

Joseph KANE • Morton STERNHEIM



Physique

Traduit par

Michel Delmelle, Roger Evrard, Jean Schmit
Université de Liège

Jean-Pol Vigneron
Facultés universitaires Notre-Dame-de-la-Paix, Namur

4^e édition revue par
Philippe GHOSEZ
Maryse HOEBEKE
Gabriel LLABRÉS

DUNOD

Cette 4^e édition corrigée a été réalisée par Philippe Ghosez, Maryse Hoebeke et Gabriel Llabrés, avec l'autorisation expresse de John Wiley and Sons, Inc.

All rights Reserved. Authorized translation from the English Language edition published by John Wiley and Sons, Inc.

La 2^e édition de cet ouvrage a été publiée aux États-Unis par John Wiley and Sons, Inc., New York, sous le titre *Physics, Second Edition* (© 1978, 1984 by John Wiley and Sons, Inc.) et sa traduction française par InterÉditions en 1986.

Illustration de couverture : © Istock

Partie 1 © yanlev - Fotolia ; Partie 2 © V & P Photo Studio Fotolia ;
Partie 3 © Chris - Fotolia ; Partie 4 © the_light writer - Fotolia ;
Partie 5 © high waystarz - Fotolia ; Partie 6 © foto_images - Fotolia ;
Partie 8 © Extensia - Fotolia ; Partie 9 © Delphotostock - Fotolia

À ma famille. JK

À ma femme, Helen et à mes enfants Laura, Amy et Jeffrey. MS

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. 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		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. 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).
--	---	--

© Dunod, 2004, 2018 pour la 4^e édition
11, rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com
ISBN 978-2-10-078556-8

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^e et 3^e 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 aux 3^e et 4^e éditions

XI

Avant-propos de la 2^e édition

XII

Prologue : La physique et l'étudiant en sciences

XV

PARTIE 1 LES LOIS GÉNÉRALES DU MOUVEMENT

CHAPITRE 1

LE MOUVEMENT RECTILIGNE

3

- 1.1 Mesures, étalons, unités et erreurs 4
- 1.2 Le déplacement ; la vitesse moyenne 7
- 1.3 La vitesse instantanée 10
- 1.4 L'accélération 11
- 1.5 Mouvement rectiligne
uniformément accéléré 12
- 1.6 Accélération de la pesanteur et objets
en chute libre 15

GALILÉE

- 1.7 Les modèles en physique 18

Pour en savoir plus...

- 1.8 Le saut en hauteur 18

Réviser

21

S'entraîner

22

CHAPITRE 2

LE MOUVEMENT À DEUX DIMENSIONS

30

- 2.1 Introduction aux vecteurs 31
- 2.2 La vitesse à deux dimensions 34
- 2.3 L'accélération à deux dimensions 35
- 2.4 Détermination du mouvement
d'un objet 36
- 2.5 Les projectiles 36
- 2.6 Sauts horizontaux 40

Réviser

42

S'entraîner

44

CHAPITRE 3

LES LOIS DE NEWTON

51

- 3.1 Force, poids et masse gravitationnelle 52
- 3.2 La masse volumique 53
- 3.3 La première loi de Newton 53
- 3.4 L'équilibre 54
- 3.5 La troisième loi de Newton 55
- 3.6 La deuxième loi de Newton 56
- 3.7 Signification des lois de Newton 57
- 3.8 Quelques exemples des lois de Newton 57

SIR ISAAC NEWTON

59

- 3.9 Les forces de gravitation 62
- 3.10 Le poids 63
- 3.11 Le poids effectif 64
- 3.12 Le frottement 65

Réviser

70

S'entraîner

72

CHAPITRE 4

LA STATIQUE

81

- 4.1 Les moments de forces 82
- 4.2 Le centre de gravité 88
- 4.3 Équilibre et stabilité 90
- 4.4 Les leviers avantage mécanique 91
- 4.5 Les muscles 92
- 4.6 Les leviers du corps 92
- 4.7 Les mâchoires des animaux 94
- 4.8 Le centre de gravité des personnes 95
- 4.9 Systèmes de poulies 97

Réviser

99

S'entraîner

102

CHAPITRE 5

LE MOUVEMENT CIRCULAIRE

112

- 5.1 L'accélération centripète 113
- 5.2 Exemples de mouvement circulaire 116
- 5.3 Variables angulaires 118
- 5.4 Moment des forces, accélération
angulaire et moment d'inertie 121

Pour en savoir plus...

125

- 5.5 Charges électriques ; forces fondamentales 125

5.6	La loi de Coulomb	127
	CHARLES AUGUSTIN DE COULOMB	128
	HENRY CAVENDISH	128
5.7	Satellites et marées	129
5.8	Effets physiologiques de l'accélération	131
5.9	Perception sensorielle du mouvement angulaire	133
5.10	Système de référence en rotation et force de Coriolis	134
Réviser		137
S'entraîner		139

PARTIE 2 COMPLÉMENTS DE MÉCANIQUE

CHAPITRE 6

TRAVAIL, ÉNERGIE ET PUISSANCE		149
6.1	Le travail	151
6.2	L'énergie cinétique	153
6.3	Énergie potentielle et forces conservatives	154
6.4	Les forces dissipatives	157
6.5	Principe de conservation	158
6.6	Résolution de problèmes a partir des notions de travail et d'énergie	160
6.7	Énergie potentielle gravitationnelle	162
6.8	La puissance	164
6.9	Travail et énergie dans un mouvement de rotation	165
Pour en savoir plus...		166
6.10	Les sauts ; les lois d'échelle en physiologie	166
6.11	La course à pied	168
Réviser		170
S'entraîner		173

CHAPITRE 7

QUANTITÉ DE MOUVEMENT ET MOMENT CINÉTIQUE		182
7.1	Impulsion et quantité de mouvement	183
7.2	Conservation de la quantité de mouvement	184
7.3	Mouvement du centre de masse	187
7.4	Collisions élastiques et inélastiques	189
7.5	Moment cinétique d'un corps solide	192
7.6	Moment cinétique d'une particule	195
Pour en savoir plus...		196
7.7	La quantité de mouvement dans les exercices sportifs	196
7.8	La toupie	197

7.9	Le gyroscope	199
7.10	Précession des équinoxes	200
Réviser		201
S'entraîner		203

CHAPITRE 8

PROPRIÉTÉS ÉLASTIQUES DES MATÉRIAUX		212
8.1	Les solides	213
8.2	Considérations générales sur les efforts et les déformations	213
8.3	Le module de Young	215
8.4	Résistance à la flexion	216
8.5	Résistance au flambage ; éléments structurels dans la nature	220
8.6	Cisaillement et torsion	221
8.7	Structure et fonction	224
8.8	Obtention de la relation $I_{cr} = cr^{2/3}$	226
Réviser		227
S'entraîner		228

CHAPITRE 9

LE MOUVEMENT VIBRATOIRE		234
9.1	Le mouvement harmonique simple : cas du système masse-ressort	235
9.2	Le pendule composé	238
9.3	L'énergie dans le mouvement harmonique simple	240
9.4	Oscillations amorties	242
9.5	Oscillations forcées et résonance	243
Pour en savoir plus...		246
9.6	Application en biologie des oscillations amorties	246
9.7	Les effets des vibrations sur les personnes	247
9.8	Combinaison de mouvements harmoniques	249
Réviser		251
S'entraîner		253

PARTIE 3 CHALEUR

CHAPITRE 10

TEMPÉRATURE, COMPORTEMENT DES GAZ		263
10.1	Échelles de température	264
10.2	Masses moléculaires	264

10.3	Pression	265
10.4	L'équation d'état des gaz parfaits	266
10.5	Mélanges de gaz	268
10.6	Température et énergies moléculaires	269
10.7	Diffusion	272
10.8	Solutions diluées ; pression osmotique	273
Réviser		276
S'entraîner		278

CHAPITRE 11

THERMODYNAMIQUE	282
11.1 Travail mécanique	284
11.2 Le premier principe de la thermodynamique	285
11.3 Le second principe de la thermodynamique	287
JULIUS ROBERT MAYER	288
HERMANN VON HELMHOLTZ	288
JAMES PRESCOTT JOULE	288

11.4	Le théorème de Carnot et la conversion de l'énergie	292
11.5	Conséquences du théorème de Carnot	294
11.6	Réfrigérateurs et pompes à chaleur	295
	Pour en savoir plus...	297
11.7	Métabolisme humain	297
	Réviser	300
	S'entraîner	300

CHAPITRE 12

PROPRIÉTÉS THERMIQUES DE LA MATIÈRE	307
12.1 La dilatation thermique	308
12.2 Chaleur spécifique	311
12.3 Changements de phase	314
12.4 La conduction de la chaleur	316
12.5 Transfert de chaleur par convection	318
12.6 Le rayonnement	320
Pour en savoir plus...	324
12.7 La régulation de température chez les animaux à sang chaud	324
Réviser	326
S'entraîner	327

PARTIE 4 LES FLUIDES

CHAPITRE 13

LA MÉCANIQUE DES FLUIDES NON VISQUEUX	337
13.1 Le principe d'Archimède	339

ARCHIMÈDE	340
13.2 L'équation de continuité l'écoulement laminaire	341
13.3 Le théorème de Bernoulli	342
13.4 Conséquences statiques du théorème de Bernoulli	343
13.5 Le rôle de la gravitation dans la circulation sanguine	345
13.6 Mesure de la tension artérielle au sphygmomanomètre	346
13.7 Conséquences dynamiques du théorème de Bernoulli	347
13.8 Les débitmètres	347
13.9 Le vol des animaux et des avions	350
Réviser	354
S'entraîner	355

CHAPITRE 14

ÉCOULEMENT DES FLUIDES VISQUEUX		361
14.1	Viscosité dans le cas d'un écoulement laminaire	362
14.2	Écoulement laminaire dans un tube ; loi de Poiseuille	363
14.3	Écoulement turbulent	365
14.4	L'écoulement du sang dans le système circulatoire	367
Pour en savoir plus...		370
14.5	Forces de résistance visqueuse	370
14.6	Résistance des fluides à « haute vitesse »	372
14.7	Centrifugation	373
Réviser		375
S'entraîner		377

CHAPITRE 15

FORCE DE COHÉSION DANS LES LIQUIDES	383
15.1 Tension superficielle	384
15.2 Angles de contact et capillarité	385
15.3 Loi de Laplace	386
15.4 Les molécules tensio-actives	388
15.5 Le cœur en tant que pompe	389
15.6 L'ascension de la sève dans les arbres ; pressions négatives	390
Réviser	391
S'entraîner	392

PARTIE 5 ÉLECTRICITÉ ET MAGNÉTISME

CHAPITRE 16

FORCES ÉLECTRIQUES, CHAMPS ET POTENTIELS

401

16.1	Forces électriques	402
16.2	Le champ électrique	402
16.3	Le champ électrique dû à des distributions de charges	405
16.4	Le potentiel électrique	408
16.5	Surfaces équipotentiels	411
16.6	Dipôles électriques	412
16.7	Capacité	414
16.8	Effets des diélectriques	415
16.9	Énergie emmagasinée dans un condensateur	417
16.10	L'oscilloscope	417

Réviser

419

S'entraîner

420

CHAPITRE 17

COURANTS CONTINUS

427

17.1	Courant électrique	428
17.2	La résistance	429
17.3	Théorie atomique de la résistance	430
17.4	Sources d'énergie dans les circuits électriques	432
17.5	La puissance des circuits électriques	435
17.6	Résistances en série et en parallèle ; les règles de Kirchhoff	436
17.7	Les règles de Kirchhoff dans des circuits complexes	438
17.8	Voltmètres et ampèremètres	439
17.9	Circuits contenant une résistance et un condensateur	441

Pour en savoir plus...

443

17.10	Sécurité électrique	443
17.11	Applications des mesures de résistance	447
17.12	Électrophorèse	447

Réviser

449

S'entraîner

451

CHAPITRE 18

CONDUCTION NERVEUSE

458

18.1	La structure des cellules nerveuses	459
18.2	Propriétés électriques statiques	459
18.3	Concentrations ioniques et potentiel de repos	461

18.4	La réponse à des stimuli faibles	465
18.5	Le potentiel d'action	467
18.6	Électroencéphalographie et électrocardiographie	470

Réviser

472

S'entraîner

473

CHAPITRE 19

LE MAGNÉTISME

477

19.1	Le champ magnétique	478
19.2	La force magnétique sur une charge en mouvement	480
19.3	Débitmètres électromagnétiques	482
19.4	La force magnétique sur un fil parcouru par un courant	483
19.5	Dipôles magnétiques	484
19.6	Moteurs et galvanomètres	486
19.7	Champs magnétiques produits par des courants	487
19.8	La force entre deux fils parallèles parcourus par un courant	489
	Pour en savoir plus...	490
19.9	La mesure du rapport de la charge à la masse	490
19.10	Spectromètres de masse	491
19.11	Cyclotrons	492

Réviser

494

S'entraîner

496

CHAPITRE 20

COURANTS ET CHAMPS INDUITS

503

20.1	La loi de Faraday	504
20.2	Courants de Foucault	507
20.3	Générateurs électriques	507
20.4	Transformateurs	508
20.5	Les substances magnétiques	509
	MICHAEL FARADAY	510
20.6	Self-induction (ou auto-induction)	511
20.7	Énergie accumulée dans une self	513
20.8	Circuits RL	513
20.9	Valeurs efficaces des tensions et des courants alternatifs	514
20.10	Réactance	516
20.11	Impédance	519
20.12	Puissance en courant alternatif	521
	Pour en savoir plus...	522
20.13	Adaptation d'impédance	522
20.14	Champs induits et ondes électromagnétiques	523

Réviser

525

S'entraîner

527

PARTIE 6 LES ONDES

CHAPITRE 21

LES ONDES 537

21.1	Représentation d'un mouvement ondulatoire	538
21.2	La vitesse de propagation des ondes	541
21.3	Interférences	542
21.4	Ondes stationnaires résonnantes	543
21.5	Ondes complexes et battements	546
21.6	Énergie et quantité de mouvement transportées par les ondes	548
21.7	La polarisation des ondes transversales	548
21.8	L'effet Doppler	549
	Pour en savoir plus...	552
21.9	Débitmètre Doppler	552
21.10	Déplacement Doppler pour la lumière	552
	Réviser	553
	S'entraîner	555

CHAPITRE 22

LES ONDES SONORES 562

22.1	La nature physique et la vitesse de propagation du son	563
22.2	Ondes sonores stationnaires	565
22.3	L'intensité des ondes sonores	566
22.4	Les sources sonores	567
22.5	Les détecteurs sonores	572
22.6	La réponse auditive	573
22.7	Les ultrasons	575
	Réviser	581
	S'entraîner	582

CHAPITRE 23

PROPRIÉTÉS ONDULATOIRES DE LA LUMIÈRE 587

23.1	L'indice de réfraction	589
23.2	Le principe de Huygens	589
23.3	La réflexion	591
23.4	La réfraction	593
23.5	La réflexion totale	595
23.6	Expérience des fentes de Young	596
	THOMAS YOUNG	600
23.7	La cohérence	601
23.8	Le réseau de diffraction	602
23.9	Le phénomène de diffraction	605
23.10	La polarisation de la lumière	609

23.11	Diffraction des rayons X et structure des molécules biologiques	612
	Pour en savoir plus...	615
23.12	L'holographie	615
23.13	Les effets d'interférence dans les films minces	619
	Réviser	622
	S'entraîner	624

CHAPITRE 24

MIROIRS, LENTILLES ET INSTRUMENTS D'OPTIQUE 631

24.1	Les miroirs	632
24.2	Les lentilles	632
24.3	La formation de l'image	635
24.4	La puissance des lentilles ; les aberrations	639
24.5	La loupe	640
24.6	Le microscope optique	641
24.7	L'œil	643
	Pour en savoir plus...	646
24.8	L'appareil photographique	646
24.9	Résolution et contraste des microscopes	648
24.10	Microscopes polarisants, à interférence et à contraste de phase	649
24.11	Les défauts optiques de l'œil	651
24.12	La perception des couleurs	654
	Réviser	657
	S'entraîner	659

PARTIE 7 PHYSIQUE MODERNE

CHAPITRE 25

LA RELATIVITÉ RESTREINTE 667

25.1	Les principes fondamentaux de la relativité restreinte	669
25.2	Horloges en mouvement et dilatation du temps	669
	ALBERT EINSTEIN	671
25.3	Contraction des longueurs	672
25.4	Quantité de mouvement et énergie	673
	Pour en savoir plus...	676
25.5	Le problème des événements simultanés	676
25.6	L'addition des vitesses	679
	Réviser	680
	S'entraîner	681

CHAPITRE 26**PROPRIÉTÉS CORPUSCULAIRES DE LA LUMIÈRE : LE PHOTON****686**

26.1	L'effet photo-électrique	687
26.2	Le photon	689
26.3	Dualité onde-corpuscule	691
26.4	Photons et vision	692

Réviser	694
---------	-----

S'entraîner	696
-------------	-----

CHAPITRE 27**PROPRIÉTÉS ONDULATOIRES DE LA MATIÈRE****699**

27.1	Les échecs de la physique classique	701
27.2	L'hypothèse ondulatoire de De Broglie	703
27.3	L'atome de Bohr	706

NIELS HENRIK DAVID BOHR	708
-------------------------	-----

27.4	Le principe d'incertitude	711
------	---------------------------	-----

Réviser	714
---------	-----

S'entraîner	715
-------------	-----

PARTIE 8 ATOMES ET MOLÉCULES

CHAPITRE 28**MÉCANIQUE QUANTIQUE ET STRUCTURE ATOMIQUE****723**

28.1	Aperçu de mécanique quantique	725
28.2	Les nombres quantiques de l'atome d'hydrogène	725
28.3	Les fonctions d'onde de l'atome d'hydrogène	729
28.4	Le principe d'exclusion de Pauli	730
28.5	Structure atomique et tableau périodique	730
28.6	Émission atomique et spectres d'absorption	734

Pour en savoir plus...	734
------------------------	-----

28.7	Masers et lasers	734
------	------------------	-----

Réviser	738
---------	-----

S'entraîner	739
-------------	-----

CHAPITRE 29**LA STRUCTURE DE LA MATIÈRE****743**

29.1	La liaison ionique	744
29.2	La liaison covalente	745

LINUS CARL PAULING**747**

29.3	La liaison métallique	749
------	-----------------------	-----

29.4	Isolants et semi-conducteurs	751
------	------------------------------	-----

29.5	Les liaisons faibles	752
------	----------------------	-----

Pour en savoir plus...	754
------------------------	-----

29.6	La résonance magnétique nucléaire	754
------	-----------------------------------	-----

29.7	Le comportement d'un dipôle magnétique dans un champ magnétique	754
------	---	-----

29.8	Mesure de la fréquence de précession	757
------	--------------------------------------	-----

29.9	L'appareillage RMN	757
------	--------------------	-----

29.10	Le déplacement chimique	758
-------	-------------------------	-----

29.11	Le couplage spin-spin	761
-------	-----------------------	-----

29.12	La RMN en médecine	762
-------	--------------------	-----

Réviser	764
---------	-----

S'entraîner	765
-------------	-----

PARTIE 9 LE NOYAU ATOMIQUE

CHAPITRE 30**PHYSIQUE NUCLÉAIRE****773**

30.1	La radioactivité	775
------	------------------	-----

30.2	La demi-vie	775
------	-------------	-----

30.3	Datation en archéologie et en géologie	778
------	--	-----

30.4	Les dimensions nucléaires	780
------	---------------------------	-----

30.5	Protons et neutrons	781
------	---------------------	-----

30.6	Masses nucléaires et énergies de liaison	782
------	--	-----

30.7	Les forces nucléaires	783
------	-----------------------	-----

30.8	Niveaux d'énergie nucléaire et stabilité nucléaire	784
------	--	-----

30.9	Les désintégrations radioactives	786
------	----------------------------------	-----

ENRICO FERMI	788
--------------	-----

Pour en savoir plus...	790
------------------------	-----

30.10	La fission nucléaire	790
-------	----------------------	-----

30.11	Réacteurs et bombes à fission	792
-------	-------------------------------	-----

30.12	La fusion nucléaire	794
-------	---------------------	-----

30.13	Les quarks	795
-------	------------	-----

Réviser	797
---------	-----

S'entraîner	798
-------------	-----

CHAPITRE 31**RADIATIONS IONISANTES****804**

31.1	L'interaction des rayonnements avec la matière	805
------	--	-----

31.2	Unités de dose de rayonnement	808	B.1	Puissances et racines	836
31.3	Effets nocifs des radiations	811	B.2	La notation scientifique	836
31.4	Exposition chronique aux radiations	812	B.3	Chiffres significatifs	836
31.5	Radiations en médecine	814	B.4	Résolution des équations algébriques	838
31.6	Autres applications des radiations	818	B.5	Graphes	839
Pour en savoir plus...		819	B.6	Géométrie plane et fonctions trigonométriques	840
31.7	Détection et mesure des radiations	819	B.7	Développement en série	843
31.8	Établissement de la formule du taux de perte d'énergie	824	B.8	Dérivées	843
Réviser		825	B.9	Primitives	844
S'entraîner		826	B.10	Aires et volumes	844
			B.11	Fonction exponentielle, logarithmes	844
<i>Épilogue : La physique et le futur</i>		831	<i>Réponses</i>		849
<i>Annexe A. Tableau périodique des éléments</i>		833	<i>Tableaux</i>		869
<i>Annexe B. Rappels mathématiques</i>		835	<i>Notations</i>		871
			<i>Index</i>		873

Avant-propos aux 3^e et 4^e éditions

Cette nouvelle édition de l'ouvrage de Messieurs Kane et Sternheim reste fidèle à l'esprit des éditions précédentes : bien que principalement destinée aux étudiants en sciences de la vie et de la santé (biologie, médecine, dentisterie, pharmacie, sciences biomédicales, kinésithérapie, éducation physique, médecine vétérinaire...), elle couvre tous les domaines de la physique générale et sera donc adaptée à toute formation scientifique requérant des connaissances de base en physique (géographie, géologie, agronomie, sciences de l'environnement...). Cette nouvelle édition se veut cependant plus actuelle et plus attractive. Elle est également plus rigoureuse d'un point de vue mathématique sans être pour autant plus difficile à aborder.

Outre la réactualisation de certaines parties devenues obsolètes, le livre a été enrichi, à la fin de chaque chapitre, de dossiers pédagogiques offrant à l'étudiant une synthèse des concepts clés en lui procurant de nouveaux outils pour évaluer ses connaissances. Au-delà du résumé et des phrases à compléter de la seconde édition, nous proposons ainsi des QCM, permettant une évaluation rapide de la compréhension des différentes matières, et des problèmes résolus, amenant l'étudiant à se familiariser avec la démarche de résolution. Des problèmes plus transversaux ont également été ajoutés.

Nous avons réintroduit, tout au long de l'ouvrage, davantage de rigueur mathématique. Loin de vouloir rebuter les étudiants ne possédant qu'un faible bagage mathématique et souvent mal à l'aise face aux notions abstraites, ce choix a été motivé par deux types de considérations. D'une part, il nous a semblé important de confronter et de familiariser les étudiants, dès le début de leurs études, à la rigueur qui doit accompagner toute démarche scientifique. D'autre part, une trop grande simplification est souvent source d'erreur et de confusion. On s'aperçoit à l'usage que les notions de mathématiques élémentaires réintroduites, loin d'engendrer une complexité complémentaire, aident grandement à la compréhension et à l'assimilation de certaines matières.

Cette nouvelle édition n'aurait pu être réalisée sans l'aide de nombreuses personnes, à commencer par les étudiants dont les questions et les commentaires nous ont amenés à faire évoluer l'ouvrage. Nous remercions plusieurs générations d'assistants du collectif de Physique pour les Sciences de la Vie de l'Université de Liège et en particulier P. Clippe et N.D. Nguyen pour la révision des exercices et la relecture de certains chapitres. Nos remerciements s'adressent également à J. Delcourt et C. François, S. Demarche et A. Ortega-Millan pour leur aide et leur soutien logistique. Merci enfin à nos conjoints – Sophie, Serge et Anne – et à nos enfants – Arthur, Marie, Vincent, Simon et Jérôme – pour leur patience et leurs encouragements tout au long de la réactualisation de l'ouvrage.

Philippe GHOSEZ

Maryse HOEBEKE

Gabriel LLABRÉS

Avant-propos de la 2^e édition

Ce cours de physique s'adresse à des étudiants d'origines diverses. Il s'appuie sur l'expérience d'un enseignement que nous avons dispensé à une majorité d'étudiants spécialisés dans différents domaines des sciences de la vie – zoologie, études pré médicales, botanique, technologie médicale, sylviculture et éducation physique – accompagnés de quelques étudiants spécialisés dans d'autres domaines extérieurs à la biologie. La plupart étaient des étudiants de seconde année qui avaient suivi un enseignement de premier cycle en chimie, mathématiques et biologie, mais on comptait aussi parmi eux des étudiants de première année et quelques étudiants diplômés. En général, ils n'avaient pas étudié la physique au lycée. Beaucoup possédaient des notions de calcul différentiel, mais doutaient généralement de leur capacité à utiliser sérieusement cet outil mathématique.

Ce livre diffère par plusieurs aspects des manuels de physique traditionnels destinés aux scientifiques. En premier lieu, le choix des domaines de la physique de base à traiter ou à développer particulièrement a été déterminé en fonction de l'intérêt et des besoins des étudiants en sciences de la vie. C'est pourquoi il a été nécessaire d'inclure des domaines rarement traités ailleurs comme l'optique géométrique, la mécanique des fluides et l'acoustique. D'autre part, certaines parties de la physique contemporaine, comme la physique des particules et l'astrophysique, ont été réduites au minimum en raison de leur faible impact direct sur la biologie.

La seconde différence importante est que de nombreux exemples ont été empruntés aux systèmes biologiques, ce qui contraste avec l'utilisation habituelle d'exemples tirés de la technologie. Ainsi, les problèmes de corps rigides s'inspirent à plusieurs reprises de la biomécanique ; les exemples de résistance et de capacité sont empruntés à la conduction nerveuse ; l'entretien de la température du corps sert d'illustration aux phénomènes de transport thermique et de chaleur latente, et ainsi de suite. L'instrumentation utilisée dans le domaine biomédical est discutée à chaque fois qu'elle permet d'illustrer un principe physique.

La troisième caractéristique de ce livre, peut-être la plus significative et originale, est qu'il contient des chapitres et des paragraphes entièrement consacrés à l'application détaillée de la physique aux systèmes biologiques. Ces discussions motivent l'étudiant à apprendre la physique en lui démontrant combien son usage est pertinent dans les sciences de la vie, tout en mesurant son degré de compréhension des principes physiques impliqués. Elles montrent aussi l'unité de la science en faisant appel à des concepts empruntés à la physique, à la biologie et à la chimie.

Cependant, aucune connaissance préalable particulière en biologie ou en chimie n'est requise.

Chaque chapitre comporte un grand nombre d'exercices. Regroupés par thèmes, ces derniers permettent à l'étudiant de tester sa compréhension fondamentale de la matière et d'acquérir plus d'assurance. Le livre contient également des problèmes, plus généraux.

Bien que nous ayons inclus beaucoup de matières que l'on ne trouve pas généralement dans les manuels classiques, nous avons adopté une séquence et un style assez conventionnels dans la présentation de la physique de base. La raison en est que la disposition traditionnelle semble être la plus efficace, et qu'elle permet à l'enseignant de choisir et d'organiser les matières de façon à

s'adapter aux exigences et aux préférences individuelles. Bien que la mécanique doive être traitée en premier et la physique moderne en dernier, les matières intermédiaires (chaleur, fluides, électricité et magnétisme, mouvements ondulatoires) peuvent être interverties sans causer de problème majeur. Cela est vrai même si nous insistons sur l'unité des concepts physiques et que nous soulignons les interconnexions chaque fois que l'occasion s'en présente.

Tout au long du livre, nous utilisons le minimum de formalisme mathématique compatible avec un traitement honnête et précis des sujets abordés. Cela signifie que nous nous servons de l'algèbre et de la géométrie assez librement. Compte tenu du niveau relativement faible de certains étudiants dans ces domaines lorsqu'ils commencent à étudier la physique, nous progressons assez lentement dans les premiers chapitres, et un rappel de mathématiques est proposé dans l'annexe B. La dérivation est introduite au chapitre 1 et utilisée par la suite dans les définitions. Les quelques démonstrations qui font appel au calcul différentiel sont placées en fin de chapitre de façon à ne pas interrompre le texte. L'intégration est totalement évitée ; à la place, nous adoptons une approche par estimation, puis nous vérifions par dérivation la solution au problème, comme par exemple dans le cas de la loi de désintégration exponentielle d'un radioélément. Aucun exemple, exercice ou problème n'exige l'utilisation du calcul différentiel.

Un aspect important de l'apprentissage de la physique est le développement de certains modes de pensée. En conséquence, nous insistons sur l'usage de certaines méthodes : modélisation simple des systèmes complexes, approximations mathématiques et analyse dimensionnelle. Celles-ci sont surtout manifestes dans les applications biologiques, mais elles sont présentes dans l'ensemble du livre. Nous soulignons également que la physique est une science expérimentale, pas une discipline intellectuelle abstraite. Ses implications se rencontrent constamment dans l'expérience de la vie quotidienne comme dans la pratique courante d'autres sciences.

Les unités posent toujours problème dans un manuel d'introduction. Nous avons accordé la prééminence aux unités S.I., mais nous avons parfois utilisé le système c.g.s. et les unités britanniques pour familiariser le lecteur avec des quantités diverses ou pour nous conformer aux conventions en usage dans divers domaines d'application. Comme pour la première édition, du fait que nous avons repris tous les sujets normalement couverts dans un cours de physique pour étudiants en sciences naturelles, et que nous y avons encore ajouté des matières moins traditionnelles, cet ouvrage est trop volumineux pour servir de référence à un cours normal de deux semestres ou de trois trimestres. Il comporte maintenant 31 chapitres, qui sont groupés en neuf parties. Deux chapitres traitent de sujets que l'on ne trouve habituellement pas dans les manuels d'introduction à la physique : le chapitre 18, conduction nerveuse, et le chapitre 31, radiations ionisantes. On peut omettre ces chapitres ou les voir superficiellement sans rupture de continuité. Il en va de même d'autres chapitres, plus traditionnels, comme le chapitre 8, propriétés élastiques des matériaux, le chapitre 25, la relativité restreinte, et le chapitre 29, la structure de la matière. De plus, en majorité, les chapitres se terminent par un ou plusieurs paragraphes supplémentaires traitant soit d'applications biologiques, soit de sujets plus traditionnels d'importance secondaire. Cette disposition permet à l'enseignant de mieux délimiter la matière qu'il doit couvrir et de choisir les sujets sur lesquels il veut insister. Elle aide aussi l'étudiant à faire la distinction entre les principes de base de la physique et les thèmes plus marginaux.

Dans cette version de notre livre, nous avons introduit ou développé toute une série de moyens techniques destinés à en faciliter l'étude. Nous avons étendu les résumés des fins de chapitres et nous avons inséré en moyenne une douzaine de questions simples de révision par chapitre. Nous avons ajouté un grand nombre de nouveaux exercices et problèmes afin d'étendre le registre de leur niveau de difficulté et de diversifier les types d'applications. On arrive maintenant à plus de 2 300 questions de révision, exercices et problèmes.

Ce livre n'aurait jamais pu être réalisé sans l'aide d'un grand nombre de personnes. Nous sommes le plus redevables aux nombreux étudiants qui nous ont aidés de multiples manières à apprendre ce que devaient être un cours et un manuel de physique destinés aux biologistes, et qui ont souffert d'utiliser les toutes premières

versions de ce texte en tant que manuel. Norman C. Ford a participé aux premières étapes de la conception et de la rédaction de cet ouvrage, mais a été forcé de se retirer à cause d'autres engagements. Un collègue, Stanley S. Hertzbach, a enseigné à partir d'une première version et a exprimé un avis très utile. Nous avons aussi reçu bon nombre de conseils fructueux de la part de plusieurs critiques : Rubin Landau, Margaret E. McCarthy, Arnold Pickar, Harvey Picker, Arnold Strassenberg, John Weir, Robert Williamson et Steve Woods. Au fil des ans, plusieurs étudiants ont apporté de précieuses suggestions après avoir lu différentes parties du manuscrit ou ont contribué à la résolution des exercices et des problèmes. Ce sont : James Ledwell, David Long, Caroline Markey, Robert Meyer, Francesc Roig, Ernest Seglie, Thomas Slavkovsky, David Vetter, Jonathan Wainer et J.C. Wang. Hajime Sakai, James F. Walker et Kandua S.R. Sastry ont signalé des améliorations possibles particulièrement profitables. J.G. Steele et G.L. Russel ont servi de consultants pour les unités S.I. J.N. Dodd a fourni des matériaux qui ont été très utiles à la préparation du paragraphe sur la vision des couleurs. Margaret Sibar a attiré notre attention sur un aperçu historique riche d'intérêt.

Le manuscrit a été tapé par les soins de quatre dactylographes compétentes et indulgentes. La plus grande partie du livre a été tapée par Kathleen Ryan et le reste par Lilian Camus, Linda Lisnerski et Doris Atkins. Helen Sternheim a collaboré à divers aspects de la préparation du manuscrit et a prodigué conseils et encouragements.

JOSEPH KANE
MORTON STERNHEIM

Prologue :

La physique et

l'étudiant en sciences

« Pourquoi dois-je donc étudier la physique ? » Exprimée parfois avec des intonations qui parcourent toute la gamme des sentiments depuis l'angoisse jusqu'à la colère, c'est une des questions les plus souvent entendues par les professeurs de physique. Il paraît donc légitime de commencer ce livre par une tentative de réponse.

Une des raisons pour lesquelles la question est si souvent posée est que beaucoup de personnes qui n'ont pas étudié la physique – ainsi que certaines qui l'ont étudiée – ne perçoivent pas clairement ce qu'est véritablement cette science. Les dictionnaires ne sont pas d'un grand secours. Une définition typique d'un petit dictionnaire anglais dit que la physique est la branche de la science qui traite de la matière, de l'énergie et de leurs interactions¹. C'est assez vague et général pour inclure ce que l'on considère généralement comme la chimie ; en tout cas, cette définition ne donne aucun sentiment réel sur la question concernée. Les articles de plus gros dictionnaires prolongent généralement la définition en notant que la physique comporte des sous-domaines comme la mécanique, la thermodynamique, l'électricité, etc. Ils n'apportent aucune indication qui explique pourquoi tel domaine de la science et non tel autre en fait partie.

Une meilleure approche de la question est de s'interroger sur l'objet de préoccupation des physiciens. Ces derniers essayent de comprendre les règles fondamentales ou *lois* qui régissent le fonctionnement du monde dans lequel nous vivons. Comme leurs activités et leurs centres d'intérêt évoluent au cours du temps, la science de base appelée physique change aussi avec le temps. Beaucoup de sous-domaines contemporains de la physique parmi les plus actifs étaient inimaginables il y a une ou deux générations. Par ailleurs, certaines parties de ce que nous considérons aujourd'hui comme la chimie ou la technique étaient autrefois considérées comme de la physique. Cela vient du fait que parfois la physique abandonne progressivement un domaine une fois que les principes de base sont connus, laissant le développement ultérieur et les applications pratiques à d'autres.

Le fait que la physique traite des règles fondamentales qui gouvernent la marche du monde explique pourquoi des personnes aux préoccupations diverses peuvent trouver de l'intérêt et de l'utilité dans l'étude de cette science. Par exemple, un historien qui veut comprendre les origines de la société contemporaine trouvera matière à réflexion dans l'histoire du développement de la physique et de ses relations avec les autres activités humaines. De la même façon, un philosophe qui s'intéresse aux concepts d'espace et de temps tirera grand profit de la compréhension des progrès révolutionnaires de la physique au ^{xx}e siècle. Cependant, puisque nous avons principalement écrit ce livre pour les étudiants en sciences de la vie, nous ne nous sommes pas concentrés sur les

1. La définition des dictionnaires français est typiquement : Science qui a pour objet l'étude des propriétés des corps et de leurs changements d'état et de mouvement sans modification de leur nature. (N.d.T.)

aspects historiques ou philosophiques de la physique. En revanche, dans chaque chapitre, nous avons essayé de clarifier les relations entre la physique et les sciences de la vie.

C'est probablement dans l'instrumentation que l'impact de la physique sur la biologie et la médecine est le plus évident. Une connaissance de la physique aide au bon usage de toute une gamme d'appareils : du microscope optique à la centrifugeuse ; du microscope électronique aux systèmes élaborés de détection du rayonnement de la médecine nucléaire. La physique fait aussi irruption dans la biologie par des voies plus fondamentales. Les lois physiques qui régissent le comportement des molécules, des atomes et des noyaux atomiques sont à la base de toute la chimie et de la biochimie. La physiologie offre de nombreux exemples de processus et de principes physiques : la diffusion au sein des cellules, la régulation de la température du corps, le mouvement des fluides dans le système circulatoire et les signaux électriques dans les fibres nerveuses n'en sont qu'un faible échantillon. En anatomie comparée, la physique associée à un trait anatomique aide souvent à clarifier le processus évolutionnaire en jeu. Les activités athlétiques, de la course au karaté en passant par le saut, peuvent être étudiées et parfois optimisées à l'aide des principes physiques. À mesure que nous développons et illustrons les principes de base de la physique, nous discutons de toutes ces applications biologiques et de beaucoup d'autres.

Quelques remarques à propos de la manière dont on étudie la physique peuvent être utiles. Plus que toute autre science, la physique est une discipline logique et déductive. À la base de n'importe lequel de ses sousdomaines, on ne trouve que quelques concepts fondamentaux ou lois dérivés de mesures expérimentales. Une fois que l'on a maîtrisé ces idées de base, les applications en découlent généralement de manière directe, même si les détails peuvent parfois devenir compliqués. Par conséquent, il est important de concentrer son attention sur les principes de base en évitant de mémoriser une masse de faits et de formules.

La plupart des lois de la physique peuvent s'exprimer de manière assez concise sous la forme d'équations mathématiques. C'est un grand avantage, car une quantité considérable d'information est implicitement contenue dans une seule équation. Cependant, cela veut dire aussi que toute tentative sérieuse d'apprendre ou d'appliquer la physique suppose que l'on consente à utiliser un certain appareil mathématique. L'algèbre du lycée et un peu de géométrie suffisent pour l'ensemble des sujets couverts par ce livre, qui requiert toutefois un niveau de pratique raisonnable. Un étudiant dont les connaissances en mathématiques sont rouillées pourra se reporter aux rappels mathématiques de l'annexe B. La technique de la dérivation est introduite dans le premier chapitre. Cependant, son emploi est généralement limité à quelques démonstrations ou développements.

Pour résumer notre propos, nous croyons que l'étudiant en sciences de la vie tirera un double avantage l'étude de la physique. Il acquerra une compréhension des lois fondamentales qui régissent l'Univers, de l'échelle subatomique à l'échelle cosmique, et beaucoup de ce qu'il apprendra lui sera également utile dans son activité de biologiste. L'étude de la physique en tant que science fondamentale n'est pas des plus facile, mais nous pensons qu'elle est profitable, en particulier pour l'étudiant qui envisage une formation approfondie dans les sciences connexes. Nous espérons que tous ceux qui utiliseront ce livre en profiteront.

J. K.

M. S.



Partie 1

Les lois générales du mouvement

Chapitre 1	Le mouvement rectiligne	3
Chapitre 2	Le mouvement à deux dimensions	30
Chapitre 3	Les lois de Newton	51
Chapitre 4	La statique	81
Chapitre 5	Le mouvement circulaire	112

Le mouvement rectiligne

1

Mots-clefs

Accélération de la pesanteur • Accélération instantanée • Accélération moyenne • Chiffres significatifs • Déplacement • Erreurs accidentelles • Erreurs systématiques • Formules du mouvement uniformément accéléré • Les dimensions • Les étalons • Les unités • Modèle mathématique • Mouvement uniforme • Mouvement accéléré • Mouvement de translation • Pente • S.I. • Système cgs • Système mks • Vitesse instantanée • Vitesse moyenne

Introduction

Le mouvement est une conséquence fondamentale et évidente d'une interaction physique : une brique tombe, une caisse de résonance vibre, une aiguille de boussole s'oriente dans un champ magnétique, une aiguille d'appareil de mesure se déplace le long d'une échelle graduée, un noyau radioactif émet une particule bêta. Notre compréhension de la nature découle, en grande partie, de l'observation des mouvements et de nos réflexions pour en interpréter les causes. Dès lors, nous commencerons notre étude de la physique par le développement des concepts nécessaires à une discussion quantitative du mouvement. Nous débuterons, dans ce chapitre, par l'étude du mouvement d'un objet qui se déplace en ligne droite.

La physique, comme beaucoup d'autres sciences, est basée essentiellement sur des mesures quantitatives. Ces mesures doivent être corrélées ou interprétées d'une manière ou d'une autre. Souvent, les résultats expérimentaux sont comparés à des prévisions théoriques. Dans la mesure où la théorie et l'expérience sont en accord, nous disons que nous comprenons le phénomène en cause. Une discussion quantitative du mouvement requiert des mesures de temps et des mesures d'espaces parcourus : nous devons donc considérer d'abord les *grandeurs étalons*, les *unités* et les *erreurs* qui sont associées à des mesures physiques.

1.1 Mesures, étalons, unités et erreurs

On effectue des mesures quantitatives de grandeurs physiques par comparaison avec des grandeurs qui sont prises comme références et qui constituent des grandeurs étalons. Par exemple, si vous dites qu'un cours a duré 53 minutes, cela signifie que la leçon s'est poursuivie pendant un temps qui correspond à un nombre déterminé de tic-tac de l'horloge. Ici, la quantité mesurée a la *dimension* d'un temps. L'*unité* de mesure est la minute et l'horloge est l'*étalon*. Il s'agit d'un *étalon secondaire* puisque la minute n'est pas définie par les propriétés de cette horloge particulière. Les appareils de mesure sont calibrés soit directement, soit indirectement par rapport à des *étalons primaires* de longueur, de temps et de masse reconnus par la communauté scientifique internationale.

Ces étalons primaires sont redéfinis, de temps à autre, au fur et à mesure que les mesures deviennent plus précises. Par exemple, l'unité de longueur – le mètre – a été définie en 1889 comme étant la longueur d'une barre particulière de platine iridié. Cette barre a été conservée dans des conditions bien précises. Cet étalon a cependant été abandonné en 1960 parce que sa préservation et sa copie n'étaient pas pratiques et pouvaient entraîner des inexactitudes. Le mètre a alors été défini à partir de la longueur d'onde de la lumière rouge que les atomes de krypton 86 émettent lorsqu'ils sont placés dans une décharge électrique. Il a été décidé en 1983 de redéfinir le mètre comme la distance parcourue par la lumière dans le vide pendant un intervalle de temps de $1/299\,792\,458$ s. Cette définition est toujours valide.

Ce n'est pas par hasard que des étalons ont été choisis pour la longueur, le temps et la masse. Toutes les grandeurs mécaniques peuvent en effet s'exprimer sous forme d'une combinaison de ces trois dimensions fondamentales que nous représenterons par les lettres L , T , et m . Par exemple, la vitesse correspond à la distance parcourue au cours d'un temps écoulé : ses dimensions sont donc L/T .

Les systèmes d'unités

Il y a longtemps que les *unités métriques* sont utilisées dans la vie quotidienne, sauf dans les pays anglo-saxons où les *unités anglaises* furent longtemps en usage. Les pays du Commonwealth ont récemment décidé d'adopter le système métrique et les États-Unis ont également commencé cette lente et complexe reconversion. Pour les travaux scientifiques, les unités métriques sont mondialement reconnues. Dans ce livre, nous utiliserons uniquement

l'ensemble des unités métriques acceptées internationalement et qui constitue le *Système International* (S.I.). Le *mètre*, le *kilogramme* et la *seconde* sont respectivement les unités fondamentales de longueur, de masse et de temps. On trouvera, dans des livres plus anciens, des références à une version antérieure de ce système d'unités qui était appelé le *système d'unités m.k.s.* Les textes plus vieux encore utilisaient parfois les *unités c.g.s.*, ce système étant basé sur le *centimètre*, le *gramme* et la *seconde* : 1 centimètre vaut 0,01 mètre et 1 gramme, 0,001 kilogramme. Le centimètre et le gramme sont des sous-multiples acceptables du Système International d'unités. Par contre, beaucoup d'autres unités c.g.s. sont maintenant inusitées. Dans ce livre, nous mentionnerons, au passage, quelques unités c.g.s. que l'on rencontre encore quelquefois.



Figure 1.1 Tunnel du LHC (grand collisionneurs de Hadrons) avec tube contenant les électroaimants supra conducteurs. Cern, Genève. © Julian Herzog.

Nous montrerons également comment convertir les unités du Système International en unités anglaises de longueur (le pied, le yard et le mile) et en unité de force (la livre).

Les tableaux 1.1 et 1.2 donnent en unités du S.I. les longueurs de divers objets et les intervalles de temps associés à différents phénomènes. Les nombres apparaissent sous forme de puissances de 10, c'est-à-dire en « notation scientifique ». Ce type de notation est révisé dans l'annexe B2. De nombreuses valeurs des tableaux sont soit extrêmement grandes, soit extrêmement petites. Pour cette raison, on utilise fréquemment des multiples ou des sous-multiples des unités du S.I. qui sont des puissances de dix de ces unités. Pour désigner ces multiples ou sous multiples, on emploie différents

Noyau atomique	10^{-15}
Diamètre d'un atome de sodium	10^{-11}
Longueur d'une liaison C-C	$1,5 \times 10^{-10}$
Diamètre de l'ADN	2×10^{-9}
Épaisseur de microfilaments	4×10^{-9}
Hémoglobine	7×10^{-9}
Membrane cellulaire	10^{-8}
Diamètre d'un petit virus	2×10^{-8}
Diamètre d'une petite bactérie	2×10^{-7}
Longueur d'onde de la lumière visible	$4 \sim 7 \times 10^{-7}$
Diamètre d'une mitochondrie	$0,5 \sim 1,0 \times 10^{-6}$
Diamètre d'une grande bactérie	10^{-6}
Diamètre d'une cellule de foie de mammifère	2×10^{-5}
Œuf d'oursin	7×10^{-5}
Diamètre d'une amibe géante	2×10^{-4}
Petit crustacé	10^{-3}
Diamètre d'un œuf d'autruche	4×10^{-2}
Souris	10^{-1}
Homme	$1 \sim 2 \times 10^0$
Baleine bleue	3×10^1
Pont de Brooklyn	10^3
Diamètre de la Terre	$1,3 \times 10^7$
Diamètre du Soleil	$1,2 \times 10^9$
Distance Terre-Soleil	$1,3 \times 10^{11}$
Diamètre de notre galaxie	10^{22}
Distance jusqu'aux galaxies les plus lointaines	10^{28}

Tableau 1.1 Longueurs caractéristiques en mètres.

Phénomènes nucléaires	$10^{-23} \sim 10^{-10}$
Phénomènes atomiques : absorption de la lumière, excitation électronique	$10^{-15} \sim 10^{-9}$
Phénomènes chimiques	$10^{-9} \sim 10^{-6}$
Chaînes de réactions biochimiques	$10^{-8} \sim 10^2$
Contractions rapides d'un muscle strié	10^{-1}
Division cellulaire la plus rapide	5×10^2
Temps de génération bactérienne	3×10^3
Temps de génération d'un protozoaire	10^5
Temps de génération d'un petit mammifère	4×10^7
Durée de vie d'un grand mammifère	$4 \times 10^8 \sim 4 \times 10^9$
Durée de vie d'un lac	$10^{10} \sim 10^{12}$
Âge des mammifères	3×10^{15}
Âge des vertébrés	10^{16}
Origine de la vie sur la Terre	$> 10^{17}$
Âge de la Terre	2×10^{17}

Tableau 1.2 Temps caractéristiques en secondes.

préfixes dont la liste est reprise au début du livre. Par exemple, la distance entre deux villes est habituellement mesurée en kilomètres, un kilomètre valant 10^3 mètres. Les dimensions de ce livre sont habituellement exprimées en centimètres plutôt qu'en mètres alors que l'épaisseur d'une page vaut approximativement 0,1 millimètre soit 100 micromètres ($1 \text{ millimètre} = 10^{-3} \text{ mètre}$, $1 \text{ micromètre ou micron} = 10^{-6} \text{ mètre}$).

Conversion d'unités

Nous utiliserons essentiellement les unités du S.I. Il est cependant parfois nécessaire de convertir des quantités d'un système d'unités dans un autre. Pour ce faire, on peut avoir recours à une astuce qui implique la « multiplication par 1 ». Supposons, par exemple, que nous voulions convertir 100 pieds en un nombre équivalent de mètres.

Les facteurs de conversion, donnés en début du livre, nous apprennent que :

$$1 \text{ pied} = 0,3048 \text{ m}$$

Divisons maintenant les deux membres par 1 pied, comme si l'unité (pied) était une quantité algébrique.

$$\frac{1 \text{ pied}}{1 \text{ pied}} = \frac{0,3048 \text{ m}}{1 \text{ pied}}$$

Les facteurs pied se simplifient dans le membre de gauche et il reste uniquement le nombre 1.

$$1 = \frac{0,3048 \text{ m}}{1 \text{ pied}}$$

Si nous multiplions 100 pieds par 1, nous ne modifions rien : dès lors, nous pouvons écrire,

$$100 \text{ pieds} = (100 \text{ pieds})(1)$$

$$(100 \text{ pieds})(1) = (100 \text{ pieds}) \frac{0,3048 \text{ m}}{1 \text{ pied}}$$

$$100 \text{ pieds} = 30,48 \text{ m}$$

Notons que les unités pied au numérateur et au dénominateur se sont simplifiées, ce qui fait apparaître l'unité désirée, le mètre. Cette multiplication par 1 élimine les hésitations sur la manière d'employer le facteur de conversion. Par exemple, nous pouvons diviser $1 \text{ pied} = 0,3048 \text{ m}$ par 0,3048 m, ce qui correspond à une autre manière d'écrire 1

$$1 = \frac{1 \text{ pied}}{0,3048 \text{ m}}$$

Cependant, si nous multiplions 100 pieds par ce facteur, les unités ne se simplifient pas correctement.

Parfois, une grandeur implique la conversion de deux unités ou plus. Par exemple, un volume se mesure en mètres cubes (m^3) et une vitesse en kilomètres par heure (km h^{-1}) (Notons que nous utilisons les exposants négatifs avec les unités, exactement comme nous le faisons avec des quantités algébriques, de sorte que $1 \text{ h}^{-1} = 1/\text{h}$.) On utilise une multiplication par 1 pour chaque conversion. Ceci est montré dans les exemples suivants.

Exemple 1.1

Une petite piscine est longue de 20 pieds, large de 10 pieds, profonde de 5 pieds. Le volume est donc donné par le produit de ces trois dimensions, soit (20 pieds) (10 pieds) (5 pieds) = 1000 pieds³. Évaluer le volume en m^3 .

Réponse Il convient de convertir trois fois des pieds en mètres. Ceci correspond à une modification des unités de longueur, de largeur et de profondeur. À partir de la relation 1 pied = 0,3048 m, on obtient

$$\begin{aligned} 1\,000 \text{ pieds}^3 (1^3) &= 1\,000 \text{ pieds}^3 \frac{(0,3048 \text{ m})^3}{(1 \text{ pied})^3} \\ &= 1\,000 (0,3048)^3 \text{ m}^3 = 28,3 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Exemple 1.2

Exprimer une vitesse de 60 miles par heure (mi h^{-1}) en mètres par seconde (m s^{-1}).

Réponse Pour effectuer cette transformation, nous devons obtenir un facteur de conversion d'heure en secondes et un autre, de mile en mètres. Puisqu'une heure vaut 60 minutes ou encore 3 600 secondes, en divisant par 3 600 secondes, on obtient

$$1 = 1 \text{ h} / 3\,600 \text{ s}$$

Par ailleurs, 1 mile = 1,609 km = 1 609 m de sorte que

$$1 = 1\,609 \text{ m mi}^{-1}$$

En multipliant 60 mi h^{-1} par 1, deux fois, on obtient (60 mi h^{-1}) (1) (1)

$$\begin{aligned} &= (60 \text{ mi h}^{-1}) \left(\frac{1 \text{ h}}{3\,600 \text{ s}} \right) (1\,609 \text{ m mi}^{-1}) \\ &= 60 \left(\frac{1\,609}{3\,600} \right) \text{ m s}^{-1} = 26,8 \text{ m s}^{-1} \end{aligned}$$

Les différents types d'erreurs

Les mesures expérimentales et les prévisions théoriques sont entachées d'erreurs. Les erreurs expérimentales peuvent être de deux types : soit *systématiques* soit *accidentelles*. On comprendra mieux la signification de ces termes à l'aide d'un exemple. Considérons le temps T que met un poids suspendu à un fil pour effectuer une oscillation complète à partir d'une position donnée.

Si quelqu'un utilise un chronomètre pour mesurer T , et s'il répète l'expérience un certain nombre de fois, chaque résultat sera légèrement différent des autres.

Normalement, la plupart des résultats varieront peu par rapport à la valeur moyenne calculée à partir de l'ensemble des mesures effectuées. Les écarts par rapport à la moyenne proviennent de l'impossibilité rencontrée par l'observateur de déclencher et d'arrêter son chronomètre exactement de la même manière lors de chaque mesure. Cette erreur, due au manque d'habileté de l'observateur, est une erreur *accidentelle*. Elle peut être minimisée en prenant la valeur moyenne d'un nombre élevé de mesures.

Toutefois, si la montre retarde, la valeur moyenne de T sera trop petite, même après un grand nombre d'expériences. Cette erreur est dite *systématique* : elle peut être réduite en utilisant un chronomètre de meilleure qualité ou en comparant le chronomètre utilisé à un chronomètre plus précis et en corrigeant les résultats obtenus.

Une erreur systématique peut aussi provenir du temps de réaction de l'observateur. L'observateur peut, systématiquement, démarrer ou arrêter le chronomètre trop tôt ou trop tard. Cette erreur peut être minimisée en imaginant une expérience plus sophistiquée. Par exemple, on peut démarrer ou arrêter le chronomètre en utilisant un flash de lumière et une cellule photo-électrique semblable à celles utilisées dans les ouvre-portes automatiques. Naturellement, les mesures effectuées avec cet appareil seront aussi entachées d'erreurs systématiques et d'erreurs accidentelles ; toutefois, ces erreurs seront inférieures à celles de l'expérience précédente.

Les erreurs systématiques et accidentelles sont présentes dans toutes les expériences. Pour les minimiser, il faut généralement utiliser des appareils de plus en plus sophistiqués et des procédures de plus en plus laborieuses. Des mesures de haute précision et des mesures relatives à des effets petits demandent une grande attention.

Les prévisions théoriques sont également entachées d'erreurs qui ont différentes origines. Souvent, les formules théoriques contiennent des quantités mesurées comme, par

exemple, la masse de l'électron ou la vitesse de la lumière. Or, une erreur est associée à ces valeurs mesurées. Prenons l'exemple de la relation qui explicite la période du pendule (T) dont il a été question plus haut. Cette relation fait intervenir l'accélération de la pesanteur. L'emploi de cette relation est donc lié à la précision avec laquelle nous connaissons cette grandeur. Par ailleurs, cette relation, comme la plupart des expressions théoriques, implique différentes approximations : on admet, par exemple, l'absence de frottement et de résistance de l'air et on suppose, en outre, que le pendule n'est pas fortement déplacé par rapport à sa position d'équilibre.

Dans tout travail scientifique soigneux, la précision numérique doit être spécifiée de façon quantitative. Cependant, lors de la résolution d'exemples numériques, on néglige souvent, dans les manuels, l'analyse complète des erreurs. On utilise alors la règle des *chiffres significatifs*. Ainsi, dans la phrase « la longueur d'un bâtonnet vaut 2,43 mètres », on sous-entend que le dernier chiffre (3) est quelque peu incertain : la longueur exacte pourrait être plus proche de 2,42 ou de 2,44 m. Dans les exemples, exercices et problèmes de ce livre, tous les nombres doivent être considérés comme connus à 3 chiffres significatifs. Par exemple, 2,5 et 3 représentent, en fait, les valeurs 2,50 et 3,00. L'annexe B3 rappelle l'essentiel des règles concernant les chiffres significatifs.

1.2 Le déplacement ; la vitesse moyenne

La discussion quantitative du mouvement est basée sur des mesures et des calculs qui portent sur les *positions*, les *déplacements*, les *vitesse*s et les *accélération*s. Dans ce paragraphe et dans les deux paragraphes suivants, nous utiliserons des exemples simples pour définir et illustrer ces concepts dans le cas de mouvements rectilignes. Dans le chapitre suivant, nous étendrons ces notions au cas des trajectoires courbes. Nous considérerons uniquement un mouvement de *translation*, c'est-à-dire un mouvement au cours duquel chaque partie de l'objet se déplace dans la même direction et ne subit pas de rotation. La rotation sera discutée au chapitre 5.

Commençons par définir la vitesse moyenne. La vitesse moyenne se définit en termes de *déplacement*, ou encore, de variation de la position d'un objet au cours d'un intervalle de temps donné. Pour illustrer cette définition, prenons l'exemple d'une voiture qui se déplace vers le nord, en ligne droite. Des repères sont placés tous les 100 m le long de la route. Supposons que la voiture passe

devant un repère toutes les 5 s, comme le montre la figure 1.2a. Durant chaque intervalle de 5 s, le déplacement est de 100 m ; durant un intervalle de 10 s, il sera de 200 m et ainsi de suite. Le déplacement est donc caractérisé par une direction et une grandeur. Préciser la direction est évident pour un mouvement rectiligne mais cela devient plus complexe dans le cas d'un mouvement curviligne.

La *vitesse moyenne* de la voiture durant un intervalle de temps déterminé s'exprime par le déplacement divisé par le temps écoulé :

$$\text{vitesse moyenne} = \frac{\text{déplacement}}{\text{temps écoulé}}$$

La vitesse moyenne est proportionnelle au déplacement et a la même direction que celui-ci. Elle s'exprime en ms^{-1} . Cette définition est illustrée dans l'exemple suivant.

Exemple 1.3

Que vaut la vitesse moyenne de la voiture de la figure 1.2a pendant l'intervalle de temps au cours duquel l'horloge passe de 10 à 25 secondes ?

Réponse À partir de la figure, on voit que la voiture effectue un déplacement qui vaut $500 \text{ m} - 200 \text{ m} = 300 \text{ m}$ au cours des 15 s. Dès lors, la vitesse moyenne est égale à :

$$300 \text{ m} / 15 \text{ s} = 20 \text{ m s}^{-1}$$

La vitesse moyenne est dirigée vers le nord.

Puisque, dans cet exemple, la voiture parcourt des distances égales en des temps égaux, la vitesse moyenne sera la même quel que soit l'intervalle de temps considéré. Dans ces conditions, le mouvement est dit *uniforme* et le conducteur constatera que son tachymètre ne varie pas. Un mouvement qui n'est pas uniforme est dit *accélééré*. Dans ce cas, la vitesse moyenne dépend de l'intervalle de temps considéré. Le tachymètre d'une voiture en accélération varie en fonction du temps.

Il est intéressant d'utiliser des graphiques et des formules algébriques pour décrire la position et la vitesse d'un objet en mouvement. Pour la voiture considérée plus haut, nous pouvons définir la ligne droite suivant laquelle elle se déplace comme étant l'« axe des x » et choisir comme position $x = 0$ le repère marqué 0. Nous pouvons utiliser aussi le symbole t pour représenter les temps d'observation. Si nous fixons arbitrairement $t = 0$ lors de la première observation, alors x sera égal à 0 lorsque $t = 0$.

De même, x sera égal à 100 m lorsque $t = 5 \text{ s}$, x sera égal à 200 m lorsque $t = 10 \text{ s}$, etc. La figure 1.2b représente

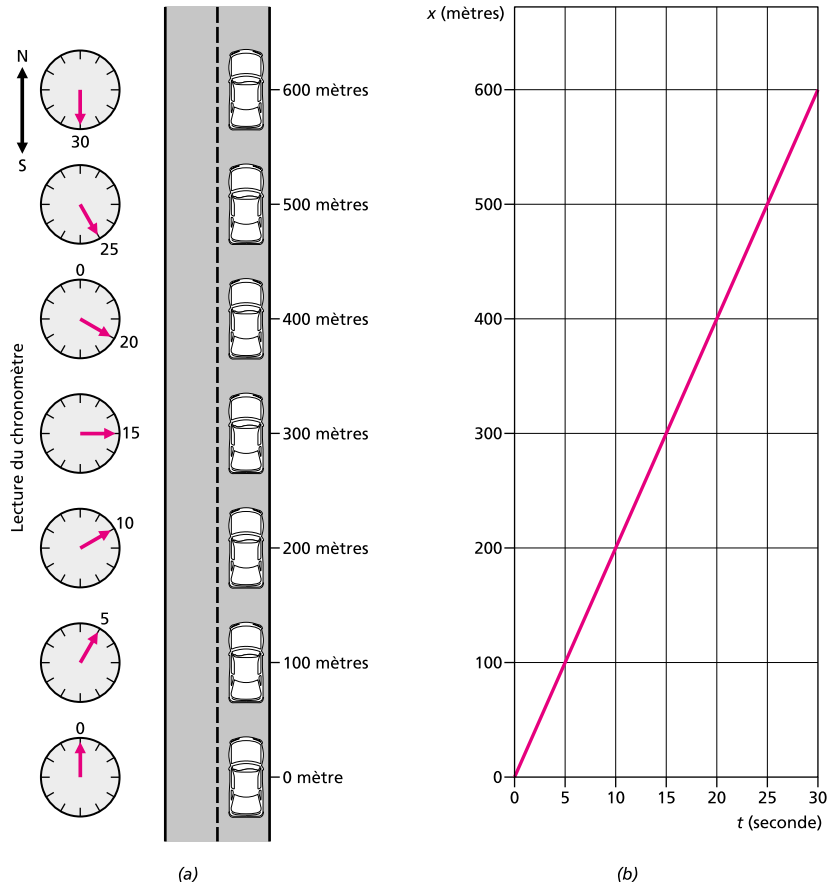


Figure 1.2 (a) La position d'une voiture est repérée toutes les 5 secondes. Le tachymètre ne varie pas. (b) Graphe de la position x de la voiture en fonction du temps t .

graphiquement les résultats des observations. La coordonnée horizontale, l'abscisse, représente le temps t tandis que la coordonnée verticale, l'ordonnée, représente la position x . On peut relier par une ligne droite les points correspondant aux différentes observations, puisque la voiture se déplace de manière uniforme.

La vitesse moyenne peut être définie de façon plus symbolique en utilisant la notation que nous allons introduire maintenant. Supposons qu'à un certain moment que nous appellerons t_1 , la voiture soit observée au repère x_1 , et qu'à un moment ultérieur t_2 , elle soit observée au repère x_2 . Le déplacement est représenté par la différence des positions soit :

$$\Delta x = x_2 - x_1$$

Le symbole « Δ » est la lettre grecque « delta », et « Δx » se lit « delta x ». Δ représente habituellement la différence ou la variation se rapportant à la quantité écrite derrière le symbole. Δx s'obtient conventionnellement comme la

valeur *finale* de x (x_2) de laquelle est soustraite la valeur *initiale* de x (x_1). De la même manière, le temps écoulé entre les observations est donné par :

$$\Delta t = t_2 - t_1$$

Avec cette notation, la vitesse moyenne $\bar{v}$ représente le déplacement divisé par le temps écoulé soit :

$$\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \quad (1.1)$$

Notons que la définition de la vitesse moyenne est valable, que $\bar{v}$ soit constant ou non dans le temps.

Nous reprendrons maintenant l'exemple précédent en montrant comment cette notation peut être utilisée.

Exemple 1.4

À partir de l'équation (1.1), trouver la vitesse moyenne de la voiture de la figure 1.2 entre les temps $t = 10$ s et $t = 25$ s.

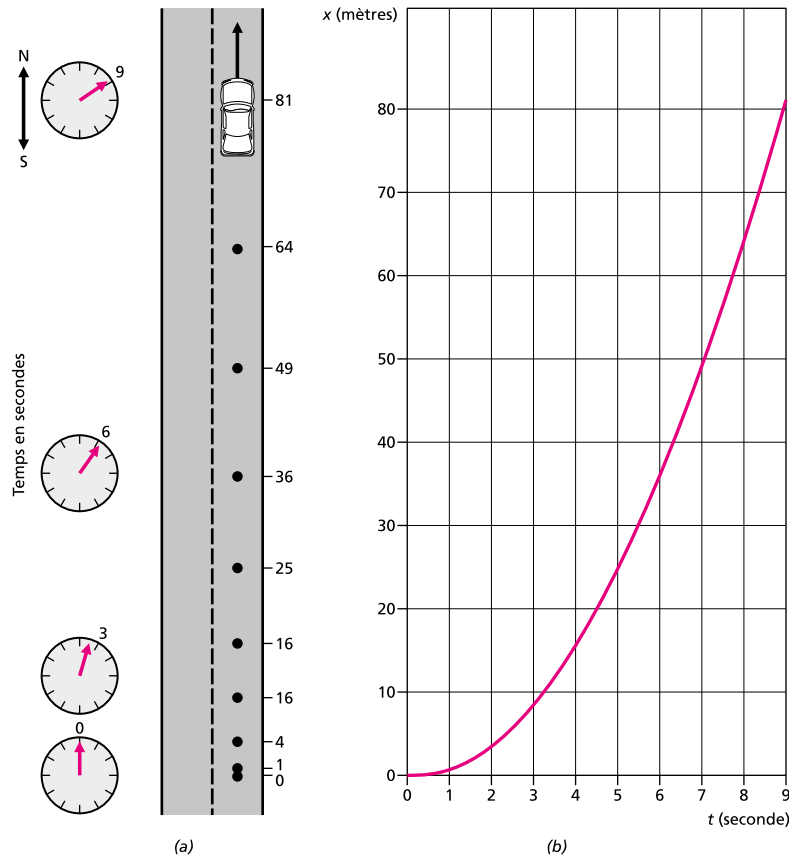


Figure 1.3 (a) Les positions d'une voiture en accélération sont mesurées à des intervalles de temps de 1 seconde. Ces positions sont représentées par des points. (b) Graphe de la position de la voiture en fonction du temps.

Réponse Ici t_1 vaut 10 s et t_2 , 25 s. Il ressort du graphe $x_1 = 200$ m et $x_2 = 500$ m. Dès lors,

$$\begin{aligned}\bar{v} &= \frac{(x_2 - x_1)}{(t_2 - t_1)} \\ &= \frac{(500 \text{ m} - 200 \text{ m})}{(25 \text{ s} - 10 \text{ s})} = \frac{300 \text{ m}}{15 \text{ s}} = 20 \text{ m s}^{-1}.\end{aligned}$$

Le fait de décrire le mouvement rectiligne d'un objet par la position qu'il occupe le long d'un axe de coordonnées (ici la route avec ses marqueurs repères) tient automatiquement compte des directions, des déplacements et des vitesses moyennes. Dans la figure 1.2, on considérera comme positifs les déplacements vers le nord, et comme négatifs, ceux qui auront la direction opposée, vers le sud. Supposons, par exemple, que la voiture se déplace vers le bas de la figure, donc vers le sud, au lieu de se déplacer vers le nord. Dans ces conditions, x décroît lorsque t augmente et l'équation (1.1) donne une vitesse moyenne négative, indiquant par là que l'objet se déplace vers le sud. Ceci est illustré numériquement dans l'exemple suivant.

Exemple 1.5

Au temps $t_1 = 5$ s, une voiture se trouve en $x_1 = 600$ m. En $t_2 = 15$ s, elle se trouve en $x_2 = 500$ m. Évaluer sa vitesse moyenne.

Réponse À partir de l'équation (1.1)

$$\begin{aligned}\bar{v} &= \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{500 \text{ m} - 600 \text{ m}}{15 \text{ s} - 5 \text{ s}} \\ &= \frac{-1000 \text{ m}}{10 \text{ s}} = -10 \text{ m s}^{-1}\end{aligned}$$

Notons que $\bar{v}$ est négatif et que la voiture se déplace vers les x négatifs même si sa position correspond à des x positifs.

Quand un objet est en mouvement *uniforme*, le graphe $x - t$ est une *ligne droite*, comme le montre l'exemple de la figure 1.2. Si le mouvement est accéléré, le graphe cesse d'être une ligne droite et la vitesse moyenne dépend de l'intervalle de temps considéré. Ainsi, dans la figure 1.3, une voiture démarre et parcourt une courte

distance pendant la première seconde ; puis, au cours de la seconde suivante, une distance plus longue, et ainsi de suite au fur et à mesure qu'elle accélère. Dans ces conditions, pendant la première seconde, la vitesse moyenne sera plus petite qu'au cours des secondes ultérieures. Ceci est illustré dans l'exemple suivant.

Exemple 1.6

Une voiture se déplace comme le montre la figure 1.3.

Trouver sa vitesse moyenne entre $t = 0$ et $t = 1$ s et entre $t = 1$ et $t = 2$ s.

Réponse Pour évaluer les vitesses moyennes, nous devons connaître les positions en $t = 0$, $t = 1$ et 2 s. On tire de la figure 1.3 les valeurs correspondantes qui sont respectivement 0, 1 et 4 m. Entre $t = 0$ et 1 s, la vitesse moyenne vaut donc

$$\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{1 \text{ m} - 0 \text{ m}}{1 \text{ s} - 0 \text{ s}} = 1 \text{ m s}^{-1}$$

Entre $t = 1$ et 2 s,

$$\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{4 \text{ m} - 1 \text{ m}}{2 \text{ s} - 1 \text{ s}} = 3 \text{ m s}^{-1}$$

Comme on devait s'y attendre, la vitesse moyenne est plus grande dans le second intervalle puisque la voiture accélère.

1.3 La vitesse instantanée

La plupart des situations intéressantes impliquent des mouvements accélérés plutôt que des mouvements uniformes. Puisque, dans le cas d'un mouvement accéléré, la vitesse moyenne dépend de l'intervalle de temps considéré, il est souvent plus utile de caractériser le mouvement par la *vitesse instantanée*, c'est-à-dire la vitesse à un instant particulier. Par exemple, lorsque nous disons qu'une voiture en accélération se déplace à 10 m s^{-1} , nous faisons référence à sa vitesse instantanée, mesurée à un moment précis.

La vitesse instantanée est donc déterminée en calculant la vitesse moyenne pour un intervalle de temps extrêmement court. Ceci est illustré dans l'exemple suivant.

Exemple 1.7

Le déplacement de la voiture dans la figure 1.3 est décrit par l'expression algébrique $x = bt^2$ où b est égal à 1 m s^{-2} . Trouver la vitesse moyenne entre 3 et 3,1 s, entre 3 et

3,01 s et entre 3 et 3,001 s. (Ces intervalles de temps sont progressivement plus courts ; les valeurs obtenues pour la vitesse moyenne représentent donc des approximations d'autant meilleures de la vitesse instantanée en $t = 3$ s.)

Réponse Lorsque $t = 3$ s, la position est

$$x = bt^2 = (1 \text{ m s}^{-2}) \times (3 \text{ s})^2 = 9 \text{ m} ;$$

lorsque $t = 3,1$ s,

$$x = (1 \text{ m s}^{-2}) (3,1 \text{ s})^2 = 9,61 \text{ m} ;$$

Dès lors la vitesse moyenne entre 3 et 3,1 s s'écrit

$$\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{9,61 \text{ m} - 9 \text{ m}}{3,1 \text{ s} - 3 \text{ s}} = 6,1 \text{ m s}^{-1}$$

En $t = 3,01$ s, la position est

$$x = (1 \text{ m s}^{-2}) (3,01 \text{ s})^2 = 9,0601 \text{ m} ;$$

de sorte que $\bar{v}$ entre 3 et 3,01 s s'écrit

$$\bar{v} = \frac{9,0601 \text{ m} - 9 \text{ m}}{3,01 \text{ s} - 3 \text{ s}} = 6,01 \text{ m s}^{-1}$$

Notons que, dans le cas particulier de cet exemple, nous avons considéré plus de chiffres significatifs que d'habitude. Enfin, lorsque $t = 3,001$ s,

$$x = (1 \text{ m s}^{-2}) (3,001 \text{ s})^2 = 9,006001 \text{ m} ;$$

et la vitesse moyenne entre 3 et 3,001 s vaut

$$\bar{v} = \frac{9,006001 \text{ m} - 9 \text{ m}}{3,001 \text{ s} - 3 \text{ s}} = 6,001 \text{ m s}^{-1}$$

Au fur et à mesure que l'intervalle de temps Δt diminue, la vitesse moyenne $\bar{v}$ tend vers la valeur de 6 m s^{-1} . Dès lors la vitesse instantanée v en $t = 3$ s vaut 6 m s^{-1} .

L'exemple nous montre comment évaluer la vitesse instantanée d'un objet. On calcule la vitesse moyenne pour des intervalles de temps de plus en plus courts. La valeur de $\bar{v}$ correspondant à un intervalle de temps arbitrairement petit représente la vitesse instantanée v . Mathématiquement, la vitesse instantanée v constitue la *limite* de la vitesse moyenne $\bar{v}$ lorsque Δt tend vers 0. Le processus qui permet l'évaluation de cette limite est appelé la *dérivation* ; v est la *dérivée de x par rapport au temps* et s'écrit

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt} \quad (1.2)$$

La quantité dx/dt peut être considérée comme le rapport $\Delta x/\Delta t$ évalué lorsque Δx et Δt deviennent tous deux très petits. Des expressions générales ont été développées

pour évaluer, $v = dx/dt$ à tout instant, pour autant que la relation algébrique liant x et t soit connue. Cela permet d'éviter la procédure peu commode que nous avons employée dans l'exemple pour évaluer la vitesse à un instant *précis*. Plusieurs de ces formules de dérivation sont données dans l'annexe B8.

Comme la vitesse moyenne, la vitesse instantanée peut être soit positive, soit négative ; les valeurs négatives correspondent à un mouvement vers les valeurs décroissantes de x . Par contre, la grandeur de la vitesse instantanée, c'est-à-dire son module, est toujours positive ou nulle.

À l'avenir, lorsque nous parlerons de vitesse ou de la variation de toute autre grandeur, nous ferons implicitement référence à sa valeur *instantanée*, sauf si le mot « moyen » est explicitement utilisé. Notons que la distinction entre les deux types de vitesse disparaît dans le cas particulier du mouvement uniforme.

Interprétation graphique de la vitesse

Un graphe du déplacement en fonction du temps fournit une information directe concernant la vitesse. Comme nous l'avons vu, un graphe linéaire correspond à une vitesse constante ou à un mouvement uniforme, alors qu'un graphe courbe correspond à une vitesse variable.

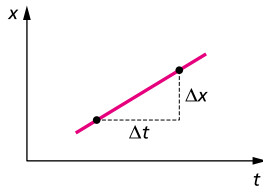


Figure 1.4 Graphe $x - t$ relatif à un objet en mouvement uniforme. La pente de la droite est définie par le rapport $\Delta x/\Delta t$ et représente la vitesse.

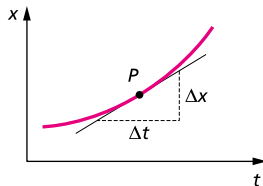


Figure 1.5 La pente de la courbe $x - t$ au point P est donnée par la pente $\Delta x/\Delta t$ de la tangente à cette courbe en ce point. La vitesse en P est représentée par la pente de la courbe en ce point.

La vitesse étant définie comme la dérivée de la position par rapport au temps, elle est donnée par la *pente* de la tangente dans le graphe $x - t$. Dans le graphe de la

figure 1.4 relatif à un mouvement uniforme, la courbe est une droite. La pente est constante et définie par le rapport $\Delta x/\Delta t$, ce qui représente effectivement la vitesse. Dans le graphe de la figure 1.5 relatif à un mouvement accéléré, la vitesse évolue au cours du temps. La vitesse instantanée au point P est donnée par le rapport $\Delta x/\Delta t$ évalué sur un intervalle de temps très court autour de ce point. Elle correspond dès lors à la pente de la tangente à la courbe au point P , possédant localement la même évolution temporelle que la courbe. À mesure que t augmente, on observe à la figure 1.5 que la pente de la tangente à la courbe augmente. Ceci signifie que la vitesse augmente au cours du temps et que le mouvement est bien accéléré. L'inspection de la courbe $x - t$ renseigne donc directement sur l'amplitude de la vitesse ainsi que sur son évolution au cours du temps.

1.4 L'accélération

Comme la position, la vitesse peut varier en fonction du temps. La variation de la vitesse par unité de temps définit l'*accélération*. Encore une fois, nous distinguerons la valeur moyenne et la valeur instantanée.

L'*accélération moyenne* $\bar{a}$ entre les temps t_1 et t_2 , intervalle de temps au cours duquel la vitesse varie de $\Delta v = v_2 - v_1$, est définie par

$$\bar{a} = \frac{\text{variation de vitesse}}{\text{temps écoulé}} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} \quad (1.3)$$

Si nous mesurons la vitesse en mètres par seconde et le temps en secondes, $\bar{a}$ s'exprimera donc en mètres par seconde par seconde (en abrégé m s^{-2} ; on dit plutôt « mètres par seconde au carré »). Une accélération moyenne de 1 m s^{-2} correspond à un accroissement moyen de la vitesse de 1 m s^{-1} pendant chaque seconde. L'exemple 1.8 illustre cette définition.

Exemple 1.8

Une voiture démarre et accélère pour atteindre une vitesse de 30 m s^{-1} en 10 s. Que vaut l'accélération moyenne ?

Réponse À partir de la définition,

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{30 \text{ m s}^{-1}}{10 \text{ s}} = 3 \text{ m s}^{-2}$$

Ceci correspond à un accroissement de vitesse de 3 m s^{-1} durant chaque seconde de l'intervalle de temps de 10 s.

L'accélération instantanée a est définie comme l'accélération moyenne $\bar{a}$, pour un intervalle de temps extrêmement court. De façon symbolique :

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt} \quad (1.4)$$

Dans un graphe $v - t$ donnant la vitesse d'un objet en fonction du temps, a est représenté par la pente de la courbe. Ceci est illustré dans l'exemple 1.9.

Notons encore que la vitesse étant définie comme la dérivée de la position par rapport au temps, on peut écrire :

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dx}{dt} \right) = \frac{d^2x}{dt^2}$$

L'accélération correspond à la dérivée seconde de la position par rapport au temps. Dans un graphe $x - t$ donnant la position d'un objet en fonction du temps, a détermine la concavité de la courbe. Une accélération positive induit une augmentation de la vitesse au cours du temps. Cela se traduit par une augmentation de la pente de la tangente à la courbe et une concavité tournée vers le haut (courbure positive). Réciproquement, une accélération négative se traduira par une concavité tournée vers le bas (courbure négative).

Exemple 1.9

La figure 1.6 représente le graphe de la vitesse d'une voiture en fonction du temps. On demande de décrire qualitativement son accélération.

Réponse Entre les points A et B, la vitesse augmente, la pente est positive et la voiture accélère. Toutefois, la pente diminue progressivement et, dès lors, l'accélération décroît. Entre les points B et C, la vitesse est constante, la pente et l'accélération sont donc nulles. Entre les points C et D, la vitesse diminue de sorte que l'accélération est négative. Cette *décélération* augmente, en grandeur, au fur et à mesure que la voiture ralentit.

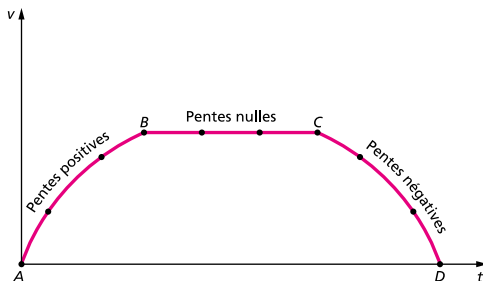


Figure 1.6 Graphe de la vitesse d'une voiture en fonction du temps. La pente et l'accélération sont positives entre A et B. Elles sont nulles entre B et C, négatives entre C et D.

1.5 Mouvement rectiligne uniformément accéléré

Jusqu'ici, nous avons calculé les vitesses à partir des variations de position et les accélérations à partir des variations de vitesse. Souvent cependant, c'est l'accélération d'un objet qui est mesurée ou prévue théoriquement et on souhaite connaître les variations de vitesse et de position correspondantes. Dans ce paragraphe, nous allons montrer comment déterminer le mouvement d'un objet, connaissant, d'une part, son accélération et, d'autre part, sa vitesse et sa position initiales.

Considérons un objet ayant une vitesse initiale v_0 et soumis à une accélération *constante* a pendant un intervalle de temps Δt . L'accélération étant constante, l'accélération instantanée est égale à l'accélération moyenne. On en déduit que $a = \Delta v / \Delta t$ ou encore $\Delta v = a \Delta t$. Si on note v la vitesse après l'intervalle de temps Δt , $\Delta v = v - v_0$ et on en déduit :

$$v = v_0 + a \Delta t \quad (1.5)$$

Ce résultat a une interprétation graphique intéressante et utile, si on représente l'accélération en fonction du temps (figure 1.7a). Le produit de la hauteur, a , par la largeur, Δt , du rectangle coloré, représente la surface $a \Delta t$ qui équivaut à la variation de vitesse. Dès lors cette *variation de vitesse au cours de l'intervalle de temps considéré est égale à l'aire sous le graphe $a - t$* . L'aire est considérée comme positive si elle se trouve au-dessus de l'axe du temps, et comme négative si elle se trouve au-dessous. Ce résultat est tout à fait général : il ne se limite pas aux cas où l'accélération est constante.

Si nous représentons graphiquement l'équation (1.5) qui exprime la vitesse en fonction du temps, nous obtenons une droite (figure 1.7b). La vitesse moyenne, dans l'intervalle de temps Δt , est donnée par :

$$\bar{v} = v_0 + \Delta v / 2 = v_0 + (v - v_0) / 2$$

ou encore

$$\bar{v} = \frac{1}{2}(v_0 + v) \quad (1.6)$$

Le déplacement, c'est-à-dire le changement de position intervenant pendant l'intervalle de temps Δt , est lié à la vitesse moyenne par la définition $\bar{v} = \Delta x / \Delta t$. On a $\Delta x = \bar{v} \Delta t$ ou encore

$$\Delta x = \frac{1}{2}(v_0 + v) \Delta t \quad (1.7)$$

Si nous substituons maintenant $v = v_0 + a \Delta t$ dans cette équation, il vient

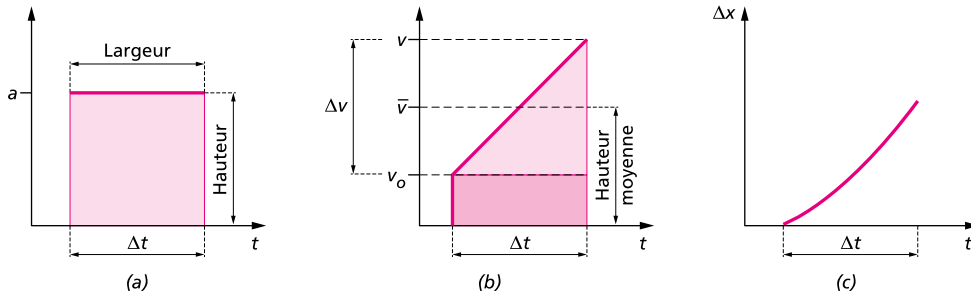


Figure 1.7 Mouvement uniformément accéléré. (a) L'accélération a est constante dans l'intervalle de temps Δt . (b) Graphe de $v = v_0 + a \Delta t$. La vitesse moyenne vaut $\bar{v} = (v_0 + v)/2$. (c) Graphe du déplacement en fonction du temps.

$$\Delta x = v_0 \Delta t + \frac{1}{2} a (\Delta t)^2 \quad (1.8)$$

Nous pouvons également récrire l'équation (1.5) sous la forme $\Delta t = (v - v_0) / a$. En substituant cette valeur de Δt dans l'équation (1.7), on obtient

$$\Delta x = \frac{1}{2} (v_0 + v) \frac{(v - v_0)}{a} = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}$$

ou encore

$$v^2 = v_0^2 + 2a \Delta x \quad (1.9)$$

De nouveau, les résultats algébriques ont une interprétation graphique immédiate. L'aire colorée du graphe $v - t$ de la figure 1.7b a une hauteur moyenne $\bar{v}$ et une largeur Δt . Sa mesure a donc pour valeur le produit $\bar{v} \Delta t$, ce qui est égal à Δx d'après l'équation (1.7). (On peut donc considérer que la somme des aires du triangle et du rectangle représente l'équation (1.8). Voir le problème 1.70.) Donc, *le déplacement, au cours de l'intervalle de temps Δt , est représenté par l'aire sous le graphe $v - t$* . Ceci est également vrai lorsque l'accélération cesse d'être constante. Comme précédemment, les aires au-dessus de l'axe des x sont considérées comme positives et celles au-dessous de cet axe sont considérées comme négatives.

L'équation (1.5) relative à la vitesse, et l'équation (1.8) relative au déplacement, décrivent complètement le mouvement de l'objet, lorsque sa vitesse initiale et sa position initiale sont données et lorsque l'accélération est constante. Les équations (1.6), (1.7) et (1.9) contiennent une information équivalente. Elles sont parfois utiles pour la résolution de problèmes. Par exemple, l'équation (1.9) est utile lorsque les vitesses initiale et finale et l'accélération sont données, mais pas le temps écoulé. Les formules correspondant au mouvement rectiligne uniformément accéléré sont résumées dans le tableau 1.3. Leur utilisation est illustrée dans les exemples 1.10, 1.11 et 1.12.

$v = v_0 + a \Delta t$	(1.5)
$\Delta x = v_0 \Delta t + \frac{1}{2} a (\Delta t)^2$	(1.8)
$\bar{v} = \frac{1}{2} (v_0 + v)$	(1.6)
$\Delta x = \frac{1}{2} (v_0 + v) \Delta t$	(1.7)
$v^2 = v_0^2 + 2a \Delta x$	(1.9)

Tableau 1.3 Équations du mouvement rectiligne uniformément accéléré.

Exemple 1.10

Une voiture, arrêtée à un feu rouge, repart avec une accélération de 2 m s^{-2} lorsque le feu devient vert. Que valent sa vitesse et sa position après 4 s ?

Réponse Puisque nous connaissons l'accélération, a , le temps écoulé Δt , et la vitesse initiale $v_0 = 0$, nous pouvons utiliser les équations (1.5) et (1.8) pour évaluer la vitesse et le déplacement. Il vient

$$\begin{aligned} v &= v_0 + a \Delta t = 0 + (2 \text{ m s}^{-2})(4 \text{ s}) = 8 \text{ m s}^{-1} \\ \Delta x &= v_0 \Delta t + \frac{1}{2} a (\Delta t)^2 \\ &= 0 + \frac{1}{2} (2 \text{ m s}^{-2})(4 \text{ s})^2 = 16 \text{ m} \end{aligned}$$

Après 4 s, la voiture a atteint une vitesse de 8 m s^{-1} et elle se trouve à 16 m du feu.

Notons que nous aurions pu évaluer Δx à partir de l'équation (1.7) en nous servant du résultat obtenu pour v . Les problèmes relatifs au mouvement uniformément

accélération et les problèmes de physique, en général, peuvent souvent être résolus de différentes manières.

Exemple 1.11

Une voiture atteint une vitesse de 20 m s^{-1} avec une accélération de 2 m s^{-2} . Quelle sera la distance parcourue durant l'accélération si la voiture initialement est

- au repos ?
- animée d'une vitesse de 10 m s^{-1} ?

Réponse a) Dans ce cas, nous connaissons les vitesses initiale et finale ainsi que l'accélération. L'équation (1.9) fait intervenir ces trois grandeurs, plus la distance parcourue Δx . En résolvant cette équation par rapport à Δx , avec

$$a = 2 \text{ m s}^{-2}, \\ v = 20 \text{ m s}^{-1} \text{ et } v_0 = 0$$

on obtient

$$\Delta x = \frac{(v^2 - v_0^2)}{2a} = \frac{(20 \text{ m s}^{-1})^2}{2(2 \text{ m s}^{-2})} = 100 \text{ m}$$

Nous aurions pu résoudre ce problème en utilisant la relation $v = v_0 + a \Delta t$ pour évaluer Δt , et en substituant la valeur obtenue dans l'équation (1.8). (Le lecteur effectuera cette résolution en guise d'exercice.)

- Procédons comme ci-dessus, mais avec $v_0 = 10 \text{ m s}^{-1}$

$$\Delta x = \frac{v^2 - v_0^2}{2a} \\ = \frac{(20 \text{ m s}^{-1})^2 - (10 \text{ m s}^{-1})^2}{2(2 \text{ m s}^{-2})} = 75 \text{ m}$$

La distance nécessaire pour atteindre la vitesse donnée est plus courte que dans le cas a) puisque, au départ, la voiture est en mouvement.

Exemple 1.12

Une voiture démarre avec une accélération constante de 2 m s^{-2} . Elle s'insère dans le trafic d'une grand-route où les voitures se déplacent à la vitesse constante de 24 m s^{-1} .

- Combien de temps faudra-t-il pour que la voiture atteigne une vitesse de 24 m s^{-1} ?
- Quelle sera la distance parcourue durant cet intervalle de temps ?
- Le conducteur ne souhaite pas que le véhicule qui le suit s'approche à moins de 20 m de sa voiture. Il

ne souhaite pas non plus que ce véhicule soit forcé de ralentir.

Évaluer le vide qu'il doit y avoir entre deux voitures pour que le conducteur puisse s'insérer dans la file.

Réponse a) Le temps nécessaire pour que la voiture atteigne la vitesse de $v = 24 \text{ m s}^{-1}$, en partant du repos, est donné par l'équation $v = v_0 + a \Delta t$. Nous pouvons la récrire sous la forme

$$\Delta t = (v - v_0) / a = (24 \text{ m s}^{-1}) / (2 \text{ m s}^{-2}) = 12 \text{ s}$$

- En utilisant l'équation (1.8), la distance parcourue en 12 s est

$$\Delta x = v_0 \Delta t + \frac{1}{2} a (\Delta t)^2 \\ = 0 + \frac{1}{2} (2 \text{ m s}^{-2}) (12 \text{ s})^2 = 144 \text{ m}$$

- Si le véhicule suivant se déplace à la vitesse constante de $v_0 = 24 \text{ m s}^{-1}$, $a = 0$. En utilisant l'équation (1.8), on voit que cette voiture parcourt, en 12 s , la distance

$$\Delta x = v_0 \Delta t + \frac{1}{2} a (\Delta t)^2 \\ = (24 \text{ m s}^{-1}) (12 \text{ s}) + 0 = 288 \text{ m}$$

Puisque la voiture qui veut s'insérer dans le trafic parcourt 144 m pendant ce temps, la voiture suivante gagne $(288 - 144) \text{ m}$ soit 144 m . Si la distance entre deux véhicules doit être, au minimum, de 20 m , l'intervalle nécessaire doit donc être au moins égal à

$$(144 + 20) \text{ m} = 164 \text{ m}$$

Dans cet exemple, la voiture atteint 24 m s^{-1} ou encore 86 km h^{-1} en 12 s . Il s'agit d'une accélération assez importante. Une voiture moins puissante mettrait un temps plus long pour atteindre cette vitesse, ce qui impliquerait un plus grand vide dans le trafic.

Ces exemples illustrent la manière de résoudre des problèmes relatifs au mouvement rectiligne uniformément accéléré et les problèmes de physique en général. La méthode consiste à identifier les données et les inconnues du problème. On recherche alors l'équation ou les équations qui relient ces quantités. Si nécessaire, on résout alors le problème algébriquement en exprimant une inconnue en fonction des quantités connues. Il est préférable de substituer les valeurs numériques dans l'étape finale de la résolution du problème plutôt que dans les étapes préliminaires. Cela réduit le travail arithmétique et facilite la vérification des calculs.

Une vérification commode du résultat d'un problème peut s'effectuer à partir de l'équation aux dimensions de la réponse. Si l'inconnue est une longueur, le résultat doit s'exprimer en unité de longueur, c'est-à-dire en mètres ; si ce n'est pas le cas, une erreur s'est introduite au cours de la résolution du problème. Notons, par exemple, que dans les parties (b) et (c) de l'exemple 1.12, les unités de temps se simplifient et les distances s'expriment bien en mètres, comme il convient.

En résumé, nous avons montré que si nous connaissons la position et la vitesse initiales d'un objet, nous pouvons déterminer la vitesse à tout instant ultérieur à partir de l'accélération, et la position à partir de la vitesse. Les équations données dans le tableau 1.3 peuvent être utilisées pour déterminer le mouvement d'un objet soumis à une accélération constante. Lorsque l'accélération cesse d'être constante, on peut souvent utiliser une valeur moyenne de l'accélération et les équations relatives au mouvement uniformément accéléré pour obtenir une description approchée du mouvement.

1.6 Accélération de la pesanteur et objets en chute libre

Jusqu'ici, nous avons discuté du mouvement à partir des définitions et de leurs conséquences. Plus précisément, nous avons considéré les relations mathématiques qui découlent des définitions de la vitesse et de l'accélération. Rien n'a été dit concernant les lois qui régissent le monde naturel. Cependant, pour pouvoir discuter de la chute des objets, nous devons avoir recours à des informations obtenues pour la première fois par Galilée à partir d'observations expérimentales très précises.

L'expérience quotidienne nous apprend que des objets sans support tombent vers le sol. La vitesse au moment de l'impact s'accroît si la distance de chute augmente. Il est donc évident que des objets qui tombent subissent une accélération que nous attribuons à la pesanteur : c'est l'attraction gravitationnelle exercée par la Terre. Néanmoins, deux aspects essentiels de l'accélération de gravitation ne sont pas directement observables.

Supposons que la pesanteur soit le seul facteur qui influence le mouvement d'un objet en chute libre au voisinage de la surface de la Terre. Supposons que la résistance de l'air soit absente ou négligeable. Dans ces conditions, on trouve que :

1. *L'accélération gravitationnelle est la même pour tous les objets qui tombent*, quelles que soient leur taille ou leur composition.

2. *L'accélération gravitationnelle est constante*. Elle ne varie pas au cours de la chute.

Aucune de ces affirmations ne cadre entièrement avec notre expérience quotidienne. Des pièces de monnaie tombent plus rapidement que des bouts de papier, ce qui contredit la première affirmation. Des objets qui tombent de hauteurs importantes atteignent une vitesse maximale que nous appellerons vitesse *limite*, ce qui contredit la seconde affirmation. Cependant, ces deux effets résultent de la résistance de l'air. Dans le vide, une pièce de monnaie et un bout de papier tombent à la même vitesse (figure 1.8). En outre, un objet qui tombe d'une très haute altitude est constamment accéléré jusqu'à ce qu'il pénètre dans l'atmosphère.

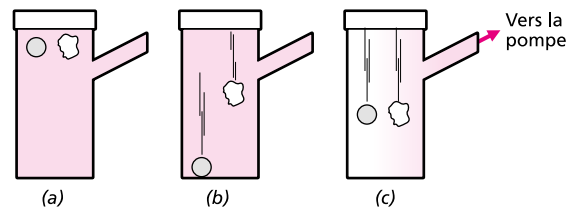


Figure 1.8 (a) Une pièce de monnaie et un bout de papier sont lâchés en même temps au sommet du réservoir. (b) Si le réservoir contient de l'air, la pièce arrive la première au fond. (c) Si l'air est évacué du réservoir, les deux objets atteindront le fond en même temps.

L'accélération de la pesanteur au voisinage de la surface terrestre est représentée par g ; elle vaut approximativement

$$g = 9,8 \text{ m s}^{-2}$$

De petites variations de g résultent de changements de latitude, d'altitude et de modifications dans les caractéristiques géologiques locales. Ceci apparaîtra plus clairement au chapitre 3.

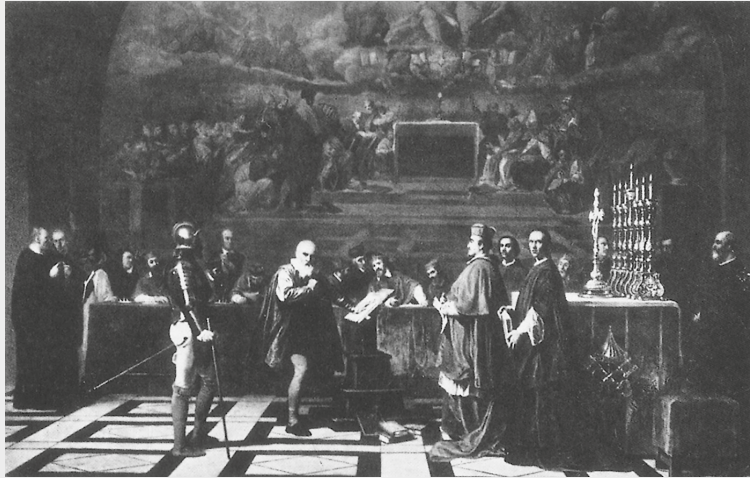
Dans les exemples ci-dessous et dans les problèmes et exercices repris à la fin de ce chapitre, nous négligeons les variations de g et nous ferons l'hypothèse que la résistance de l'air est peu importante. Ceci nous permettra d'utiliser les équations du mouvement uniformément accéléré pour décrire le mouvement des objets en chute libre.

Exemple 1.13

Une balle est lâchée d'une fenêtre située 84 m au-dessus du sol (figure 1.9).

- Quand la balle touchera-t-elle le sol ?
- Quelle sera sa vitesse au moment de l'impact ?

Galilée (1564-1642)



Galilée (de son vrai nom Galileo Galilei) naît à Pise en 1564. À 17 ans, il entreprend des études de médecine bien qu'il manifeste déjà du talent pour la musique et les arts. Très vite, il montre de l'intérêt pour d'autres domaines de la science et il est nommé professeur de mathématiques à l'université de Pise. Entre 1589 et 1592, il étudie les lois du mouvement, ce qui constitue la matière de ce chapitre.

Le philosophe grec Aristote (384-322 avant J.-C.) pensait que des objets lourds tombaient plus rapidement que des objets légers. Galilée entreprend une série d'expériences sur des objets roulant le long de plans inclinés, ce qui lui permet de conclure que tous les objets possèdent la même accélération, pour autant que l'on puisse considérer les frottements comme négligeables. Il établit en outre que la distance parcourue par les objets varie avec le carré du temps écoulé, ce qui implique que l'accélération soit constante. On considère que Galilée a révélé l'importance de l'approche expérimentale en sciences.

En 1608, Galilée prend connaissance du fait que deux lentilles de lunette peuvent être associées pour agrandir la vision d'un objet éloigné. Rapidement, il construit une série de télescopes possédant des pouvoirs d'agrandissement de plus en plus importants.

Il observe que le relief de la Lune est montagneux, que Jupiter possède des satellites ; il observe également l'existence des taches solaires. Mais ces observations lui causent des ennuis. Copernic (1473-1543) avait émis des doutes quant à l'enseignement d'Aristote qui voulait que la Terre soit le centre de l'univers. Copernic avait montré que les mouvements apparents du Soleil, des étoiles et des planètes pouvaient s'interpréter plus simplement en considérant la Terre comme une planète effectuant une rotation quotidienne autour de son axe et une révolution annuelle autour du Soleil. Les observations de Galilée sont en faveur de ce point de vue hérétique selon lequel la Terre ne constitue pas le centre du monde. Cela lui cause d'énormes difficultés avec les autorités.

Le conflit de Galilée avec l'Église dure plus de vingt ans. Dans un premier temps, on lui interdit d'exposer ses idées. Plus tard, on lui ordonne de décrire les idées de Copernic comme hypothétiques. Cependant, l'analyse de Galilée et la présentation des observations sont tellement parfaites et convaincantes qu'à 70 ans, il est jugé pour avoir enfreint l'ordre antérieur. Après le procès, il reste en résidence surveillée pendant les neuf dernières années de sa vie.

Réponse

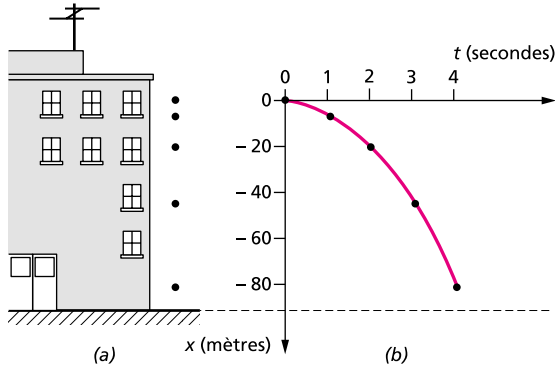


Figure 1.9 (a) Une balle tombe en chute libre. Elle est lâchée sans vitesse initiale. Remarquons qu'au cours de sa chute, elle parcourt à chaque seconde des distances de plus en plus grandes. (b) Graphe $x - t$ de la balle de l'exemple 1.13. On choisit $x = 0$ à la hauteur de la fenêtre.

Pour résoudre ce type de problème, il faut définir un système de coordonnées. *A priori*, la direction positive de l'axe des x peut être choisie vers le haut ou vers le bas. Choisissons une direction positive vers le haut.

Puisque la balle est lâchée avec une vitesse initiale nulle, $v_0 = 0$. L'accélération de la pesanteur est constante et est orientée dans la direction $-x$. Les équations du tableau 1.3 peuvent être utilisées pour autant que l'on écrive

$$a = -g = -9,8 \text{ m s}^{-2}$$

a) La balle frappera le sol lorsque Δx vaudra -84 m . Ceci a lieu après un intervalle de temps qui est donné par

$$\Delta x = \frac{1}{2} a (\Delta t)^2$$

ou

$$(\Delta t)^2 = \frac{2 \Delta x}{a}$$

de sorte que

$$\Delta t = \sqrt{\frac{2 \Delta x}{a}} = \sqrt{\frac{2(-84 \text{ m})}{-9,8 \text{ m s}^{-2}}} = 4,14 \text{ s}$$

On ne doit prendre en considération que la racine carrée positive puisque la balle touche le sol après avoir été lâchée et non avant.

b) Utilisons l'équation (1.5) avec $\Delta t = 4,14 \text{ s}$ et $v_0 = 0$,
 $v = a \Delta t = (-9,8 \text{ m s}^{-2})(4,14 \text{ s}) = -40,6 \text{ m s}^{-1}$

Cet exemple peut également se traiter en choisissant la direction positive vers le bas. Dans ce cas, l'accélération $a = g$ est égale à $+9,8 \text{ m s}^{-2}$ et la balle touche le sol lorsque Δx est égal à 84 m . En utilisant ces valeurs, on trouve le même résultat pour Δt . La vitesse de la balle est positive au moment où elle frappe le sol, puisque la direction positive est vers le bas. Le choix de la direction est donc arbitraire. Il n'influence pas les résultats physiques, pour autant que l'on interprète correctement les signes des valeurs obtenues.

Lorsqu'un objet est lancé vers le haut, il est soumis à une accélération constante due à la pesanteur. Cette accélération est dirigée vers le bas. Ceci est vrai à tout instant du mouvement : pendant l'ascension, au moment où l'objet atteint sa hauteur maximale, et enfin lorsque l'objet retombe. Cependant, la vitesse varie continuellement. Au départ, elle est dirigée vers le haut ; au fur et à mesure que l'objet s'élève, la grandeur de la vitesse décroît uniformément et elle s'annule lorsque l'objet atteint sa hauteur maximum. À partir de ce moment, il commence à retomber et sa vitesse augmente progressivement en grandeur. Ce mouvement est illustré par les graphes $v - t$ et $x - t$ de la figure 1.10. Dans ces graphes, la direction positive est prise vers le haut. En A, l'objet s'élève ; en B, il est momentanément au repos lorsqu'il atteint sa hauteur maximum ; en C, il retombe. Dès lors, v est positive au départ, s'annule un instant puis devient négative. Par contre, l'accélération est donnée par la pente du graphe $v - t$ et vaut continuellement $-g$.

Il découle de la figure 1.10 que le mouvement est symétrique par rapport au point le plus élevé (B). Une seconde avant d'atteindre la hauteur maximum, la vitesse est dirigée vers le haut ; une seconde après avoir atteint ce maximum, la vitesse est dirigée vers le bas. Toutefois, en ces deux points, les grandeurs des vitesses sont égales. On en conclut que l'objet parcourra une même fraction de la trajectoire, au cours de la montée et de la descente, pendant des intervalles de temps identiques. Ceci est illustré dans l'exemple 1.14.

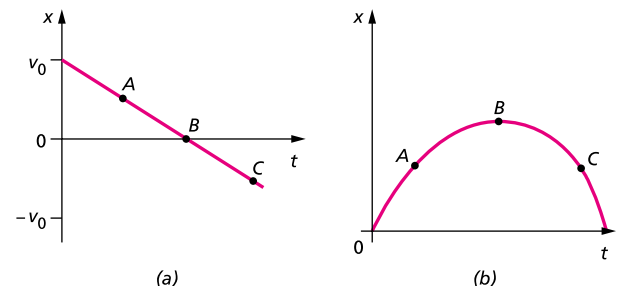


Figure 1.10 Graphes $v - t$ (a) et $x - t$ (b) relatifs à un objet lancé à la verticale à partir de $x = 0$. La vitesse est nulle au moment où l'objet atteint sa hauteur maximum (point B) mais l'accélération vaut toujours $-g$.

Exemple 1.14

Une balle est lancée vers le haut avec une vitesse initiale de $19,6 \text{ m s}^{-1}$ à partir d'une fenêtre située $58,8 \text{ m}$ au-dessus du sol.

- Quelle hauteur atteindra-t-elle ?
- Quand atteindra-t-elle cette hauteur maximum ?
- Quand la balle retombera-t-elle sur le sol ?

Réponse Prenons encore la direction positive vers le haut,

$$v_0 = 19,6 \text{ m s}^{-1} \text{ et } a = -g = -9,8 \text{ m s}^{-2}$$

a) Au fur et à mesure que la balle s'élève, sa vitesse décroît uniformément, pour atteindre 0 à la hauteur maximum. Nous désirons déterminer cette hauteur maximum. Utilisons l'équation (1.9) et prenons $v = 0$

$$\Delta x = \frac{v^2 - v_0^2}{2a} = \frac{0 - (19,6 \text{ m s}^{-1})^2}{2(-9,8 \text{ m s}^{-2})} = 19,6 \text{ m}$$

La balle atteint donc une hauteur maximum de $19,6 \text{ m}$ par rapport à la fenêtre, soit $58,8 + 19,6 = 78,4 \text{ m}$ par rapport au sol.

b) Utilisons l'équation (1.5) et le fait que $v = 0$ à la hauteur maximum,

$$t = \frac{v - v_0}{a} = \frac{0 - 19,6 \text{ m s}^{-1}}{-9,8 \text{ m s}^{-2}} = 2 \text{ s}$$

Cette hauteur est donc atteinte en 2 s .

c) La balle touchera le sol lorsque $\Delta x = -58,8 \text{ m}$, soit après un intervalle de temps Δt donné par

$$\begin{aligned} \Delta x &= v_0 \Delta t + \frac{1}{2} a (\Delta t)^2 \\ -58,8 \text{ m} &= (19,6 \text{ m s}^{-1}) \Delta t + \frac{1}{2} (-9,8 \text{ m s}^{-2}) (\Delta t)^2 \end{aligned}$$

Divisons par $4,9 \text{ m s}^{-2}$ et réarrangeons les termes : il vient

$$(\Delta t)^2 - (4 \text{ s})(\Delta t) - 12 \text{ s}^2 = 0$$

Ceci peut être décomposé sous la forme :

$$(\Delta t - 6 \text{ s})(\Delta t + 2 \text{ s}) = 0$$

Cette équation présente deux solutions, $\Delta t = 6 \text{ s}$ et $\Delta t = -2 \text{ s}$. Puisque la balle ne peut pas atteindre le sol avant d'avoir été lancée, $\Delta t = 6 \text{ s}$ représente la réponse correcte. (La seconde racine $\Delta t = -2 \text{ s}$ n'est pas sans signification : elle correspond au lancement d'une seconde balle qui s'effectuerait, à partir du sol, deux secondes avant le lancement de la première. Si cette seconde balle a une vitesse initiale égale en amplitude et opposée à la vitesse d'impact de la première, les deux balles suivront exactement la même trajectoire.)

1.7 Les modèles en physique

Les problèmes réels sont souvent d'une telle complexité qu'une solution exacte ou bien est impossible à trouver, ou alors exige des mesures très délicates et des calculs importants. Cependant, une estimation de la solution exacte peut souvent être obtenue à partir de *modèles mathématiques* basés sur des hypothèses simplificatrices et des approximations.

Dans le paragraphe précédent, nous avons utilisé un modèle lorsque nous avons considéré des objets en chute libre pour lesquels nous avons négligé la résistance de l'air. Pour une pierre ou une pièce de monnaie qui tombe à faible vitesse, cela représente une bonne approximation. Cependant, si la vitesse est grande, la résistance de l'air devient plus importante. Un modèle qui la néglige peut conduire à des résultats erronés. Nous avons également vu qu'il serait tout à fait faux de négliger la résistance de l'air dans le cas d'un objet léger comme, par exemple, un bout de papier.

Les modèles mathématiques peuvent faire apparaître les facteurs importants dans un problème. Ils peuvent fournir une compréhension qualitative qui souvent ne pourrait pas être obtenue à partir d'une approche plus rigoureuse. Les prévisions qui en découlent peuvent indiquer dans quelle mesure un effort plus élaboré vaut la peine d'être entrepris. Elles peuvent également suggérer la stratégie d'un tel effort. Souvent, cependant, les livres – y compris celui-ci – ne sont pas toujours tout à fait explicites dans la manière dont les hypothèses sont établies et dans la distinction qui mérite d'être faite entre modèles et traitements rigoureux. L'étudiant veillera donc à développer son esprit critique.

Pour en savoir plus...**1.8 Le saut en hauteur**

Les équations du mouvement uniformément accéléré peuvent être utilisées pour analyser les sauts des animaux. Le tableau 1.4 donne les hauteurs de saut pour quelques animaux. Il est à noter que la valeur relative au saut en hauteur des hommes est inférieure au record mondial qui vaut environ $2,45 \text{ m}$. Ceci provient du fait qu'un homme mesurant $1,80 \text{ m}$ est déjà dans une position qui lui permet de franchir une barre placée à une hauteur égale à la moitié de sa taille. Il lui suffit de faire pivoter son corps à l'horizontale. La méthode de saut que l'on appelle le

roulé ventral (figure 1.11) n'est pas employée par les animaux. C'est pourquoi les hauteurs reprises dans le tableau 1.4 sont bien celles qui permettent d'établir une comparaison dans les capacités de sauts.

Les animaux peuvent sauter sur place en fléchissant les pattes et en les redressant rapidement. Habituellement, la distance d'accélération d est légèrement plus courte que la longueur des pattes de l'animal. Une fois que l'animal a quitté le sol, il est seulement soumis à l'accélération de la pesanteur. En conséquence, les formules relatives au mouvement uniformément accéléré s'appliquent. Nous pouvons également analyser la détente, si on admet que l'accélération reste constante. Cette hypothèse est utilisée dans l'exemple 1.15.

Les accélérations acquises pendant les élans, ainsi que les durées de ces élans, varient fortement d'un animal à l'autre. Un homme qui sauterait avec la même accélération qu'une puce atteindrait une hauteur supérieure à 50 m ! Malgré ces grandes différences, nous verrons, au chapitre 6, que l'énergie totale fournie par une quantité déterminée de muscles au cours d'un simple saut est pratiquement constante pour tous les animaux.



Figure 1.11 Les sauteurs en hauteur utilisaient auparavant la technique de roulé ventral (a) aujourd'hui, la technique utilisée est appelée Fosbury (b). Dans les deux cas, l'athlète cherche à maintenir la plus grande partie possible de son poids au-dessous de la barre. (a) United Press International ; (b) © BraunS – iStock

	Distance d'accélération (d)	Hauteur verticale (h)
Homme	0,5	1,0
Kangourou	1,0	2,7
Singe lémurien	0,16	2,2
Grenouille	0,09	0,3
Sauterelle	0,03	0,3
Puce	0,0008	0,1

Tableau 1.4 Distances d'accélération d et hauteurs verticales h de quelques animaux. Toutes les distances sont exprimées en mètres.

Exemple 1.15

À partir des données du tableau 1.4, trouver

- la vitesse v_t d'un sauteur au moment où il quitte le sol,
- l'accélération a_t à ce même moment.

Réponse

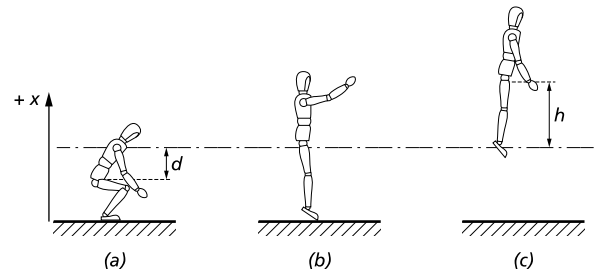


Figure 1.12 Positions durant un saut vertical : (a) accroupi, $v = 0$; (b) en position d'extension au moment où les pieds quittent le sol, $v = v_t$; (c) à la hauteur maximum, $v = 0$. La coordonnée x correspond à la mi-hauteur du sauteur.

a) Soit x la coordonnée qui définit la mi-hauteur du sauteur. Choisissons la direction positive vers le haut (figure 1.17). Pour déterminer la vitesse au moment où le sauteur quitte le sol, considérons la phase aérienne du saut. Durant celle-ci, l'accélération vaut $-g$ et la vitesse varie de $v_0 = v_t$ à $v = 0$. La position varie de $\Delta x = h = 1$ m et la relation $v^2 = v_0^2 + 2a \Delta x$ devient

$$0 = v_t^2 - 2gh$$

ou

$$v_t^2 = 2gh$$

Dès lors,

$$\begin{aligned} v_t &= \sqrt{2gh} = \sqrt{(2)(9,8 \text{ m s}^{-2})(1 \text{ m})} \\ &= 4,4 \text{ m s}^{-1} \end{aligned}$$

b) Nous faisons l'hypothèse que lorsque le sauteur prend son élan, l'accélération a_t reste constante. La vitesse s'accroît de $v_0 = 0$ à $v = v_t$ et la position varie de

$$\Delta x = d = 0,5 \text{ m}$$

Dès lors, pendant la phase d'élan, $v^2 = v_0^2 + 2a \Delta x$ devient

$$v_t^2 = 2a_t d$$

En comparant ce résultat à $v_t^2 = 2gh$, on trouve que

$$\begin{aligned} a_t &= \left(\frac{h}{d}\right)g \\ &= \left(\frac{1 \text{ m}}{0,5 \text{ m}}\right)(9,8 \text{ m s}^{-2}) = 19,6 \text{ m s}^{-2} \end{aligned}$$

Réviser

Ce qu'il faut retenir

Les grandeurs physiques s'évaluent dans un système d'unités. Nous avons décrit une méthode qui permet de passer d'un système d'unités à un autre. Cette méthode consiste à effectuer une multiplication par 1 et à simplifier les unités comme s'il s'agissait de quantités algébriques.

Le mouvement rectiligne d'un objet est décrit par sa position, sa vitesse et son accélération. La vitesse représente la variation de position en fonction du temps. La vitesse moyenne est donc le changement de position intervenant pendant un laps de temps donné, divisé par ce temps :

$$\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

La vitesse instantanée est la vitesse moyenne évaluée pour un intervalle de temps arbitrairement court. Elle correspond à la dérivée de la position par rapport au temps :

$$v = \frac{dx}{dt}$$

D'une façon analogue, on peut définir l'accélération moyenne comme étant la variation de vitesse intervenant pendant un intervalle de temps donné, divisé par ce temps :

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

L'accélération instantanée est l'accélération moyenne évaluée pendant un intervalle de temps arbitrairement court. Elle correspond à la dérivée de la vitesse par rapport au temps :

$$a = \frac{dv}{dt}$$

Dans un graphe $x - t$, la *pente* donne la vitesse instantanée et la *concavité* est reliée à l'accélération instantanée ; dans un graphe $v - t$, la *pente* représente l'accélération instantanée.

L'accélération peut souvent être calculée théoriquement ou mesurée expérimentalement. Si la position et la vitesse initiale sont connues, leurs valeurs ultérieures peuvent être déterminées à partir de l'accélération. Nous avons établi les équations du mouvement dans le cas particulier où l'accélération est constante. Celles-ci sont reprises dans le tableau 1.3. Que l'accélération soit constante ou non, le

déplacement correspond à l'aire sous le graphe $v - t$ et la variation de vitesse est égale à l'aire sous le graphe $a - t$. On considère les aires situées au-dessus de l'axe du temps comme positives et les aires au-dessous de l'axe du temps comme négatives.

Si on néglige la résistance de l'air, on peut considérer que les objets en chute libre au voisinage de la surface terrestre sont tous soumis à une accélération constante égale à $g = 9,8 \text{ m s}^{-2}$. Un objet lancé vers le haut est également soumis à cette accélération. Sa vitesse décroît progressivement en grandeur et devient nulle lorsque l'objet atteint son altitude maximum.

Phrases à compléter

Voir réponses en fin d'ouvrage.

1. Le système d'unités officiellement reconnu dans les travaux scientifiques est le _____.
2. Les résultats expérimentaux sont habituellement affectés d'erreurs _____ et d'erreurs _____.
3. La meilleure méthode pour transformer des unités est de multiplier par un facteur égal à _____ pour chaque unité à transformer.
4. La variation de la position est appelée _____.
5. La vitesse moyenne est le rapport du _____ au _____.
6. La vitesse instantanée est la vitesse moyenne évaluée pour _____.
7. L'accélération moyenne est la _____ divisée par le _____.
8. Dans un graphe $x - t$, la pente représente _____.
9. Dans un graphe $v - t$, la pente représente _____.
10. La variation de vitesse correspond à l'aire dans le graphe _____.
11. Le déplacement correspond à l'aire dans le graphe _____.
12. Dans l'air, une pierre tombe plus rapidement qu'une plume, à cause de _____.
13. Lorsqu'un objet est lancé vers le haut à la verticale, à sa hauteur maximum, sa vitesse est _____ et son accélération vaut _____.

Exercices corrigés

E1. Un ballon est lancé vers le haut avec une vitesse initiale de 10 m s^{-1} . Si, après $0,8 \text{ s}$, une pierre est lancée dans la même direction, quelle doit être sa vitesse initiale pour qu'elle rencontre la balle à une hauteur de 5 m ? Discuter le résultat obtenu.

Solution

Le mouvement du ballon est rectiligne et uniformément accéléré. Si on choisit un axe vertical x orienté vers le haut avec le point de départ comme origine, l'accélération est $a = -g$. La loi du mouvement pour le ballon s'exprime dès lors par :

$$x = v_0(t - t_0) - \frac{1}{2}g(t - t_0)^2$$

où l'instant initial $t_0 = 0$ si l'origine des temps coïncide avec le début du mouvement de la balle.

Le mouvement de la pierre est également rectiligne (vertical) et uniformément accéléré (avec $a' = -g$). La loi du mouvement pour la pierre peut s'écrire :

$$x' = v'_0(t - t'_0) - \frac{1}{2}g(t - t'_0)^2$$

où l'instant initial $t'_0 = 0,8 \text{ s}$.

La pierre touche le ballon lorsque $x = 5 \text{ m}$ et $x' = 5 \text{ m}$:

$$5 = 10t - \frac{1}{2}9,8t^2$$

$$5 = v'_0(t - 0,8) - \frac{1}{2}9,8(t - 0,8)^2$$

On obtient ainsi un système de deux équations à deux inconnues : v'_0 , la vitesse initiale de la pierre, et t , l'instant de rencontre entre la pierre et le ballon. La première égalité fournit l'instant t dont on pourra utiliser la valeur numérique dans la deuxième. La première équation est du deuxième degré avec un discriminant positif. Il existe donc deux solutions :

$$t_1 = 0,88 \text{ s}$$

$$t_2 = 1,16 \text{ s}$$

En utilisant la seconde équation, la vitesse v'_0 s'exprime par :

$$v'_0 = \frac{5 + \frac{1}{2}9,8(t - 0,8)^2}{t - 0,8}$$

et possède les valeurs suivantes, correspondant respectivement aux instants t_1 et t_2 :

$$v'_{01} = 62,89 \text{ m s}^{-1}$$

$$v'_{02} = 15,65 \text{ m s}^{-1}$$

La première solution correspond à la situation où la pierre rejoint le ballon lorsque ce dernier se trouve dans sa phase montante, tandis que la seconde décrit la rencontre lors de la phase descendante de la balle.

E2. Un automobiliste roulant à 144 km h^{-1} perçoit les appels de phare d'un autre qui va le croiser. Il commence alors à freiner avec une décélération de 2 ms^{-2} . Deux secondes après le début de la décélération, il aperçoit un radar à 50 m devant lui. Quelle sera sa vitesse lorsqu'il dépassera le radar s'il maintient la même décélération ?

Solution

Désignons par A le point où se trouve l'automobiliste lorsqu'il perçoit les appels de phare de l'autre véhicule. Soit B le point d'où il aperçoit le radar et C l'endroit où se trouve le radar. La vitesse au point A est donnée : elle vaut $v_A = 144 \text{ km h}^{-1}$ ou 40 m s^{-1} . L'accélération entre A et B est négative et vaut $a = -2 \text{ m s}^{-2}$. La vitesse en B est obtenue par application de la loi :

$$v_B = v_A + a \Delta t = 40 - 2 \times 2 = 36 \text{ m s}^{-1}$$

Enfin, la formule $v_C^2 = v_B^2 + 2a \Delta x$ avec $\Delta x = 50 \text{ m}$ permet d'obtenir la vitesse du véhicule au moment où il passe devant le radar :

$$v_C = \sqrt{36^2 - 2 \times 2 \times 50} = 33,11 \text{ m s}^{-1}$$

S'entraîner

QCM

Voir réponses en fin d'ouvrage.

Q1. Laquelle des longueurs suivantes est la plus grande ?

- a) 10^5 cm
- b) 10^5 mm
- c) $10^7 \text{ } \mu\text{m}$
- d) 10^{10} nm
- e) aucune.

Q2. Une femtoseconde correspond à :

- a) 10^{-12} s
- b) -12 s

- c) 10^{-15} s
d) 10^{15} s
e) aucune de ces quantités.
- Q3.** Un objet, lancé verticalement vers le haut, retombe sous l'effet de la pesanteur. Au sommet de sa trajectoire :
- a) $a = 0$
b) $v = 0$
c) $a > 0$
d) $v > 0$
e) aucune de ces réponses.
- Q4.** Une voiture soumise à une accélération horizontale constante a une vitesse qui augmente linéairement avec :
- a) le temps
b) la distance
c) le temps au carré
d) la distance au carré
e) aucune de ces réponses.
- Q5.** L'expression $\Delta x = v_0 \Delta t + \frac{1}{2} a (\Delta t)^2$ est valable lorsque :
- a) x est constant
b) v est constant
c) a est constant
d) toujours
e) jamais.
- Q6.** Un corps se déplace en ligne droite avec une accélération constante. Le graphique de l'accélération (ordonnée verticale) en fonction du temps (abscisse horizontale) est :
- a) une droite verticale
b) une droite horizontale
c) une droite inclinée de 45°
d) une parabole
e) aucune de ces réponses.
- Q7.** Lorsqu'on lâche un objet d'une hauteur h_1 , il frappe le sol avec une vitesse v . Lorsqu'on le lâche d'une hauteur h_2 , il frappe le sol avec une vitesse $2v$. On a :
- a) $h_2 = h_1 / 2$
b) $h_2 = 2h_1$
c) $h_2 = 4 h_1$
d) $h_2 = 8h_1$
e) aucune de ces réponses.
- Q8.** Le temps de chute d'une cerise qui s'est détachée d'un arbre avec une vitesse nulle et d'une hauteur de 4,9 m vaut :
- a) 9,8 s
b) 19,6 s
c) 2 s
d) $\sqrt{2}$ s
e) 1 s.
- Q9.** Si le déplacement d'un objet est une fonction quadratique du temps, cet objet se déplace avec :
- a) une accélération constante
b) une vitesse constante
c) une accélération croissante
d) une accélération nulle
e) aucune de ces réponses.
- Q10.** Un automobiliste roulant à une vitesse de 5 m s^{-1} arrête son véhicule sur une distance de 2,5 m. S'il roule à la vitesse de 10 m s^{-1} et arrête son véhicule avec la même décélération, la distance d'arrêt sera :
- a) 5 m
b) 6,25 m
c) 10 m
d) 12 m
e) aucune de ces réponses.
- Q11.** Soit le graphique d'un véhicule en mouvement rectiligne. Quelle proposition est correcte ?
- a) Le véhicule subit une accélération décroissante.
b) Après 15 secondes, l'objet est revenu au point de départ.
c) Le module de la vitesse diminue à chaque instant entre $t = 0$ s et $t = 25$ s.
d) Après 15 secondes, le véhicule fait demi-tour.

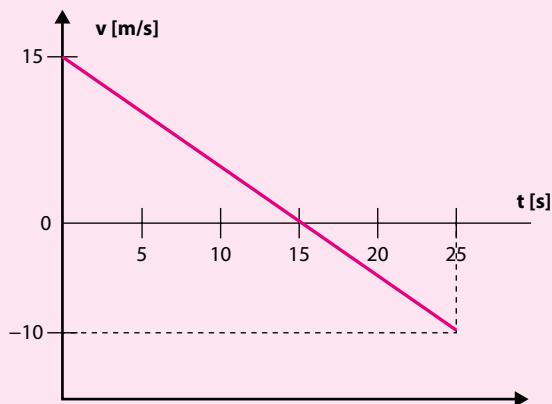


Figure 1.13

- Q12.** Soient deux mobiles se déplaçant sur une même ligne droite. À l'instant t_i (intersection des deux droites),
- les mobiles (1) et (2) se croisent
 - le mobile (1) a parcouru une plus grande distance que le mobile (2) entre l'instant initial $t = 0$ s et l'instant t_i .
 - le mobile (2) dépasse le mobile (1)
 - le mobile (2) subit une plus grande accélération que le mobile (1).

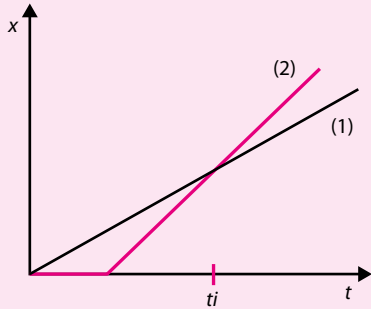


Figure 1.14

- Q13.** Un camion vide roule à grande vitesse. Apercevant un obstacle, le conducteur « saute » sur les freins et parcourt une distance d avant de s'arrêter. Un second camion, identique au premier, roule avec une vitesse réduite de moitié et freine de la même manière. Sur quelle distance le second camion va-t-il s'arrêter ?
- $d/4$
 - $d/2$
 - $\sqrt{2} \cdot d$
 - $2d$

Exercices

Voir réponses en fin d'ouvrage pour les exercices et problèmes dont le numéro est inscrit en noir.

Avant d'entreprendre la résolution des problèmes, l'étudiant devrait résoudre quelques exercices de manière à tester sa compréhension générale des concepts. Les résultats de la plupart des exercices et des problèmes portant un numéro impair sont donnés à la fin du livre, généralement avec trois chiffres significatifs. Si vos réponses diffèrent légèrement quant au dernier chiffre, cette différence peut provenir de simplifications effectuées dans les calculs intermédiaires plutôt que d'une erreur réelle dans la résolution.

Mesures, étalons, unités et erreurs

1.1 Un acre vaut 43 560 pieds². Que vaut cette surface en m² ?

1.2 Transformer 40 mi h⁻¹ en mètres par seconde (m s⁻¹).

1.3 Un gallon vaut 231 pouces cubes et un litre vaut 1 000 cm³. Quelle est la capacité d'un gallon en litres ?

1.4 Le furlong est une unité anglaise qui vaut 220 yards (1 yard = 0,914 m). Si un escargot se déplace à la vitesse de 2 m h⁻¹, quelle distance, en furlongs, parcourt-il en 15 jours ?

1.5 Une membrane cellulaire a une épaisseur de 70 angströms (Å). Si un angström vaut 10⁻¹⁰ m, que vaut l'épaisseur de la membrane,

- en mètres
- en micromètres ?

1.6 Si deux grandeurs ont des dimensions différentes, peuvent-elles être

- multipliées
- additionnées ?

Donner des exemples aux réponses.

1.7 Aux États-Unis, les terrains se mesurent en acres (1 acre = 43 560 pieds²). Dans la plupart des autres pays, ils sont mesurés en hectares (1 hectare = 10⁴ m²). Exprimer, en hectares, la superficie d'une ferme de 100 acres.

1.8 Le volume des réservoirs se mesure parfois, aux États-Unis, en acres-pieds ; ainsi, un lac qui a une superficie de 1 acre et une profondeur moyenne de 1 pied contient 1 acre-pied d'eau. Si un lac a une surface de 100 acres et une profondeur moyenne de 20 pieds, évaluer son volume

- en acres-pieds
- en pieds³
- en m³ (1 acre = 43 560 pieds²).

1.9 Supposons que l'on désire connaître la surface d'une pièce rectangulaire et que l'on dispose d'un mètre ruban pour en déterminer les dimensions.

Quelles sont les erreurs systématiques et accidentelles associées à ces mesures ?

1.10 Un conducteur souhaite étalonner son tachymètre en parcourant, à vitesse constante, une grand-route jalonnée de bornes repères, tous les kilomètres. Il est accompagné d'un passager qui mesure les intervalles de temps à l'aide d'un chronomètre. Discuter les erreurs systématiques et accidentelles qui interviennent dans cet étalonnage.

Le déplacement, la vitesse moyenne

1.11 Une voiture parcourt 30 kilomètres de ligne droite en 45 minutes. Que vaut la vitesse moyenne exprimée en kilomètres par heure (km h^{-1}) ?

1.12 Un pilote effectue un vol de 2 000 km en 4 heures. Quelle est sa vitesse moyenne, en mètres par seconde, pendant ce vol ?

1.13 Établir un graphe de la position d'une voiture en fonction du temps, si cette voiture part du repos et effectue un trajet d'un kilomètre. (Décrire le mouvement.)

1.14 Une voiture se déplace en ligne droite à la vitesse de 40 km h^{-1} durant 1 heure et à la vitesse de 60 km h^{-1} durant 2 h.

a) Quelle sera la distance totale parcourue ?

b) Évaluer la vitesse moyenne.

1.15 Une conductrice souhaite parcourir 100 kilomètres en 2 h. Si elle roule à la vitesse moyenne de 40 km h^{-1} pendant la première heure et demie, quelle vitesse moyenne doit-elle maintenir pendant le reste du temps ?

1.16 Un homme court un marathon (42 km) en 2 h 1/2. Évaluer sa vitesse moyenne

a) en kilomètres par heure (km h^{-1})

b) en mètres par seconde (m s^{-1}).

1.17 Un sprinter court le 100 m en 9,8 secondes.

a) Que vaut sa vitesse moyenne ?

b) Puisque le coureur part du repos, la vitesse ne peut pas être constante. Établir un graphe approximatif du déplacement en fonction du temps. Expliquer les hypothèses faites.

1.18 La lumière se déplace à la vitesse de $3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$. Une année-lumière représente la distance parcourue par la lumière en 1 an (365 jours). Évaluer la distance, en kilomètres, de l'étoile la plus proche si celle-ci se situe à 4 années-lumière de nous.

1.19 La position d'un objet tombant d'une hauteur x varie, en fonction du temps, suivant la relation

$$x = 100 \text{ m} - (4,9 \text{ m s}^{-2})t^2$$

Évaluer sa vitesse moyenne

a) entre $t = 0$ et $t = 2 \text{ s}$

b) entre $t = 2$ et $t = 4 \text{ s}$.

1.20 Une balle lancée à la verticale atteint, par rapport au sol, une hauteur x qui est donnée par l'équation

$$x = (19,6 \text{ m s}^{-1})t - (4,9 \text{ m s}^{-2})t^2$$

Trouver la vitesse moyenne

a) entre $t = 0$ et $t = 2 \text{ s}$

b) entre $t = 2$ et $t = 4 \text{ s}$

1.21 À partir du graphe de la figure 1.15 donnant la position d'un objet en fonction du temps, évaluer la vitesse moyenne entre $t = 0 \text{ s}$ et

a) $t = 10 \text{ s}$

b) $t = 20 \text{ s}$

c) $t = 40 \text{ s}$.

1.22 En 1970, un nageur a établi le record du 100 m à 51,9 s. Quelle était sa vitesse moyenne en km h^{-1} ?

La vitesse instantanée

1.23 Dans la figure 1.15, que vaut la vitesse instantanée lorsque

a) $t = 5 \text{ s}$

b) $t = 15 \text{ s}$

c) $t = 25 \text{ s}$

d) $t = 35 \text{ s}$?

1.24 Dessiner le graphe représentant la vitesse instantanée en fonction du temps correspondant à la figure 1.15.

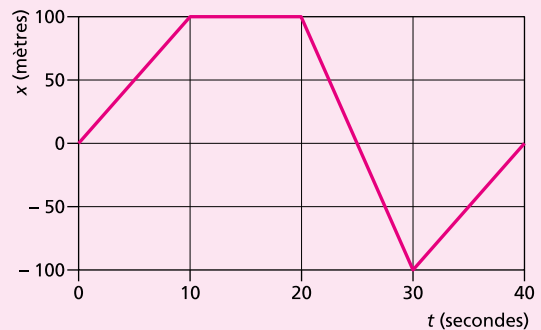


Figure 1.15 Exercices 1.21, 1.23 et 1.24.

1.25 La figure 1.16 montre la position d'un pendule en fonction du temps. Au cours de l'intervalle de temps compris entre $t = 0$ et T , quand la vitesse est-elle

a) nulle

b) positive

c) négative ?

1.26 La figure 1.16 montre la position d'un pendule en fonction du temps. Dans l'intervalle de temps compris entre $t = 0$ et T , quand la vitesse atteint-elle sa valeur positive la plus grande et sa valeur négative la plus grande ?

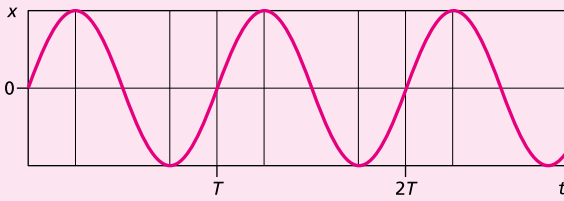


Figure 1.16 Position horizontale d'un pendule en fonction du temps. Exercices 1.25 et 1.26. Problème 1.67.

1.27 En 1875, Matthew Webb a effectué la première traversée de la Manche à la nage, sans gilet de sauvetage. Il lui a fallu 21 heures et 45 minutes pour parcourir les 33,8 km.

- Quelle était sa vitesse moyenne en km h^{-1} ?
- Puisqu'il ne nageait pas en ligne droite, il a en fait parcouru une distance de 60 km. Quelle fut sa vitesse moyenne ?

1.28 La vitesse maximum atteinte par un coureur au cours d'un 100 m vaut $12,5 \text{ m s}^{-1}$. Il a effectué la course en 9,9 s. Ces valeurs sont-elles compatibles ? Expliquer.

L'accélération

1.29 Une voiture est sur le point d'en dépasser une autre. Sa vitesse augmente de 50 à 100 km h^{-1} en 4 s. Que vaut l'accélération moyenne ?

1.30 Une voiture se déplace à la vitesse constante de 50 m s^{-1} pendant 20 s. Elle ralentit ensuite avec une décélération constante et s'arrête 10 s plus tard. Dessiner le graphe vitesse-temps de la voiture. Dessiner le graphe accélération-temps.

1.31 Dessiner le graphe accélération-temps correspondant à la figure 1.17.

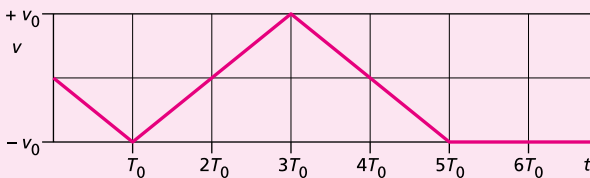


Figure 1.17 Exercices 1.32 et 1.33.

1.32 Quand l'accélération relative à la figure 1.17 atteint-elle

- une valeur maximum
- une valeur minimum
- une valeur nulle ?

1.33 Une voiture, qui a une vitesse initiale de 20 m s^{-1} , freine avec une décélération de 2 m s^{-2} . Quel temps lui faudra-t-il pour s'arrêter ?

Détermination du mouvement d'un objet

1.34 Un avion part du repos et s'élance pour décoller avec une accélération de 4 m s^{-2} . Évaluer

- la distance parcourue après 5 s
- la vitesse après 5 s.

1.35 Dans l'accélérateur représenté sur la figure 1.1, des protons émergent avec une vitesse de $2,5 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$. L'accélérateur a une longueur de 0,8 km.

- Si l'accélération est uniforme, quelle est sa valeur ?
- Quel temps faut-il aux protons pour parcourir la longueur de l'accélérateur ?

1.36 Un train a une vitesse initiale de 30 m s^{-1} . Il freine et s'arrête avec une décélération uniforme en 50 s.

- Que vaut la décélération du train ?
- Quelle distance parcourt-il avant de s'arrêter ?

1.37 Une voiture part du repos, au temps $t = 0$, et accélère comme indiqué sur la figure 1.18. Trouver sa vitesse après

- $t = 10 \text{ s}$
- $t = 30 \text{ s}$. Dessiner le graphe de la vitesse en fonction du temps.

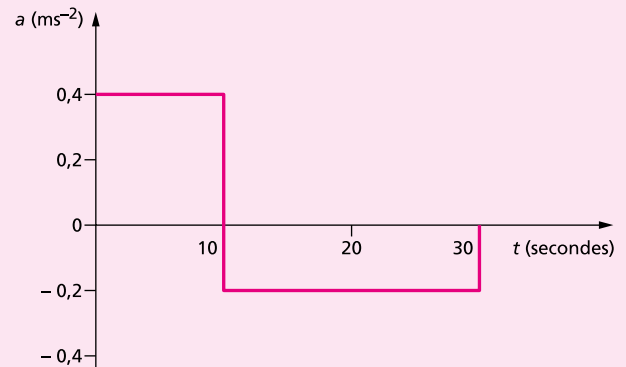


Figure 1.18 Exercice 1.37.

1.38 Partant du graphe de la vitesse d'un objet donné à la figure 1.19, déduisez celui de l'accélération. Sachant que l'objet part de $x = 0$, calculer sa position en $t = 1 \text{ s}$, 2 s , 3 s et 4 s . Que vaut sa vitesse moyenne sur l'intervalle entre 0 et 4 s ?

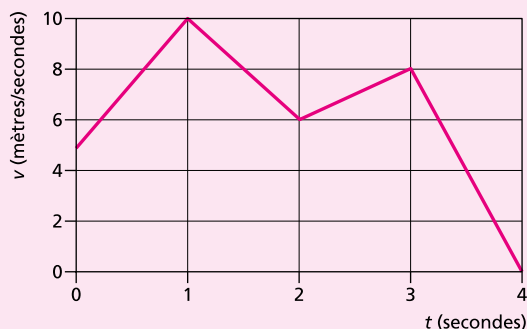


Figure 1.19 Exercice 1.38.

1.39 Supposons qu'une voiture puisse avoir une accélération de 1 m s^{-2} . Quel espace doit-il y avoir dans une file de véhicules pour permettre à la voiture de s'y insérer ? Les véhicules, dans la file, se déplacent à la vitesse de 20 m s^{-1} . Le conducteur de la voiture ne souhaite pas forcer le véhicule qui le suit à ralentir. Il ne souhaite pas non plus que ce véhicule se rapproche à moins de 25 m de sa voiture.

1.40 Une voiture, se déplaçant à 15 m s^{-1} percute un mur de pierres.

- Un passager, portant une ceinture de sécurité, s'immobilise sur une distance de 1 m. Quelle est la décélération moyenne de cette personne ?
- Un autre passager, sans ceinture de sécurité, frappe le pare-brise et s'immobilise sur une distance de 0,01 m. Quelle est la décélération moyenne de cette personne ?

1.41 Une voiture de course, initialement au repos, démarre avec une accélération constante et parcourt une distance de 0,5 km. Sa vitesse finale est de 100 m s^{-1} .

- Que vaut l'accélération de la voiture ?
- Combien de temps lui faut-il pour parcourir la distance de 0,5 km ?

1.42 Une balle initialement au repos et accélérée de manière constante sur une distance de 2 m atteint une vitesse de 40 m s^{-1} . Que vaut l'accélération à laquelle elle a été soumise ?

1.43 Un joueur de base-ball rattrape une balle qui a une vitesse de 30 m s^{-1} .

- S'il ne déplace pas la main, la balle s'immobilise dans son gant en parcourant une distance de 1 cm. Que vaut la décélération moyenne ?
- Si, en rattrapant la balle, il déplace la main de manière que la balle s'arrête sur une distance de 10 cm, que vaut la décélération ?

Accélération de la pesanteur et objets en chute libre

1.44 Quelle doit être la hauteur d'une chute d'eau pour que l'eau atteigne la roue d'une turbine avec une vitesse verticale de 30 m s^{-1} ?

1.45 Un obus anti-aérien est tiré à la verticale avec une vitesse initiale de 500 m s^{-1} .

- Calculer la hauteur maximum de l'obus.
- Quel temps lui faut-il pour atteindre cette hauteur ?
- À quel moment l'obus atteindra-t-il une hauteur de 1 000 m ?

1.46 Une fusée d'essai est lancée à la verticale, à partir du sol, avec une accélération constante de 50 m s^{-2} . Elle épuise son carburant après 4 s. En négligeant la résistance de l'air, trouver

- la hauteur de la fusée lorsque le moteur s'arrête
- la hauteur maximum atteinte
- la durée totale du vol.

1.47 Une pierre tombe d'une falaise de 60 m.

- Trouver la vitesse moyenne pendant les 3 premières secondes de la chute.
- À quel moment la vitesse instantanée sera-t-elle égale à la vitesse moyenne évaluée en a) ?
- Quel temps faut-il à la pierre pour atteindre le sol ?

1.48 Un enfant, se trouvant à côté d'un immeuble, lance une balle vers le haut avec une vitesse initiale de 15 m s^{-1} .

- Quelle hauteur la balle atteindra-t-elle ?
- Combien de temps faudra-t-il à la balle pour atteindre cette hauteur ?
- Un autre enfant se penche à la fenêtre, à 6 m de haut, et tente d'attraper la balle. À quel moment la balle passera-t-elle à sa hauteur ?

1.49 Une pierre, lâchée du dessus d'une tour, atteint le sol après 4 s.

- Trouver la vitesse de la pierre au moment où elle atteint le sol.
- Trouver la hauteur de la tour.

1.50 Une personne placée sur un pont qui enjambe une rivière lance une pierre vers le haut suivant une verticale passant un peu à côté du pont, avec une vitesse initiale de 5 m s^{-1} . Quelle sera la hauteur maximale atteinte par la pierre ? Quelle sera la vitesse de la pierre à son arrivée dans la rivière située 15 m en dessous du pont ? Quel

intervalle de temps s'est écoulé entre le lancé de la pierre et son arrivée dans la rivière ?

1.51 Un sac de sable, lâché d'un ballon, atteint le sol après 15 s. Quelle était la hauteur du ballon si, initialement, celui-ci

a) était immobile

b) descendait à une vitesse de 20 m s^{-1} ?

1.52 Une boîte tombe d'un ascenseur qui s'élève à la vitesse de 2 m s^{-1} . La boîte atteint le fond du puits de l'ascenseur après 3 s.

a) Quel temps faudra-t-il à la boîte pour atteindre sa hauteur maximum par rapport au fond du puits ?

b) Par rapport au fond du puits, à quelle hauteur la boîte a-t-elle été larguée ?

c) À quelle hauteur se trouvera l'ascenseur lorsque la boîte atteindra sa hauteur maximum ?

1.53 Refaire l'exemple 1.13 en prenant la direction $+x$ vers le bas.

1.54 Refaire l'exemple 1.14 en prenant la direction $+x$ vers le bas.

1.55 Une voiture qui se déplace à la vitesse de 30 m s^{-1} (108 km h^{-1}) entre en collision frontale avec un mur de pierres. De quelle hauteur faudrait-il que la voiture tombe pour subir le même dommage ?

Le saut en hauteur

1.56 Un saumon saute verticalement hors de l'eau, avec une vitesse initiale de 6 m s^{-1} .

a) Quelle hauteur atteindra-t-il ?

b) Pendant combien de temps le saumon sera-t-il hors de l'eau ?

1.57 Quelle hauteur atteindrait une femme lors d'un saut si sa vitesse au moment où elle quitte le sol était égale à la vitesse initiale d'une puce lors d'un saut vertical ?

1.58 À partir du tableau 1.4, calculer l'accélération moyenne au cours de l'élan et la vitesse de décollage d'une sauterelle. On suppose l'accélération constante. Comparer ces résultats à ceux de l'exemple 1.15.

1.59 Un astronaute, portant une combinaison spatiale, peut effectuer un saut vertical de $0,5 \text{ m}$ à la surface de la Terre. Sur Mars, l'accélération gravitationnelle vaut $0,4$ fois celle de la Terre. Si la vitesse au moment de quitter le sol est la même, quelle sera la hauteur du saut sur Mars ?

1.60 Si un homme pouvait atteindre la même accélération qu'une puce pendant l'élan, à quelle hauteur pourrait-il

sauter ? (supposer que la distance d'accélération est encore de $0,5 \text{ m}$).

1.61 À partir du tableau 1.4, calculer les temps correspondant au décollage pour un homme, un singe lémurien et une puce.

Problèmes

1.62 Une pierre est lâchée sans vitesse initiale du sommet d'un immeuble de 30 m de hauteur. Une demi-seconde plus tard, une deuxième pierre est jetée verticalement vers le bas avec une vitesse de 20 m s^{-1} . À quelle hauteur, par rapport à la base de l'immeuble, la deuxième pierre rattrape-t-elle la première ?

1.63 De la fenêtre de sa chambre située à 18 m au-dessus du sol, un étudiant désire lâcher un ballon rempli d'eau sur un passant. Ce dernier mesure $1,7 \text{ m}$ et se dirige vers le point A, situé à la verticale de la fenêtre, en marchant à une vitesse de $0,45 \text{ m s}^{-1}$. Si le ballon atteint le passant, à quelle distance du point A ce dernier se trouvait-il au moment où l'étudiant a lâché le ballon ?

1.64 Lorsqu'un joueur lance une boule de bowling, sa main se déplace, par rapport à son avant-bras, à la vitesse de $0,82 \text{ m s}^{-1}$. L'avant-bras a une vitesse relative de $0,55 \text{ m s}^{-1}$ par rapport à la partie supérieure du bras. Celui-ci se déplace par rapport à l'épaule à la vitesse de $5,27 \text{ m s}^{-1}$. (Les vitesses correspondent aux extrémités des parties du corps et elles sont toutes horizontales.) Si l'épaule du joueur a une vitesse par rapport au sol de $1,43 \text{ m s}^{-1}$, quelle est la vitesse de lancement de la boule ?

1.65 Une jeune fille rame 12 km en 2 h , dans le sens du courant. Le retour lui prend 3 h .

a) À quelle vitesse peut-elle ramer en eau calme ?

b) Quelle est la vitesse du courant ?

1.66 Un garçon est à bord d'un train qui se déplace à 70 km h^{-1} . Quelle sera sa vitesse par rapport au sol s'il se met à courir dans le couloir à la vitesse de 15 km h^{-1}

a) dans le sens de la marche du train ?

b) en sens inverse ?

1.67 La figure 1.16 donne le graphe de la position d'un pendule en fonction du temps. Tracer les graphes de la vitesse en fonction du temps et de l'accélération en fonction du temps pour le même mouvement.

1.68 Un traîneau part du repos et glisse le long d'une pente avec une accélération uniforme. Il parcourt 12 m au cours des 4 premières secondes. Quand atteindra-t-il une vitesse de 4 m s^{-1} ?