimensionnelle pour :
 - vérifier l'homogénéité d'un résultat ;
 - déterminer la dimension d'une grandeur intervenant dans une relation ;
 - déterminer une loi si on donne les grandeurs pertinentes à considérer ;
 - construire des lois d'échelle simples.
- Connaître et savoir estimer des ordres de grandeurs macroscopiques et microscopiques, éventuellement à partir d'une analyse dimensionnelle.
- Connaître et savoir exploiter l'expression des forces gravitationnelles et de Coulomb.

Prérequis

- Connaître les ordres de grandeurs macroscopiques et microscopiques relevant du programme du secondaire.
- Maîtriser la manipulation des puissances de 10 et les calculs algébriques de base.
- Maîtriser les changements d'unités.
- Savoir résoudre un système linéaire de N équations à N inconnues.
- Connaître et savoir utiliser le produit vectoriel (direction, sens, norme).

Plan

Chapitre 1. Analyse dimensionnelle

1. Dimension et unité
2. Analyse dimensionnelle

Chapitre 2. Constantes et interactions fondamentales

1. Constantes fondamentales
2. Interactions fondamentales

Qu'est-ce que la physique ?

La nature, telle qu'on l'observe, semble respecter des « règles ». Par exemple, lorsqu'on lâche plusieurs fois un même objet de la même façon, cet objet tombe toujours de façon identique, comme s'il avait respecté une règle de la nature¹. Selon Einstein, ces règles sont si fondamentales que penser qu'elles n'existent pas relève de la folie : « La folie, c'est de faire toujours la même chose et de s'attendre à un résultat différent. » La physique consiste à identifier ces règles^{2,3}. Plus l'Homme découvre et identifie les règles qui régissent la nature, plus il acquiert une certaine forme de contrôle sur elle. C'est cette démarche qui a sorti nos ancêtres des grottes froides et dangereuses et nous fournit notre confort actuel. Notre société doit ainsi beaucoup au travail des physiciens⁴.

Pour autant, il n'existe pas de théorie physique « vraie », mais seulement des théories dont on n'a pas encore montré qu'elles étaient fausses. Une représentation (= une théorie) en remplace une autre lors d'un changement de paradigme⁵. Ainsi, la physique ne prétend pas détenir une quelconque vérité et encore moins fournir de raison au pourquoi les choses se passent comme elles se passent⁶. Son objectif se résume à concevoir une représentation du monde (par le biais de lois mathématiques) qui rend compte, le plus simplement possible, de ces règles de la nature auxquelles nous accédons via l'expérience. Ainsi, le critère de « vérité » en science est le raisonnement et l'expérience⁷. En particulier, les règles de la nature n'étant accessibles que par l'expérience, une théorie physique n'est acceptable que si elle peut être falsifiée par une expérience, c'est-à-dire si la théorie fait des prédictions testables⁸. Lorsque deux théories rendent compte de la

1. Selon Étienne Klein, philosophe et scientifique français, c'est le fait que la nature possède beaucoup de symétries (invariance par translation dans l'espace, le temps, par rotation, etc.), que des « règles » simples peuvent exister et ainsi être objectivées par les mathématiques. Pour Voltaire, l'existence de ces règles simples, et donc de cet ordre, est la preuve de l'existence de Dieu ! Il formulera à ce propos sa célèbre phrase « c'est à l'horloge que l'on reconnaît l'horloger ».

2. Bien sûr, la physique ne fournit qu'une connaissance approchée de ces régularités de la nature.

3. Primo Levy, chimiste italien qui fut envoyé à Auschwitz, a dit que ce qui l'a sauvé c'est la science, car elle n'est pas manipulable. Il faut comprendre que les lois de la physique, c'est-à-dire les régularités de la nature, ne peuvent pas être modifiées par l'Homme.

4. On dit parfois que la moitié du PIB mondial actuel découle directement des découvertes de la mécanique quantique.

5. Voir le livre de Thomas Kuhn, *La structure des révolutions scientifiques*, pour une définition d'un paradigme en science.

6. Il s'agit du postulat d'objectivité de Descartes, selon lequel la nature est objective et non pas projective. Il faut comprendre de ce postulat que la nature n'a pas de projet, de dessein ou de finalité. Ainsi, la science proscriit la recherche des causes finales. Selon Spinoza, « la régression infinie des causes [la chaîne des « pourquoi ? »], qui amène à Dieu, est l'asile de l'ignorance ».

7. Au contraire de la religion, dont la vérité est l'autorité (la consultation des livres), comme le dit Blaise Pascal.

8. En ce sens, certaines théories physiques modernes comme la théorie des cordes échappent à ce principe.