

Stéphane CARDINI, Damien JURINE et Bernard SALAMITO

Valérie Bouland, Rachel Comte, François Crépin, Luc Gauthier,

Tom Morel et Marie-Noëlle Sanz

PHYSIQUE

PCSI


TOUT-EN-UN

6^e édition

DUNOD

l'intégrale

Conception et création de couverture : Hokus Pokus Créations

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

© Dunod, 2013, 2016, 2019, 2021

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-079052-4

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

Les auteurs



Stéphane Cardini

Ancien élève de l'ENS (Paris-Saclay, ex-Cachan), agrégé de sciences physiques, professeur de chaire supérieure. Depuis plus de 20 ans, il enseigne en seconde année de CPGE à Saint-Cyr et participe à des jurys de concours, tant à l'écrit qu'à l'oral. Il a dirigé le Tout-en-un de PSI-PSI*. Il préside la Société des agrégés de l'Université.



Damien Jurine

Ancien élève de l'ENS (Paris Sciences Lettres, ex Ulm), il est titulaire d'un doctorat de géophysique interne de l'Université Paris VII et professeur agrégé de sciences physiques. Depuis 15 ans, il enseigne avec passion la physique dans la filière PCSI au lycée Saint-Louis à Paris.



Bernard Salamito

Ancien élève de l'ENS (Paris Sciences Lettres, ex Ulm), il est professeur de chaire supérieure enseignant au lycée François 1^{er} de Fontainebleau en classe de seconde année MP. Il a participé aux jurys de plusieurs concours, à l'écrit et à l'oral.



Valérie Bouland

Diplômée de Telecom SudParis, ancienne élève de l'ENS (Paris-Saclay, ex Cachan), agrégée de sciences physiques et docteure en télécommunications de Telecom ParisTech. Elle a enseigné en PTSI, PT et PC et est actuellement en poste en MPSI au lycée Claude Bernard, à Paris. Elle est membre de jury de concours.



Rachel Comte

Ancienne élève de l'ENS (Paris-Saclay, ex-Cachan), est agrégée de sciences physiques. Après une année de médiation au Palais de la découverte, elle a enseigné 6 ans en première année de CPGE au lycée Janson de Sailly à Paris. Elle est maintenant professeure en première année de CPGE au lycée Marcelin Berthelot de Saint Maur. Elle a co-écrit le livre *La Physique Chimie aux concours, sélection de sujets portant sur le programme de 1^{re} année* chez Dunod. Elle participe à des jurys de concours, tant à l'écrit qu'à l'oral.



François Crépin

Ancien élève de l'ENS Lyon, il est professeur agrégé de sciences physiques. Après avoir soutenu une thèse de physique théorique à l'Université Paris Sud (aujourd'hui Paris-Saclay), il a été chercheur en Allemagne et en France. Il enseigne aujourd'hui en PCSI au lycée Saint-Louis.



Luc Gauthier

Diplômé de l'École nationale supérieure des industries chimiques (ENSIC), élève de l'ENS (Paris-Saclay, ex-Cachan), agrégé de sciences-physiques. Après avoir enseigné au lycée La Fayette de Clermont-Ferrand en seconde année de CPGE, il enseigne en première année de CPGE à Saint-Cyr et participe à des jurys de concours.



Tom Morel

Agrégé de sciences physiques, il enseigne en MPSI au lycée Marcelin Berthelot à Saint-Maur-des-Fossés et participe aux jurys des concours ENS et CCINP, tant à l'écrit qu'à l'oral. Il a co-écrit le livre *La Physique Chimie aux concours, sélection de sujets portant sur le programme de 1^{re} année* chez Dunod.

« Mode d'emploi » d'un chapitre

Une introduction présente le sujet traité et le plan suivi.

Oscillateur harmonique

6

Dans ce chapitre, on introduit un modèle physique qui produit un signal sinusoïdal appelé l'**oscillateur harmonique**. Les adjectifs harmonique et sinusoïdal sont synonymes : on rencontre parfois les expressions « signal harmonique » ou « oscillateur sinusoïdal ».

Les définitions importantes sont placées dans un encadré gris, les remarques et les exemples comportent un filet vertical sur la gauche.

On appelle alors la **profondeur de champ** l'étendue de la zone de netteté obtenue sur la photographie. Il s'agit alors de la distance entre les premiers et les derniers éléments nets d'une image.

Si une photo comporte de nombreux éléments nets on parlera d'une grande profondeur de champ. Si à l'inverse seuls quelques plans de l'objet apparaissent nets on parlera d'une courte (ou faible) profondeur de champ.

Remarque

Les conséquences de la loi d'Ohm qui ont été vues en courant continu sont valables en régime variable, notamment les formules des diviseurs de tension et de courant.

Exemple

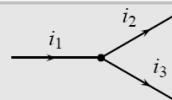
La résistance de sortie R_s d'un générateur de fonction est de l'ordre de 50Ω . Branché aux bornes d'une résistance de l'ordre du $k\Omega$, donc très supérieures à R_s , il se comporte pratiquement comme un générateur idéal, d'après la remarque de la page 121.

À la suite du cours, dans chaque chapitre, sont placées différentes questions de méthodologie entièrement traitées.

MÉTHODOLOGIE

Comment utiliser la loi des nœuds ?

▷ Les intensités entrantes sont égales aux les intensités sortantes : $i_1 = i_2 + i_3$.



Le programme officiel pour chaque thématique et le sommaire des exercices sont proposés à la fin de chaque cours.

PROGRAMME OFFICIEL ET SOMMAIRE DES EXERCICES	
NOTIONS ET CONTENUS	CAPACITÉS EXIGIBLES
Oscillateur harmonique. Exemples du circuit LC et de l'oscillateur mécanique.	Établir et reconnaître l'équation différentielle qui caractérise un oscillateur harmonique ; la résoudre compte tenu des conditions initiales. ▶ 6.C1 6.C2 Caractériser le mouvement en utilisant les notions d'amplitude, de phase, de période, de fréquence, de pulsation. ▶ 6.C3 ▷ 6.1 6.2 6.3 6.4 6.5 Réaliser un bilan énergétique. ▶ 6.C4 ▷ 6.6 6.7 6.8

Des exercices dont la difficulté est traduite par des étoiles allant de 1 à 4 sont proposés en fin de chapitre. On distinguera :

- les exercices de cours qui reprennent les capacités exigibles du programme et classés une étoile ;

EXERCICES ★	
6.C1	Oscillateur harmonique électrique Établir l'équation différentielle qui régit l'évolution de la tension u_C , aux bornes du condensateur, pour le circuit de la figure 6.3, p. 177. Préciser la pulsation propre du système.

- d'autres exercices allant de 2 à 4 étoiles.

1.1	Doublage de fréquence Le rayon laser utilisé à l'observatoire du CERGA pour mesurer la distance Terre-Lune est obtenu par doublage de fréquence à partir d'un laser de longueur d'onde $\lambda_1 = 1,064 \mu\text{m}$. 1) Quelle est la longueur d'onde λ_2 de la lumière envoyée vers la Lune ? Quelle est sa couleur ?
------------	--

Tous les exercices sont entièrement corrigés.

CORRIGÉS	
7.C1	1) C'est la sortie du montage quand l'entrée est nulle pour $t < 0$ et est une constante positive pour $t > 0$. 2) Plus la résistance est importante, plus les pertes Joules sont importantes, donc plus le système est amorti : ξ_2 (qui correspond à R_2) $>$ ξ_1 (qui correspond à R_1) ou $Q_2 < Q_1$. Le graphe de gauche oscille beaucoup, le système est peu amorti, il correspond à R_1 , résistance la plus faible ; le graphe de droite est très amorti, il correspond à R_2 , résistance la plus forte.

Avant-propos

La nouvelle édition du *Tout-en-un* reprend les fondamentaux qui ont assuré, édition après édition, le succès de l'ouvrage, tout en évoluant pour rester le plus proche, tant de la formation initiales des lycéens, que des attentes des jurys de concours.

Les étudiants en classes préparatoires y trouveront :

- un cours complet qui respecte les programmes officiels, afin de les guider dans leur apprentissage ;
- une méthodologie systématique, qui souligne les méthodes classiques, indispensables pour comprendre comment appréhender un problème de physique, puis le résoudre au mieux ;
- le programme officiel et le sommaire des exercices ;
- de très nombreux exercices de niveaux variés, en fin de chapitres, certains issus de problèmes de concours, souvent extrêmement récents, et de sujets d'oraux très actuels. La longue expérience au sein de jurys de concours des auteurs a permis de confronter les différentes pratiques et de sélectionner les exercices et problèmes les plus formateurs, adaptés à tous les étudiants, dont le niveau de difficulté est signalé :
 - * exercices de cours, dont la maîtrise est indispensable ;
 - ** exercices simples et formateurs ;
 - *** exercices de niveau ambitieux ;
 - **** exercices de niveau très élevé, pour se préparer aux classes étoilées les plus exigeantes.

Les auteurs proposèrent un grand nombre d'exercices afin que les étudiants les plus rapides pussent trouver à s'exercer efficacement. Néanmoins, un étudiant de niveau intermédiaire n'aura pas le temps pendant son année de tous les traiter ; ce qui n'est pas rédhibitoire avec un passage en seconde année puis une belle intégration.

Les auteurs remercient tous les collègues et lecteurs qui prirent le temps de nous adresser leurs remarques et leurs encouragements.

Pour finir, puisse ce livre être un compagnon qui aidera chaque lecteur à s'épanouir dans son travail et à apprécier cette introduction au noble travail d'ingénieur !

Table des matières

Avant-propos	1
I Optique géométrique	27
1 Sources lumineuses, modèle de l'optique géométrique	29
1 Description et propriétés de la lumière	29
1.1 Nature de la lumière	29
1.2 Spectre de la lumière	30
1.3 Propagation de la lumière	30
2 Les sources lumineuses	31
2.1 Sources thermique	31
2.2 Sources spectrales	32
2.3 Sources laser	33
3 Modèle géométrique de la lumière	33
3.1 Cadre de l'approximation géométrique	33
3.2 Notion de rayon lumineux	34
3.3 Propagation rectiligne	34
4 Lois de Snell-Descartes	34
4.1 Définitions	35
4.2 Énoncé des lois	35
4.3 Détails sur la réfraction	35
4.4 Réflexion totale	36
Méthodologie, programme officiel et sommaire des exercices	37
Exercices	38
Corrigés	42

TABLE DES MATIÈRES

2	Optique géométrique	47
1	Miroir plan	47
1.1	Image d'un point objet par un miroir plan	47
1.2	Image d'un objet par un miroir plan	48
2	Systèmes centrés et approximation de Gauss	48
2.1	Systèmes optiques centrés	48
2.2	Approximation de Gauss	49
2.3	Propriétés d'un système centré dans les conditions de Gauss	49
2.4	Foyers objet, foyers image	51
3	Lentilles minces	52
3.1	Présentation des lentilles	52
3.2	Constructions géométriques	54
3.3	Relations de conjugaison	57
4	Projection d'une image par une lentille	58
4.1	Position du problème	58
4.2	Choix de la lentille	59
4.3	Éclairage de l'objet	60
	Méthodologie	61
	Programme officiel et sommaire des exercices	63
	Exercices	64
	Corrigés	68
3	Modèles de dispositifs optiques	73
1	L'œil	73
1.1	Description et modèle optique	73
1.2	Fonctionnement de l'œil	73
2	L'appareil photo	75
2.1	Principe de fonctionnement	75
2.2	Influence de la durée d'exposition	77
2.3	Influence du diamètre du diaphragme	78
2.4	Influence de la distance focale	79
3	La fibre à saut d'indice	81
3.1	Cône d'acceptance	81
3.2	Dispersion intermodale	82
4	Quelques dispositifs optiques à plusieurs lentilles	84
4.1	Principe général d'une lunette	84
4.2	La lunette astronomique	85
4.3	La lunette de Galilée	86

4.4	Le microscope	86
	Méthodologie	88
	Programme officiel et sommaire des exercices	91
	Exercices	92
	Corrigés	98

II Signaux électriques 107

4 Circuits électriques dans l'ARQS 109

1	Intensité du courant électrique	109
1.1	Charge électrique	109
1.2	Conducteurs électriques	110
1.3	Le courant électrique	111
1.4	Intensité d'un courant stationnaire dans un fil	112
1.5	Mesure de l'intensité d'un courant	113
1.6	L'approximation des régimes quasi-stationnaires (ARQS)	113
1.7	Intensité d'un courant variable	114
1.8	Loi des nœuds	114
2	Circuit électrique	115
3	Tension électrique	116
3.1	Mesure d'une tension	116
3.2	Additivité des tensions	117
3.3	Loi des mailles	117
3.4	Potentiel électrique	118
3.5	La masse	119
4	Dipôles électrocinétiques en courant continu	119
4.1	Puissance, conventions générateur et récepteur	119
4.2	Caractéristique d'un dipôle en courant continu	120
4.3	Le résistor	121
4.4	Les générateurs de tension	121
4.5	Point de fonctionnement d'un circuit	123
5	Associations de dipôles	123
5.1	Associations série et parallèle	123
5.2	Lois d'association des résistances	124
5.3	Associations de générateurs	124
6	Ponts diviseurs	124
6.1	Diviseur de tension	124

TABLE DES MATIÈRES

6.2	Diviseur de courant	125
7	Résistances de sortie et d'entrée	125
7.1	Résistance d'entrée	125
7.2	Résistance de sortie	126
8	Dipôles électrocinétiques fondamentaux du régime variable	126
8.1	Le générateur idéal de tension variable	126
8.2	Le résistor	126
8.3	Le condensateur	126
8.4	La bobine	127
9	Puissance et énergie en régime variable	128
9.1	Les unités	128
9.2	Puissance instantanée reçue par un dipôle en régime variable	128
9.3	Puissance dissipée dans un résistor	128
9.4	Énergie stockée dans un condensateur	128
9.5	Énergie stockée dans une bobine	129
	Méthodologie	130
	Programme officiel et sommaire des exercices	132
	Exercices	133
	Corrigés	138
5	Circuit linéaire du premier ordre	145
1	Étude expérimentale d'un circuit RC série	145
1.1	Montage	145
1.2	Régimes transitoire et permanent	145
2	Modélisation	146
2.1	Équation différentielle sur $u_C(t)$	146
2.2	Constante de temps	146
2.3	Calcul de la tension $u_C(t)$	146
2.4	Interprétation physique	148
2.5	Bilan énergétique	149
3	Régime libre du circuit RC	149
3.1	Observation de la réponse à un signal créneau	149
3.2	Modélisation du régime libre	149
4	Étude de la tension $u_R(t)$	150
4.1	Réponse indicielle	150
4.2	Équation différentielle sur $u_R(t)$	151
4.3	Détermination de la condition initiale	151
4.4	Résolution de l'équation différentielle	151

4.5	Régime libre	152
5	Exemple de circuit inductif	152
5.1	Schéma du montage	152
5.2	Équation différentielle sur $i(t)$	153
5.3	Calcul de l'intensité $i(t)$	153
6	Simulation	154
	Méthodologie	156
	Programme officiel et sommaire des exercices	160
	Exercices	161
	Corrigés	167
6	Oscillateur harmonique	175
1	Un oscillateur harmonique mécanique	175
1.1	Système étudié	175
1.2	Obtention d'une équation différentielle	175
1.3	Définition d'un oscillateur harmonique	176
1.4	Résolution de l'équation différentielle	177
1.5	Signal sinusoïdal	177
2	Un oscillateur harmonique électrique	179
2.1	Système étudié	179
2.2	Mise en équation	179
2.3	Conditions initiales	179
2.4	Résolution de l'équation différentielle	180
2.5	Bilan de puissance et d'énergie	180
	Méthodologie	181
	Programme officiel et sommaire des exercices	184
	Exercices	185
	Corrigés	188
7	Circuit linéaire du second ordre	191
1	Étude expérimentale d'un circuit RLC série	191
1.1	Montage	191
1.2	Régimes transitoire et permanent	191
2	Équation différentielle sur la tension u_C	193
2.1	Mise en équation	193
2.2	Pulsation propre et facteur de qualité	193
3	Détermination de la tension $u_C(t)$	194
3.1	Recherche des conditions initiales	194

TABLE DES MATIÈRES

3.2	Solution	195
4	Durée du régime transitoire	195
4.1	Définition du temps de réponse T_R	195
4.2	Cas des systèmes peu amortis	196
5	Réponse à un signal créneaux	197
5.1	Observations expérimentales	197
5.2	Modélisation du régime libre	197
6	Bilan énergétique	198
7	Analogie entre un circuit RLC et un oscillateur mécanique	199
	Méthodologie	200
	Programme officiel et sommaire des exercices	202
	Exercices	203
	Corrigés	206
8	Régime sinusoïdal - Résonance	211
1	Régime transitoire et régime sinusoïdal forcé	211
1.1	Exemple	211
1.2	Généralisation	213
2	Signaux complexes en régime sinusoïdal forcé	213
2.1	Fondements de la méthode complexe	213
2.2	Exemple d'application	214
3	Impédance complexe	216
3.1	Impédance complexe d'un dipôle passif	216
3.2	Impédance complexe des dipôles de base	217
3.3	Association d'impédances complexes	218
3.4	Ponts diviseurs	219
4	Résonance d'intensité dans un circuit RLC série	219
4.1	Expérience	219
4.2	Interprétation par la méthode complexe	220
4.3	Facteur de qualité	222
4.4	Détermination expérimentale des paramètres de la résonance	222
5	Résonance de charge d'un circuit RLC série	223
5.1	Étude en notation complexe	223
5.2	Détermination expérimentale de ω_0 et Q	224
	Méthodologie	225
	Programme officiel et sommaire des exercices	228
	Exercices	229
	Corrigés	235

9	Fonction de transfert - diagramme de Bode	243
1	Fonction de transfert	243
1.1	Position du problème	243
1.2	Définition de la fonction de transfert	243
1.3	Fonction de gain et fonction de phase	244
1.4	Réponse du filtre à un signal sinusoïdal	244
1.5	Lien entre équation différentielle et fonction de transfert	244
2	Diagramme de Bode	245
2.1	Le gain en décibel	245
2.2	Mesure d'un gain en décibel	245
2.3	Le diagramme de Bode	246
2.4	Étude de la courbe d'amplitude	247
2.5	Domaine dérivateur, domaine intégrateur	248
3	Exemples de filtres	248
3.1	Filtre passe-bas du premier ordre	248
3.2	Filtre passe-haut du premier ordre	250
3.3	Filtre passe-bas du deuxième ordre	251
3.4	Filtre passe-bande du deuxième ordre	253
	Méthodologie	256
	Programme officiel et sommaire des exercices	263
	Exercices	264
	Corrigés	268
10	Filtrage d'un signal périodique	273
1	Contenu spectral d'un signal périodique	273
1.1	Valeur moyenne	273
1.2	Développement en série de Fourier	273
1.3	Exemple	274
1.4	Influence des basses fréquences	274
1.5	Influence des hautes fréquences	276
2	Puissance moyenne	276
2.1	Valeur efficace	276
2.2	Conservation de la puissance : formule de Parseval	277
3	Filtrage	278
4	Réponse d'un filtre à un signal périodique non sinusoïdal	278
5	Étude du filtrage d'un créneau périodique	279
5.1	Filtrage passe-bas	279
5.2	Réalisation d'un moyenneur	280

TABLE DES MATIÈRES

5.3	Filtrage passe-haut	280
5.4	Filtrage passe-bande	282
6	Réponse indicielle et contenu spectral	283
7	Enrichissement du spectre par un système non linéaire	285
7.1	Exemple : le circuit multiplieur	286
7.2	Conclusion	286
8	Mise en cascade de filtres	287
9	Simulation	289
	Méthodologie	291
	Programme officiel et sommaire des exercices	295
	Exercices	296
	Corrigés	303
11	Amplificateur linéaire intégré	309
1	Amplificateur linéaire intégré	309
2	Montage à rétroaction négative : l'amplificateur non inverseur	310
2.1	Schéma électronique	310
2.2	Observations expérimentales	311
3	Les lois de l'ALI	312
3.1	Nullité des courants d'entrée	312
3.2	« $v^+ = v^-$ »	313
4	Exemples de montage	313
4.1	Montage amplificateur non-inverseur	313
4.2	Montage amplificateur inverseur	314
4.3	Montage suiveur	314
4.4	Montage intégrateur	315
	Méthodologie	316
	Programme officiel et sommaire des exercices	317
	Exercices	318
	Corrigés	324
III	Ondes	331
12	Propagation d'un signal	333
1	Exemples de signaux	333
1.1	Nature physique des signaux	333
1.2	Analyse spectrale	334

2	Superposition de deux signaux sinusoïdaux de fréquences voisines	334
2.1	Cas de deux signaux d'amplitudes égales	335
2.2	Cas de deux signaux d'amplitudes différentes	337
2.3	Phénomène des battements	337
3	Phénomène de propagation	338
3.1	Observations expérimentales	338
3.2	Ondes et signaux physiques	338
3.3	Onde progressive	339
3.4	Onde progressive sinusoïdale	342
3.5	Milieux dispersifs ou non-dispersifs	345
	Méthodologie	350
	Programme officiel et sommaire des exercices	351
	Exercices	352
	Corrigés	360
13	Phénomène d'interférences	367
1	Superposition de deux signaux sinusoïdaux de même fréquence	367
1.1	Expérimentation mathématique	367
1.2	Amplitude de la somme de deux signaux sinusoïdaux	367
1.3	Influence du déphasage	369
2	Interférence entre deux ondes acoustiques ou mécaniques de même fréquence	370
2.1	Phénomène d'interférence	370
2.2	Observation expérimentale	370
2.3	Étude théorique	371
2.4	Application à l'expérience	372
3	Interférences lumineuses avec les trous de Young	372
3.1	Particularité d'une expérience d'interférences lumineuses	372
3.2	Intensité lumineuse	373
3.3	Formule de Fresnel	373
3.4	Les trous de Young	374
	Méthodologie	378
	Programme officiel et sommaire des exercices	379
	Exercices	380
	Corrigés	385
14	Ondes stationnaires mécaniques	389
1	Définition et forme d'une onde stationnaire	389
1.1	Superposition de deux ondes progressives	389

TABLE DES MATIÈRES

1.2	Définition générale	390
2	Nœuds et ventres de vibration	390
2.1	Grandeur vibrante	390
2.2	Observations expérimentales	390
2.3	Distance entre deux nœuds de vibration	391
2.4	Distance entre deux ventres de vibration	391
3	Modes propres	391
3.1	Quantification des pulsations	391
3.2	Définition d'un mode propre de vibration	392
4	Généralisation	393
5	Lien avec la musique : instruments à cordes	393
	Méthodologie	394
	Programme officiel et sommaire des exercices	395
	Exercices	396
	Corrigés	400

IV Mécanique 403

15 Cinématique du point 405

1	Notion de point en physique	405
1.1	Définition d'un solide	405
1.2	Définition d'un point	406
1.3	Quand peut-on assimiler un système à un point ?	406
2	Repérage d'un point du plan	406
2.1	Intérêt d'avoir plusieurs systèmes de coordonnées	406
2.2	Repérage d'un point sur une droite.	406
2.3	Repérage d'un point dans le plan	406
3	Repérage d'un point dans l'espace	409
3.1	Repérage cartésien	409
3.2	Repérage cylindrique	409
3.3	Repérage sphérique	410
4	Cinématique du point	412
4.1	Notion de référentiel	412
4.2	Vecteurs position, déplacement, vitesse et accélération	414
5	Utilisation des différents systèmes de coordonnées	416
5.1	Coordonnées cartésiennes	416
5.2	Coordonnées cylindro-polaire	418

5.3	Coordonnées sphériques	421
6	Études de mouvements en coordonnées cartésiennes	423
6.1	Mouvement rectiligne et uniforme	423
6.2	Mouvements à vecteur accélération constante	424
7	Mouvements circulaires	425
7.1	Mouvement circulaire et uniforme	425
7.2	Généralisation : mouvement circulaire non uniforme	426
8	Interprétation du vecteur accélération	427
8.1	Repérage local le long d'une trajectoire plane : repère de Frenet	427
8.2	Interprétation des composantes de l'accélération	428
	Méthodologie	430
	Programme officiel et sommaire des exercices	432
	Exercices	433
	Corrigés	438
16	Principes de la dynamique newtonienne	445
1	Éléments cinétiques d'un point matériel	445
1.1	Masse	445
1.2	Quantité de mouvement	446
2	Les trois lois de Newton	447
2.1	Première loi de Newton : principe d'inertie	447
2.2	Deuxième loi de Newton : principe fondamental de la dynamique	448
2.3	Troisième loi de Newton : principe des actions réciproques	450
3	Limite de validité de la mécanique classique	450
3.1	Qu'est-ce qu'un principe ?	450
3.2	Les hypothèses de la mécanique classique	450
3.3	Les limites de la mécanique classique	451
4	Classification des forces	451
4.1	Les quatre interactions fondamentales	451
4.2	Forces à distance	452
4.3	Forces de contact	455
5	Chute libre dans le champ de pesanteur	460
5.1	Mise en équation	460
5.2	Chute libre dans le vide	461
5.3	Chute libre avec frottements proportionnels à la vitesse	462
5.4	Chute libre avec frottements proportionnels au carré de la vitesse	464
5.5	Comparaison des deux modèles de frottements	465
6	Tir d'un projectile dans le champ de pesanteur	466

TABLE DES MATIÈRES

6.1	Mise en équation	466
6.2	Tir dans le vide	466
6.3	Tir en tenant compte de la résistance de l'air	467
7	Le pendule simple	469
7.1	Modélisation	469
7.2	Équation du mouvement	470
7.3	Résolution numérique	470
7.4	Linéarisation et résolution dans le cas des faibles amplitudes	471
	Méthodologie	472
	Programme officiel et sommaire des exercices	474
	Exercices	476
	Corrigés	484
17	Approche énergétique de la dynamique du point	495
1	Travail et puissance d'une force	495
1.1	Introduction et notations	495
1.2	Puissance d'une force	495
1.3	Travail élémentaire d'une force	496
1.4	Travail d'une force au cours d'un déplacement	496
2	Premiers exemples de calculs de travaux	497
2.1	Travail d'une force constamment perpendiculaire au mouvement	497
2.2	Travail d'une force constante	497
2.3	Travail d'une force de frottement de norme constante	497
3	Théorème de l'énergie cinétique	498
3.1	Définition de l'énergie cinétique	498
3.2	Théorème de l'énergie cinétique en référentiel galiléen	498
3.3	Utilisation du théorème de l'énergie cinétique	499
3.4	Intérêt d'une approche énergétique	500
4	Énergie potentielle et forces conservatives	500
4.1	Définitions	500
4.2	Gradient d'énergie potentielle	501
4.3	Lien entre force conservative et gradient d'énergie potentielle	502
4.4	Exemples de forces conservatives	503
4.5	Exemples de forces non conservatives	504
5	Énergie mécanique	504
5.1	Définition de l'énergie mécanique	504
5.2	Cas de conservation de l'énergie mécanique	505
5.3	Cas général : non conservation de l'énergie mécanique	505

Méthodologie	507
Programme officiel et sommaire des exercices	509
Exercices	510
Corrigés	515
18 Mouvement conservatif à une dimension	523
1 Étude qualitative des mouvements et des équilibres	523
1.1 Exemple introductif	523
1.2 Position du problème	524
1.3 Analyse du mouvement à l'aide d'un graphe énergétique	524
1.4 Analyse des équilibres à l'aide d'un graphe énergétique	525
2 Mouvement conservatif dans un puits de potentiel	528
2.1 Mouvement dans un puits de potentiel harmonique	528
2.2 Mouvement dans un puits de potentiel quelconque	530
Méthodologie	533
Programme officiel et sommaire des exercices	534
Exercices	535
Corrigés	538
19 Mouvement d'une particule chargée dans un champ électrique ou magnétique	545
1 Force de Lorentz	545
1.1 Rappel de l'expression	545
1.2 Différence entre les composantes électriques et magnétiques	546
1.3 Ordre de grandeur et conséquences	546
2 Mouvement dans un champ électrique uniforme	547
2.1 Équation du mouvement	547
2.2 Étude de la trajectoire	548
2.3 Accélération d'une particule chargée par un champ électrique	549
3 Mouvement dans un champ magnétique	552
3.1 Le mouvement est uniforme	552
3.2 Étude de la trajectoire	553
4 Quelques applications de ces mouvements	555
4.1 Expérience de Thomson	555
4.2 Cyclotron	556
Méthodologie	558
Programme officiel et sommaire des exercices	559
Exercices	560
Corrigés	566

TABLE DES MATIÈRES

20 Moment cinétique	573
1 Observations préliminaires	573
1.1 Exemples introductifs	573
1.2 Notion intuitive de bras de levier	574
2 Moment cinétique d'un point matériel	574
2.1 Définition du moment cinétique	574
3 Moment d'une force	576
3.1 Moment d'une force par rapport à un point O	576
3.2 Moment d'une force par rapport à un axe orienté Δ	577
4 Loi du moment cinétique pour un point matériel	578
4.1 Loi du moment cinétique par rapport à un point fixe	579
4.2 Cas de conservation du moment cinétique	579
4.3 Loi du moment cinétique par rapport à un axe fixe	579
Méthodologie	580
Programme officiel et sommaire des exercices	581
Exercices	582
Corrigés	586
21 Mouvement dans un champ de force centrale. Champs newtoniens	595
1 Force centrale conservative	595
1.1 Qu'est-ce qu'une force centrale conservative?	595
1.2 Exemples de forces centrales conservatives	596
1.3 Observations de mouvements à force centrale conservative	597
2 Généralités sur les forces centrales conservatives	599
2.1 Conséquence du caractère central de la force	599
2.2 Conséquence du caractère conservatif de la force	601
3 Cas particulier de l'attraction gravitationnelle	602
3.1 Position du problème	602
3.2 Étude qualitative du mouvement radial	602
3.3 Détermination de la trajectoire par une méthode numérique	603
4 Étude directe de la trajectoire circulaire	606
4.1 Position du problème	606
4.2 Étude à partir du principe fondamental de la dynamique	606
5 Application aux satellites terrestres	608
5.1 Différents types de satellites terrestres	608
5.2 Cas des satellites géostationnaires	609
5.3 Vitesses cosmiques	611
Méthodologie	612

Programme officiel et sommaire des exercices	613
Exercices	615
Corrigés	621
22 Cinématique du solide	629
1 Repérage d'un solide	629
1.1 Définition d'un solide	629
1.2 Repérage d'un solide dans l'espace	629
2 Mouvement de translation	630
2.1 Définition	630
2.2 Mouvement d'un point d'un solide en translation	630
2.3 Conséquences	631
2.4 Deux mouvements de translations remarquables	631
3 Solides en rotation autour d'un axe fixe	631
3.1 Définition	631
3.2 Mouvement d'un point d'un solide en rotation	632
3.3 Conséquences	633
3.4 Quelques exemples de rotation autour d'un axe fixe	633
Méthodologie	634
Programme officiel et sommaire des exercices	635
Exercices	636
Corrigés	637
23 Solide en rotation autour d'un axe fixe	639
1 Moment cinétique d'un solide ou d'un système de points	639
1.1 Cas d'un point matériel : notion de moment d'inertie	639
1.2 Cas d'un système déformable	639
1.3 Cas d'un solide en rotation par rapport à un axe	640
2 Théorème du moment cinétique pour un solide en rotation	642
2.1 Rappel sur le moment d'une force	642
2.2 Théorème scalaire du moment cinétique pour un solide	642
2.3 Cas de conservation du moment cinétique	643
3 Actions mécaniques s'exerçant sur un solide en rotation	643
3.1 Couples	643
3.2 Liaison pivot d'axe (Oz)	645
4 Pendule de torsion	646
4.1 Position du problème	647
4.2 Équation horaire du mouvement	647

TABLE DES MATIÈRES

4.3	Intégrale première du mouvement	648
5	Pendule pesant	648
5.1	Position du problème et équation du mouvement	648
5.2	Oscillations de faible amplitude	649
5.3	Intégrale première du mouvement et étude qualitative	649
5.4	Résolution numérique	651
6	Énergie d'un solide en rotation autour d'un axe fixe	652
6.1	Énergie cinétique d'un solide en rotation	652
6.2	Puissance d'une force appliquée à un solide en rotation	653
6.3	Théorème de l'énergie cinétique pour un solide indéformable	653
6.4	Théorème de l'énergie cinétique pour un système déformable	654
	Méthodologie	656
	Programme officiel et sommaire des exercices	657
	Exercices	659
	Corrigés	666

V Thermodynamique 675

24 Système thermodynamique à l'équilibre 677

1	Descriptions microscopique et macroscopique de la matière	677
1.1	Les phases solide, liquide et gaz	677
1.2	L'agitation thermique	678
1.3	Libre parcours moyen	678
1.4	Échelles microscopique, mésoscopique et macroscopique	679
1.5	État microscopique et état macroscopique	679
2	Étude d'un gaz à l'échelle microscopique	680
2.1	Distribution des vitesses moléculaires	680
2.2	Pression	681
2.3	Température	683
3	Système thermodynamique, variables d'état	684
3.1	Système thermodynamique	684
3.2	Variables d'état	685
4	Équilibre thermodynamique	686
4.1	Définition	686
4.2	Équilibre thermodynamique local	686
4.3	Conditions d'équilibre	687
4.4	Équation d'état	688

5	Énergie interne, capacité thermique à volume constant	690
5.1	L'énergie interne U	690
5.2	La capacité thermique à volume constant C_V	690
5.3	Cas d'un gaz parfait	691
5.4	Cas d'une phase condensée incompressible	693
6	Étude expérimentale d'un fluide réel	694
6.1	Dispositif expérimental	694
6.2	Étude expérimentale du gaz SF_6 dans le diagramme d'Amagat	694
6.3	Étude expérimentale de SF_6 dans le diagramme de Clapeyron	696
6.4	Diagramme de phase (P, T) expérimental	698
7	Corps pur diphasé en équilibre	698
7.1	Changements d'état physique	698
7.2	Diagramme de phases (P, T)	699
7.3	Variables d'état d'un système diphasé	701
7.4	Étude de l'équilibre liquide-gaz	702
7.5	Équilibre liquide-vapeur en présence d'une atmosphère inerte	705
	Méthodologie	707
	Programme officiel et sommaire des exercices	708
	Exercices	710
	Corrigés	715
25	Énergie échangée par un système au cours d'une transformation	721
1	Transformation thermodynamique	721
1.1	Transformation, état initial, état final	721
1.2	Différents types de transformations	722
1.3	Influence du choix du système	724
2	Travail des forces de pression	725
2.1	Expression générale du travail de la pression extérieure	725
2.2	Travail des forces de pression dans deux cas particuliers	727
2.3	Travail des forces de pression dans le cas d'une transformation mécaniquement réversible	728
3	Transfert thermique	731
3.1	Définition	731
3.2	Les trois modes de transfert thermique	731
3.3	Transformation adiabatique	732
3.4	Notion de thermostat	733
3.5	Retour sur les transformations monotherme et isotherme	734
	Méthodologie	735

TABLE DES MATIÈRES

Programme officiel et sommaire des exercices	736
Exercices	737
Corrigés	739
26 Premier principe. Bilans d'énergie.	743
1 Le premier principe de la thermodynamique	743
1.1 Énergie d'un système	743
1.2 Premier principe de la thermodynamique	744
1.3 Premier principe de la thermodynamique entre deux états voisins	745
1.4 Obtention de la valeur du transfert thermique	746
1.5 Transfert thermique dans une transformation isochore sans travail autre que celui de la pression	746
1.6 Exemples d'application du premier principe	746
2 La fonction d'état enthalpie	749
2.1 Définitions	749
2.2 Premier principe pour une transformation monobare avec équilibre mécanique dans l'état initial et l'état final	750
2.3 Premier principe pour une transformation isobare	750
2.4 Transfert thermique dans une transformation isobare sans travail autre que celui de la pression	751
2.5 Enthalpie d'un gaz parfait	751
2.6 Enthalpie d'une phase condensée indilatable et incompressible	752
2.7 Enthalpie d'un système diphasé	753
3 Mesures de grandeurs thermodynamiques	755
3.1 Le calorimètre	755
3.2 Détermination d'une capacité thermique massique	756
3.3 Détermination d'une enthalpie de changement d'état	757
3.4 Mesure de la valeur en eau du calorimètre	758
Méthodologie	760
Programme officiel et sommaire des exercices	761
Exercices	762
Corrigés	765
27 Deuxième principe. Bilans d'entropie.	769
1 Le deuxième principe de la thermodynamique	769
1.1 Transformations irréversibles et transformations réversibles	769
1.2 Le deuxième principe de la thermodynamique	771
2 Entropie d'un échantillon de corps pur	773

2.1	Entropie d'un gaz parfait	773
2.2	Entropie d'une phase condensée indilatable et incompressible	776
2.3	Entropie d'un système diphasé	777
3	Exemples de bilans d'entropie	778
3.1	Méthode générale	778
3.2	Exemple 1 : détente de Joule - Gay Lussac	778
3.3	Exemple 2 : mise en contact avec un thermostat	779
3.4	Exemple 3 : compression d'un gaz parfait	781
3.5	Exemple 4 : chauffage par effet Joule	783
3.6	Exemple 5 : solidification d'un liquide surfondu	784
4	Interprétation microscopique de l'entropie	785
4.1	Nombre de configurations	785
4.2	Formule de Boltzmann	787
	Méthodologie	788
	Programme officiel et sommaire des exercices	789
	Exercices	790
	Corrigés	796
28	Machines thermiques	803
1	Machines thermiques dithermes	803
1.1	Introduction	803
1.2	Application des deux principes à une machine thermique	803
2	Moteur thermique	804
2.1	Sens des échanges d'énergie	804
2.2	Rendement du moteur	804
2.3	Théorème de Carnot	804
2.4	Rendements des moteurs thermiques réels	805
2.5	Cogénération	805
3	Machine frigorifique	807
3.1	Sens des échanges d'énergie	807
3.2	Efficacité d'une machine frigorifique	807
3.3	Théorème de Carnot	807
3.4	Efficacité d'une machine thermique réelle	808
4	Pompe à chaleur	808
4.1	Sens des échanges d'énergie	808
4.2	Efficacité d'une pompe à chaleur	809
4.3	Théorème de Carnot	809
4.4	Efficacité d'une pompe à chaleur réelle	810

TABLE DES MATIÈRES

Méthodologie	811
Programme officiel et sommaire des exercices	812
Exercices	813
Corrigés	817
VI Statique des fluides	823
29 Statique des fluides dans un référentiel galiléen	825
1 Forces volumiques et surfaciques, pression	825
1.1 Particule ou élément de fluide	825
1.2 Forces volumiques et forces surfaciques	825
2 Pression d'un fluide soumis au champ de pesanteur	827
2.1 Équation locale d'équilibre d'un fluide dans le champ de pesanteur . .	827
2.2 Cas d'un fluide incompressible et homogène	828
2.3 Cas d'un gaz parfait : atmosphère isotherme	829
2.4 Étude numérique des variations de température et pression dans l'as- mosphère	830
3 Facteur de Boltzmann	832
4 Actions exercées par un fluide au repos sur un solide	833
4.1 Calcul des forces de pression	833
4.2 Exemples	835
4.3 Poussée d'Archimède	837
5 Équation locale de la statique des fluides	838
5.1 Équivalent volumique des forces de pression	838
5.2 Équation locale de la statique des fluides	839
5.3 Application au champ de pesanteur	839
Méthodologie	840
Programme officiel et sommaire des exercices	841
Exercices	842
Corrigés	846
VII Induction et forces de Laplace	853
30 Le champ magnétique	855
1 Le champ magnétique	855
1.1 Les champs en physique	855
1.2 Un champ vectoriel permet de décrire une interaction à distance . . .	856

TABLE DES MATIÈRES

1.3	Unités et ordres de grandeur	856
2	Cartes de champ magnétique	856
2.1	Spire circulaire de courant	857
2.2	Bobine longue	857
2.3	Aimant	860
3	Invariances d'une distribution de courant	860
3.1	Invariance par translation le long d'un axe	860
3.2	Invariance par rotation autour d'un axe	860
3.3	Conclusion	861
4	Propriétés de symétries du champ magnétique	861
4.1	Symétries et antisymétries d'une distribution de courant	861
4.2	Observation du champ magnétique d'une spire de courant	862
4.3	Règles de symétrie pour le champ magnétique	862
5	Moment magnétique	863
5.1	Vecteur surface d'une spire plane	863
5.2	Définition du moment magnétique	863
5.3	Moment magnétique d'un aimant	863
5.4	Lignes de champ d'un moment magnétique	864
	Méthodologie	865
	Programme officiel et sommaire des exercices	866
	Exercices	867
	Corrigés	869
31	Actions d'un champ magnétique	871
1	Densité linéique de force de Laplace	871
1.1	Force de Laplace sur un tronçon rectiligne dans un champ uniforme	871
1.2	Force élémentaire de Laplace	872
1.3	De la force de Lorentz à la force de Laplace	872
2	Résultante et puissance dans le cas d'une translation	872
2.1	Force de Laplace sur une tige en translation	872
2.2	Puissance de la force Laplace	873
3	Couple magnétique	874
3.1	Couple de Laplace exercé par un champ magnétique uniforme sur une spire rectangulaire	874
3.2	Influence du couple de Laplace	875
3.3	Puissance du couple de Laplace	875
4	Action d'un champ magnétique uniforme sur un aimant	876
4.1	Orientation d'un aimant	876

TABLE DES MATIÈRES

4.2	Positions d'équilibre	876
4.3	Effet moteur d'un champ magnétique tournant	877
	Méthodologie	878
	Programme officiel et sommaire des exercices	879
	Exercices	880
	Corrigés	883
32	Lois de l'induction	887
1	Expériences d'induction électromagnétique	887
1.1	Expérience historique de Faraday	887
1.2	Autres expériences	888
1.3	Interprétation	888
2	Loi de Faraday	889
2.1	Flux magnétique	889
2.2	Force électromotrice induite	890
2.3	Convention d'algébrisation	890
2.4	Exceptions à la règle du flux	891
2.5	Conditions d'application de la loi de faraday dans le cas d'un conduc- teur en mouvement dans un champ magnétique	892
3	Loi de Lenz	892
	Programme officiel et sommaire des exercices	893
33	Circuit fixe dans un champ magnétique variable	895
1	Auto-induction	895
1.1	Coefficient d'auto-induction	895
1.2	Exemple de calcul d'une inductance propre	896
1.3	Force électromotrice auto-induite	897
1.4	Schéma électrique	897
1.5	Loi de Lenz	897
1.6	Mesure expérimentale de l'inductance propre d'une bobine	897
1.7	Bilan d'énergie	897
2	Induction mutuelle	898
2.1	Coefficient d'induction mutuelle	898
2.2	Exemple de calcul d'une inductance mutuelle	899
2.3	Forces électromotrices induites dans les deux circuits	900
2.4	Schéma électrique	900
2.5	Étude de deux circuits couplés	901
3	Transformateur de tension	903

3.1	Constitution	903
3.2	Principe de fonctionnement	903
3.3	Utilisations	904
	Méthodologie	905
	Programme officiel et sommaire des exercices	908
	Exercices	909
	Corrigés	914
34	Circuit mobile dans un champ magnétique stationnaire	919
1	Conversion de puissance mécanique en puissance électrique	919
1.1	Rails de Laplace générateurs	919
1.2	Freinage par induction	923
1.3	Alternateur	924
2	Conversion de puissance électrique en puissance mécanique	926
2.1	Présentation	926
2.2	Choix des orientations	927
2.3	Équations de la MCC	927
2.4	Réalisation	927
2.5	Utilisations	928
	Méthodologie	929
	Programme officiel et sommaire des exercices	934
	Exercices	935
	Corrigés	939
VIII	Physique quantique	947
35	Introduction à la physique quantique	949
1	La dualité onde-particule de la lumière	949
1.1	Introduction	949
1.2	Historique de la découverte du photon	949
1.3	Le photon	951
1.4	Franges d'interférences et photons	952
2	La dualité onde-particule de la matière	953
2.1	La longueur d'onde de de Broglie	953
2.2	Expériences d'interférences de particules	956
3	Fonction d'onde et probabilités	959
3.1	Analyse d'une expérience d'interférences quantiques	959

TABLE DES MATIÈRES

3.2	Notion de fonction d'onde et probabilité de détection	960
3.3	Interprétation de l'expérience des fentes de Young	960
3.4	Complémentarité	961
4	L'inégalité de Heisenberg	961
4.1	Indétermination quantique	961
4.2	Exemple : diffraction d'une particule par une fente	962
4.3	L'indétermination position-quantité de mouvement	962
5	Quantification de l'énergie	963
5.1	Notion de quantification	963
5.2	Modèle planétaire de Bohr	963
5.3	Particule dans un puits infini à 1 dimension	965
	Méthodologie	968
	Programme officiel et sommaire des exercices	969
	Exercices	970
	Corrigés	977
36	Mesures et incertitudes	985
	Méthodologie	985
	Exercices	997
	Corrigés	998
	Index	999