

FLUORESCIENCES
**LES MANUELS VISUELS
POUR LA LICENCE**

Mécanique

Méca

Christophe Cappe

LES FONDAMENTAUX

COURS AVEC EXEMPLES CONCRETS

100 QCM ET EXERCICES CORRIGÉS

200 ILLUSTRATIONS EN COULEURS

LES  EN LIGNE

DUNOD

Direction artistique : Élisabeth Hébert
Conception graphique de la couverture : Pierre-André Gualino
Conception graphique de la maquette intérieure : Marse
Mise en page : Lumina Datamatics, Inc.

© Dunod, 2020

11, rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com

ISBN 978-2-10-081654-5

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

Le selfie de l'auteur	VI
Avant-propos et remerciements	1

CHAPITRE

1

CINÉMATIQUE	2
1 Cadre spatio-temporel de la mécanique classique	4
1.1 Du solide au point matériel	4
1.2 Le temps	4
1.3 L'espace	5
1.4 Relativité du mouvement	7
2 Différents systèmes de repérage	9
2.1 Le repérage cartésien	9
2.2 Le repérage polaire	10
2.3 Le repérage cylindrique	11
2.4 Trajectoire et abscisse curviligne	12
3 Vitesse d'un point matériel	13
3.1 Notion de vecteur vitesse	13
3.2 Expressions du vecteur vitesse	14
4 Accélération d'un point matériel	15
4.1 Vecteur accélération	15
4.2 Expressions du vecteur accélération	16
5 Étude de quelques mouvements	17
5.1 Cas du mouvement rectiligne	17
5.2 Cas du mouvement circulaire	19
6 Éléments de cinématique du solide	23
6.1 Mouvement de translation	23
6.2 Mouvement de rotation autour d'un axe fixe	24

CHAPITRE

2

INTERACTIONS MÉCANIQUES ET FORCES	30
1 Les interactions fondamentales	32
2 L'interaction électromagnétique	33
3 L'interaction gravitationnelle	34
4 Forces de contact	36
4.1 Actions exercées par un fluide	36
4.2 Actions exercées par un support solide	40
4.3 Force de rappel élastique d'un ressort à spires non jointives	43
4.4 Tension d'un fil tendu idéal	43
5 Première approche de l'équilibre	44
5.1 Force intérieure et force extérieure	44
5.2 Première condition d'équilibre	45

DYNAMIQUE	52
1 Principes de la mécanique newtonienne	54
1.1 Principe d'inertie (première loi de Newton)	54
1.2 Principe fondamental de la dynamique (deuxième loi de Newton)	54
1.3 Principe des actions réciproques (troisième loi de Newton)	56
2 Mise en œuvre de la 2^e loi de Newton	56
2.1 Étude d'un mouvement de chute libre	57
2.2 Étude d'un mouvement de chute avec frottements fluide	60
2.3 Étude du mouvement d'un pendule simple	62
3 Théorème du centre d'inertie	65
3.1 Centre d'inertie	65
3.2 Quantité de mouvement d'un solide	66
3.3 Théorème du centre d'inertie	66

ÉNERGIE	74
1 Travail et puissance d'une force	76
1.1 Travail d'une force	76
2 Théorème de l'énergie cinétique	80
2.1 Énergie cinétique et théorème de la puissance cinétique	81
2.2 Théorème de l'énergie cinétique	82
3 Énergie potentielle	83
3.1 Forces conservatives et énergie potentielle	84
3.2 Exemples	84
3.3 Pour aller plus loin	85
4 Énergie mécanique	86
5 Mouvement conservatif à un degré de liberté	88
5.1 Analyse qualitative du mouvement	88
5.2 Positions d'équilibre et stabilité	89

THÉORÈME DU MOMENT CINÉTIQUE	96
1 Moment cinétique	98
1.1 Moment cinétique d'un point matériel par rapport à un point	98
1.2 Moment cinétique d'un point matériel par rapport à un axe	100
1.3 Moment cinétique d'un solide en rotation autour d'un axe fixe	101
2 Moment d'une force	103
2.1 Moment d'une force par rapport à un point	103
2.2 Moment d'une force par rapport à un axe	103
2.3 Couple de forces	106
2.4 Couple de torsion	106
3 Théorème du moment cinétique	107
3.1 Cas d'un point matériel	107
3.2 Cas d'un solide en rotation autour d'un axe fixe	109
3.3 Retour sur l'équilibre d'un solide	114
4 Énergie d'un solide en rotation autour d'un axe fixe	116
4.1 Énergie cinétique	116
4.2 Puissance des forces intérieures	117
4.3 Puissance des forces extérieures	118
4.4 Théorèmes énergétiques	118

LES OSCILLATEURS MÉCANIQUES 124

1	L'oscillateur libre non amorti ou harmonique	126
1.1	Modèle d'étude	126
1.2	Analyse du mouvement	127
1.3	Étude énergétique	128
1.4	Généralisation	130
2	L'oscillateur libre amorti par frottements fluides	132
2.1	Forme canonique de l'équation différentielle	132
2.2	Différents régimes	133
2.3	Étude du régime pseudo-périodique	134
2.4	Étude des régimes apériodique et critique	139
3	L'oscillateur forcé	141
3.1	Régime transitoire et régime permanent	141
3.2	Réponses en régime permanent	143
3.3	Phénomène de résonance	146

FORCES CENTRALES NEWTONIENNES 156

1	Forces centrales conservatives	158
1.1	Description	158
1.2	Cas des forces newtoniennes	158
2	Lois de conservation	160
2.1	Première loi de conservation	160
2.2	Deuxième loi de conservation	162
3	Cas de l'interaction gravitationnelle	165
3.1	Référentiels d'étude	165
3.2	Les lois de Kepler	166
3.3	Cas de la trajectoire circulaire	168
3.4	Cas de la trajectoire elliptique	171
3.5	Cas de la trajectoire hyperbolique	176

Corrigés	183
----------------	-----

Annexe	204
--------------	-----

Constantes et données astronomiques	207
---	-----

Index	208
-------------	-----

Crédits iconographiques	210
-------------------------------	-----

Le selfie de l'auteur

Christophe Cappe



Je suis professeur agrégé de physique à l'université Rennes 1. J'enseigne en particulier l'électromagnétisme du vide et des milieux, la thermique et la mécanique dans les licences de Physique et de Physique-Chimie. J'interviens également dans les préparations disciplinaires aux concours de recrutement des enseignants (CAPES et Agrégation).

Avant-propos et remerciements

La mécanique est la science du mouvement et de ses causes. Ses lois permettent d'expliquer des observations de notre quotidien aussi variées que la forme caractéristique de la trajectoire d'un ballon de football lors d'un dégagement, la stabilité d'une échelle en appui contre un mur, les oscillations de l'extrémité d'un gratte-ciel à la suite d'une bourrasque ou encore le mouvement des nombreux satellites en orbite autour de notre planète. La mécanique qui sera abordée dans cet ouvrage est qualifiée de mécanique classique ou encore de mécanique newtonienne, en hommage à Isaac Newton qui en a posé les fondements grâce à trois principes. Cette mécanique réduit le système physique d'étude à un point matériel dont la connaissance des forces qu'il subit et leurs effets permettra d'en appréhender le mouvement. Nous verrons qu'elle pourra aussi être abordée par d'autres biais tout aussi féconds, ceux de l'énergie ou du moment cinétique.

La formalisation de la mécanique en concepts et lois nécessite la maîtrise de différents outils mathématiques rappelés de façon systématique au fur et à mesure des besoins. Pour faciliter la compréhension et l'utilisation de ces lois, le lecteur trouvera tout au long de l'ouvrage des points méthodiques et de nombreux exemples d'application, ainsi que des focus permettant de préciser certaines notions transversales à la mécanique.

Pour qu'un exercice de mécanique ne se limite pas à une mise en œuvre purement mathématique des lois associées, chaque exercice a été soigneusement choisi pour sa modélisation physique d'une situation concrète tirée d'applications technologiques, d'expériences historiques ou encore de phénomènes naturels. Afin d'éviter d'alourdir l'énoncé de ces exercices, toutes les constantes utiles à leur résolution sont regroupées dans une table en fin d'ouvrage. Le lecteur y trouvera également une annexe mathématique sur les principales équations différentielles rencontrées en mécanique.

Je remercie très chaleureusement Brice Hénaff et mon frère Yvan, tous deux professeurs agrégés de physique, ainsi que mon collègue Gabriel Delhay, maître de conférences à l'université Rennes 1, pour la relecture attentive et minutieuse du manuscrit, leurs suggestions et critiques, qui ont permis d'en améliorer grandement le contenu. Cet ouvrage est aussi le fruit de nombreuses concertations et discussions depuis des années au sein de la licence de physique de l'université Rennes 1 pour faire évoluer le contenu et la pédagogie de nos enseignements. Que tous mes collègues, notamment ceux de l'équipe de mécanique du portail PCGS, bien trop nombreux pour être cités individuellement, en soient remerciés. Je tiens aussi à remercier les éditions Dunod et tout particulièrement Laëtitia Hérin pour sa confiance renouvelée dans ce deuxième ouvrage, et Eléna Chryssos pour son important travail de composition, ses conseils et nos échanges toujours constructifs qui ont permis de déboucher à la forme finale de cet ouvrage. Je n'oublie pas enfin ma famille pour sa disponibilité et son éternel soutien, surtout dans les dernières semaines chargées de rédaction et de relecture.

Cinématique

Pour bien démarrer

1. Une voiture passe de 0 à $108 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ en 10 s. Son accélération moyenne est égale à :
 - ☐ a. $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.
 - ☐ b. $10,8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-2}$.
 - ☐ c. $38,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.
2. Une bille décrit un mouvement rectiligne et uniforme dans le référentiel terrestre.
 - ☐ a. Son vecteur vitesse varie au cours du temps.
 - ☐ b. Son vecteur accélération est nul.
 - ☐ c. La bille ralentit.
3. Le compteur de vitesse d'une moto qui roule en ligne droite affiche à l'instant considéré $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. On peut affirmer que :
 - ☐ a. le vecteur accélération est nul à cet instant.
 - ☐ b. jusqu'à cet instant, la vitesse moyenne est égale à $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.
 - ☐ c. le référentiel d'étude est le référentiel terrestre.
4. Dans le référentiel géocentrique, un satellite S a un mouvement circulaire et uniforme autour de la Terre de centre O .
 - ☐ a. Sa vitesse est constante et son accélération est nulle.
 - ☐ b. Son vecteur vitesse est toujours perpendiculaire à la direction OS .
 - ☐ c. Son vecteur accélération est toujours radial et centripète.

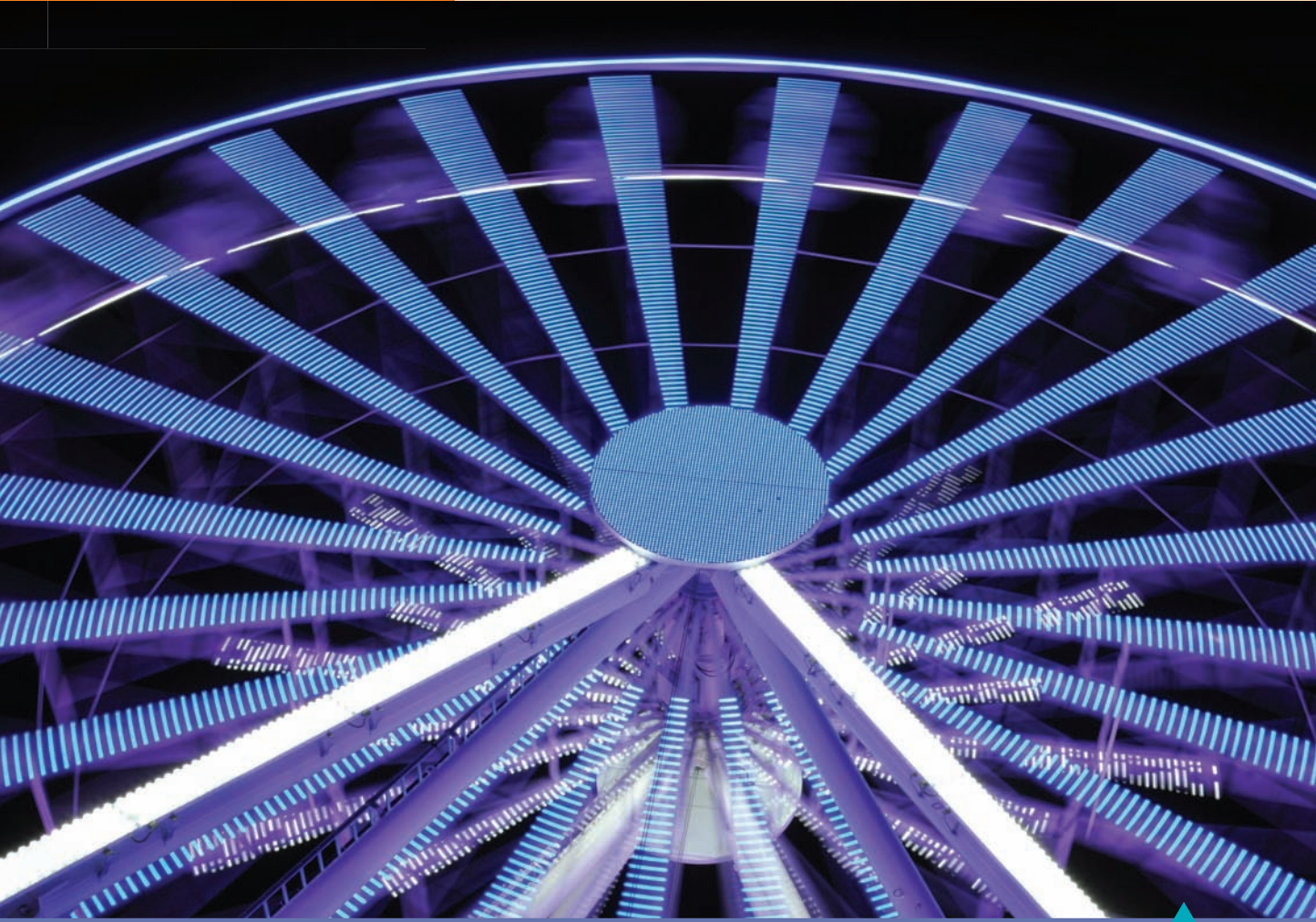
Réponses page 183

Objectifs

- Connaître les systèmes de coordonnées cartésiennes et cylindriques.
- Définir les vecteurs position, vitesse et accélération d'un point matériel.
- Établir et exploiter les expressions des composantes des vecteurs position, vitesse et accélération en coordonnées cartésiennes et cylindriques.
- Connaître en coordonnées polaires les expressions des composantes du vecteur vitesse et du vecteur accélération d'un point matériel en mouvement circulaire uniforme.
- Reconnaître pour un solide parfait un mouvement de translation et un mouvement de rotation autour d'un axe fixe dans le référentiel d'étude.

CHAPITRE

1



Cette photo de la grande roue de la place de l'Étoile, à Paris, prise avec un long temps de pose, met en évidence la trajectoire circulaire décrite par chacune des lampes habillant la roue, vue par des observateurs au sol. La description de leur mouvement en termes de position, vitesse et accélération, sans chercher à en interpréter la cause, constitue l'objet de la cinématique.

1 Cadre spatio-temporel de la mécanique classique

1.1 Du solide au point matériel

La mécanique classique s'intéresse à l'étude du mouvement d'objets matériels macroscopiques que nous appellerons **solides**. Les solides considérés seront supposés parfaits, c'est-à-dire indéformables dans le sens où la distance entre deux points quelconques du solide reste constante au cours du temps. Cette idéalisation consiste à négliger l'énergie de déformation du solide devant l'énergie de son mouvement (rotation et translation).

Décrire le mouvement d'un solide par rapport à un autre pris comme référence nécessite la connaissance de ses six **degrés de liberté**, six grandeurs indépendantes caractérisant la position et l'orientation du solide dans l'espace. Cependant, si la rotation du solide impacte peu son mouvement, donc si son énergie cinétique de rotation est négligeable devant son énergie cinétique de translation, il est alors suffisant d'assimiler le solide à son centre d'inertie ou centre de masse en lui affectant toute la masse du solide (voir chapitre 3). On dit que le solide est réduit à un **point matériel** et son mouvement est entièrement défini par la donnée de trois paramètres que sont ses coordonnées d'espace. Cette idéalisation est souvent d'autant plus valide que la taille typique du solide est petite devant la distance caractéristique d'observation du mouvement.

On se limitera pour l'essentiel à l'étude du mouvement d'un point matériel, noté M . On apportera toutefois à la fin de certains chapitres quelques éléments relatifs à l'étude de mouvements simples de solides.

1.2 Le temps

Familier, le temps n'en demeure pas moins un concept bien difficile à définir. Disons qu'il permet d'ordonner quantitativement les événements, donc d'établir leur chronologie. Le temps est orienté, donc irréversible. C'est ce qu'on appelle le **cours du temps**, rendant impossible tout retour à un événement passé. Une telle contrainte résulte du **principe de causalité**, qui impose une chronologie absolue aux événements qui sont causalement reliés les uns aux autres.

Le cours du temps produit donc de la durée, grandeur mesurant l'intervalle de temps entre deux événements. En choisissant comme origine du temps le premier événement qui apparaît au cours du temps (on parle d'instant initial), la mesure de la durée qui sépare cet événement du second s'effectue avec une **horloge**. Une horloge est un système qui fonctionne sur la reproductibilité périodique d'un phénomène physique. Le choix d'une horloge de référence permet alors de définir une unité. Dans le Système international d'unités (SI), la **seconde**