

PHYSIQUE PTSI

TOUT-EN-UN

Stéphane CARDINI, Damien JURINE et Bernard SALAMITO

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

Tom Morel et Marie-Noëlle Sanz

PHYSIQUE

PTSI

TOUT-EN-UN

2^e édition

DUNOD

l'intégrale

Conception et création de couverture : Hokus Pokus Créations

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, 2019, 2021

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-082093-1

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

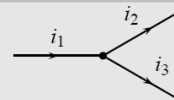
La résistance de sortie R_s d'un générateur de fonction est de l'ordre de 50Ω . Branché aux bornes d'une résistance de l'ordre du $k\Omega$, donc très supérieures à R_s , il se comporte pratiquement comme un générateur idéal, d'après la remarque de la page 121.

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.	<p>Établir et reconnaître l'équation différentielle qui caractérise un oscillateur harmonique ; la résoudre compte tenu des conditions initiales.</p> <p>▶ 6.C1 6.C2</p> <p>Caractériser le mouvement en utilisant les notions d'amplitude, de phase, de période, de fréquence, de pulsation.</p> <p>▶ 6.C3</p> <p>▷ 6.1 6.2 6.3 6.4 6.5</p> <p>Réaliser un bilan énergétique.</p> <p>▶ 6.C4</p> <p>▷ 6.6 6.7 6.8</p>

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 une 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	25
1 Sources lumineuses, modèle de l'optique géométrique	27
1 Description et propriétés de la lumière	27
1.1 Nature de la lumière	27
1.2 Spectre de la lumière	28
1.3 Propagation de la lumière	28
2 Les sources lumineuses	29
2.1 Sources thermique	29
2.2 Sources spectrales	30
2.3 Sources laser	31
3 Modèle géométrique de la lumière	31
3.1 Cadre de l'approximation géométrique	31
3.2 Notion de rayon lumineux	32
3.3 Propagation rectiligne	32
4 Lois de Snell-Descartes	32
4.1 Définitions	33
4.2 Énoncé des lois	33
4.3 Détails sur la réfraction	33
4.4 Réflexion totale	34
Méthodologie, programme officiel et sommaire des exercices	35
Exercices	36
Corrigés	40

TABLE DES MATIÈRES

2	Optique géométrique	45
1	Miroir plan	45
1.1	Image d'un point objet par un miroir plan	45
1.2	Image d'un objet par un miroir plan	46
2	Systèmes centrés et approximation de Gauss	46
2.1	Systèmes optiques centrés	46
2.2	Approximation de Gauss	47
2.3	Propriétés d'un système centré dans les conditions de Gauss	47
2.4	Foyers objet, foyers image	49
3	Lentilles minces	50
3.1	Présentation des lentilles	50
3.2	Constructions géométriques	52
3.3	Relations de conjugaison	55
4	Projection d'une image par une lentille	56
4.1	Position du problème	56
4.2	Choix de la lentille	57
4.3	Éclairage de l'objet	58
	Méthodologie	59
	Programme officiel et sommaire des exercices	61
	Exercices	62
	Corrigés	66
3	Modèles de dispositifs optiques	71
1	L'œil	71
1.1	Description et modèle optique	71
1.2	Fonctionnement de l'œil	71
2	L'appareil photo	73
2.1	Principe de fonctionnement	73
2.2	Influence de la durée d'exposition	75
2.3	Influence du diamètre du diaphragme	76
2.4	Influence de la distance focale	77
3	La fibre à saut d'indice	79
3.1	Cône d'acceptance	79
3.2	Dispersion intermodale	80
	Méthodologie	83
	Programme officiel et sommaire des exercices	85
	Exercices	86
	Corrigés	92

II	Signaux électriques	101
4	Circuits électriques dans l'ARQS	103
1	Intensité du courant électrique	103
1.1	Charge électrique	103
1.2	Conducteurs électriques	104
1.3	Le courant électrique	105
1.4	Intensité d'un courant stationnaire dans un fil	106
1.5	Mesure de l'intensité d'un courant	107
1.6	L'approximation des régimes quasi-stationnaires (ARQS)	107
1.7	Intensité d'un courant variable	108
1.8	Loi des nœuds	108
2	Circuit électrique	109
3	Tension électrique	110
3.1	Mesure d'une tension	110
3.2	Additivité des tensions	111
3.3	Loi des mailles	111
3.4	Potentiel électrique	112
3.5	La masse	113
4	Dipôles électrocinétiques en courant continu	113
4.1	Puissance, conventions générateur et récepteur	113
4.2	Le résistor	114
4.3	Les générateurs de tension	115
5	Associations de dipôles	115
5.1	Associations série et parallèle	115
5.2	Lois d'association des résistances	116
5.3	Associations de générateurs	116
6	Ponts diviseurs	116
6.1	Diviseur de tension	116
6.2	Diviseur de courant	117
7	Résistances de sortie et d'entrée	117
7.1	Résistance d'entrée	117
7.2	Résistance de sortie	118
8	Dipôles électrocinétiques fondamentaux du régime variable	118
8.1	Le générateur idéal de tension variable	118
8.2	Le résistor	118
8.3	Le condensateur	118
8.4	La bobine	119

TABLE DES MATIÈRES

9	Puissance et énergie en régime variable	120
9.1	Les unités	120
9.2	Puissance instantanée reçue par un dipôle en régime variable	120
9.3	Puissance dissipée dans un résistor	120
9.4	Énergie stockée dans un condensateur	120
9.5	Énergie stockée dans une bobine	121
	Méthodologie	122
	Programme officiel et sommaire des exercices	124
	Exercices	125
	Corrigés	129
5	Circuit linéaire du premier ordre	135
1	Étude expérimentale d'un circuit RC série	135
1.1	Montage	135
1.2	Régimes transitoire et permanent	135
2	Modélisation	136
2.1	Équation différentielle sur $u_C(t)$	136
2.2	Constante de temps	136
2.3	Calcul de la tension $u_C(t)$	136
2.4	Interprétation physique	138
2.5	Bilan énergétique	139
3	Régime libre du circuit RC	139
3.1	Observation de la réponse à un signal créneau	139
3.2	Modélisation du régime libre	139
4	Étude de la tension $u_R(t)$	140
4.1	Réponse indicelle	140
4.2	Équation différentielle sur $u_R(t)$	141
4.3	Détermination de la condition initiale	141
4.4	Résolution de l'équation différentielle	141
4.5	Régime libre	142
5	Exemple de circuit inductif	142
5.1	Schéma du montage	142
5.2	Équation différentielle sur $i(t)$	143
5.3	Calcul de l'intensité $i(t)$	143
6	Simulation	144
	Méthodologie	146
	Programme officiel et sommaire des exercices	150
	Exercices	151

Corrigés	157
6 Oscillateur harmonique	165
1 Un oscillateur harmonique mécanique	165
1.1 Système étudié	165
1.2 Obtention d'une équation différentielle	165
1.3 Définition d'un oscillateur harmonique	166
1.4 Résolution de l'équation différentielle	167
1.5 Signal sinusoïdal	167
2 Un oscillateur harmonique électrique	169
2.1 Système étudié	169
2.2 Mise en équation	169
2.3 Conditions initiales	169
2.4 Résolution de l'équation différentielle	170
2.5 Bilan de puissance et d'énergie	170
Méthodologie	171
Programme officiel et sommaire des exercices	174
Exercices	175
Corrigés	178
7 Circuit linéaire du second ordre	181
1 Étude expérimentale d'un circuit <i>RLC</i> série	181
1.1 Montage	181
1.2 Régimes transitoire et permanent	181
2 Équation différentielle sur la tension u_C	183
2.1 Mise en équation	183
2.2 Pulsation propre et facteur de qualité	183
3 Détermination de la tension $u_C(t)$	184
3.1 Recherche des conditions initiales	184
3.2 Solution	185
4 Durée du régime transitoire	185
4.1 Définition du temps de réponse T_R	185
4.2 Cas des systèmes peu amortis	186
5 Réponse à un signal créneaux	187
5.1 Observations expérimentales	187
5.2 Modélisation du régime libre	187
6 Bilan énergétique	188
7 Analogie entre un circuit <i>RLC</i> et un oscillateur mécanique	189

TABLE DES MATIÈRES

Méthodologie	190
Programme officiel et sommaire des exercices	192
Exercices	193
Corrigés	196
8 Régime sinusoïdal - Résonance	201
1 Régime transitoire et régime sinusoïdal forcé	201
1.1 Exemple	201
1.2 Généralisation	203
2 Signaux complexes en régime sinusoïdal forcé	203
2.1 Fondements de la méthode complexe	203
2.2 Exemple d'application	204
3 Impédance complexe	206
3.1 Impédance complexe d'un dipôle passif	206
3.2 Impédance complexe des dipôles de base	207
3.3 Association d'impédances complexes	208
3.4 Ponts diviseurs	209
4 Résonance d'intensité dans un circuit <i>RLC</i> série	209
4.1 Expérience	209
4.2 Interprétation par la méthode complexe	210
4.3 Facteur de qualité	212
4.4 Détermination expérimentale des paramètres de la résonance	212
5 Résonance de charge d'un circuit <i>RLC</i> série	213
5.1 Étude en notation complexe	213
5.2 Détermination expérimentale de ω_0 et Q	214
Méthodologie	215
Programme officiel et sommaire des exercices	218
Exercices	219
Corrigés	225
9 Fonction de transfert - diagramme de Bode	233
1 Fonction de transfert	233
1.1 Position du problème	233
1.2 Définition de la fonction de transfert	233
1.3 Fonction de gain et fonction de phase	234
1.4 Réponse du filtre à un signal sinusoïdal	234
1.5 Lien entre équation différentielle et fonction de transfert	234
2 Diagramme de Bode	235

2.1	Le gain en décibel	235
2.2	Mesure d'un gain en décibel	235
2.3	Le diagramme de Bode	236
2.4	Étude de la courbe d'amplitude	237
2.5	Domaine dérivateur, domaine intégrateur	238
3	Exemples de filtres	238
3.1	Filtre passe-bas du premier ordre	238
3.2	Filtre passe-haut du premier ordre	240
3.3	Filtre passe-bas du deuxième ordre	241
3.4	Filtre passe-bande du deuxième ordre	243
	Méthodologie	246
	Programme officiel et sommaire des exercices	253
	Exercices	254
	Corrigés	258
10	Filtrage d'un signal périodique	263
1	Contenu spectral d'un signal périodique	263
1.1	Valeur moyenne	263
1.2	Développement en série de Fourier	263
1.3	Exemple	264
1.4	Influence des basses fréquences	264
1.5	Influence des hautes fréquences	266
2	Puissance moyenne	266
2.1	Valeur efficace	266
2.2	Conservation de la puissance : formule de Parseval	267
3	Filtrage	268
4	Réponse d'un filtre à un signal périodique non sinusoïdal	268
5	Étude du filtrage d'un créneau périodique	269
5.1	Filtrage passe-bas	269
5.2	Réalisation d'un moyennneur	270
5.3	Filtrage passe-haut	270
5.4	Filtrage passe-bande	272
6	Réponse indicielle et contenu spectral	273
7	Enrichissement du spectre par un système non linéaire	275
7.1	Exemple : le circuit multiplieur	276
7.2	Conclusion	276
8	Mise en cascade de filtres	277
9	Simulation	279

TABLE DES MATIÈRES

Méthodologie	281
Programme officiel et sommaire des exercices	285
Exercices	286
Corrigés	293
III Ondes	299
11 Propagation d'un signal	301
1 Exemples de signaux	301
1.1 Nature physique des signaux	301
1.2 Analyse spectrale	302
2 Phénomène de propagation	302
2.1 Observations expérimentales	302
2.2 Ondes et signaux physiques	303
2.3 Onde progressive	304
2.4 Onde progressive sinusoïdale	307
2.5 Milieux dispersifs ou non-dispersifs	310
Méthodologie	315
Programme officiel et sommaire des exercices	316
Exercices	317
Corrigés	323
12 Phénomène d'interférences	329
1 Superposition de deux signaux sinusoïdaux de même fréquence	329
1.1 Expérimentation mathématique	329
1.2 Amplitude de la somme de deux signaux sinusoïdaux	329
1.3 Influence du déphasage	331
2 Interférence entre deux ondes acoustiques ou mécaniques de même fréquence	332
2.1 Phénomène d'interférence	332
2.2 Observation expérimentale	332
2.3 Étude théorique	333
2.4 Application à l'expérience	334
3 Interférences lumineuses avec les trous de Young	334
3.1 Particularité d'une expérience d'interférences lumineuses	334
3.2 Intensité lumineuse	335
3.3 Formule de Fresnel	335
3.4 Les trous de Young	336

Méthodologie	340
Programme officiel et sommaire des exercices	341
Exercices	342
Corrigés	347

IV Mécanique 351

13 Cinématique du point	353
1 Notion de point en physique	353
1.1 Définition d'un solide	353
1.2 Définition d'un point	354
1.3 Quand peut-on assimiler un système à un point ?	354
2 Repérage d'un point du plan	354
2.1 Intérêt d'avoir plusieurs systèmes de coordonnées	354
2.2 Repérage d'un point sur une droite.	354
2.3 Repérage d'un point dans le plan	354
3 Repérage d'un point dans l'espace	357
3.1 Repérage cartésien	357
3.2 Repérage cylindrique	357
3.3 Repérage sphérique	358
4 Cinématique du point	360
4.1 Notion de référentiel	360
4.2 Vecteurs position, déplacement, vitesse et accélération	362
5 Utilisation des différents systèmes de coordonnées	364
5.1 Coordonnées cartésiennes	364
5.2 Coordonnées cylindro-polaire	366
5.3 Coordonnées sphériques	369
6 Études de mouvements en coordonnées cartésiennes	371
6.1 Mouvement rectiligne et uniforme	371
6.2 Mouvements à vecteur accélération constante	372
7 Mouvements circulaires	373
7.1 Mouvement circulaire et uniforme	373
7.2 Généralisation : mouvement circulaire non uniforme	374
8 Interprétation du vecteur accélération	375
8.1 Repérage local le long d'une trajectoire plane : repère de Frenet	375
8.2 Interprétation des composantes de l'accélération	376
Méthodologie	378

TABLE DES MATIÈRES

Programme officiel et sommaire des exercices	380
Exercices	381
Corrigés	386
14 Principes de la dynamique newtonienne	393
1 Éléments cinétiques d'un point matériel	393
1.1 Masse	393
1.2 Quantité de mouvement	394
2 Les trois lois de Newton	395
2.1 Première loi de Newton : principe d'inertie	395
2.2 Deuxième loi de Newton : principe fondamental de la dynamique	396
2.3 Troisième loi de Newton : principe des actions réciproques	398
3 Limite de validité de la mécanique classique	398
3.1 Qu'est-ce qu'un principe ?	398
3.2 Les hypothèses de la mécanique classique	398
3.3 Les limites de la mécanique classique	399
4 Classification des forces	399
4.1 Les quatre interactions fondamentales	399
4.2 Forces à distance	400
4.3 Forces de contact	403
5 Chute libre dans le champ de pesanteur	408
5.1 Mise en équation	408
5.2 Chute libre dans le vide	408
5.3 Chute libre avec frottements proportionnels à la vitesse	409
5.4 Chute libre avec frottements proportionnels au carré de la vitesse	411
5.5 Comparaison des deux modèles de frottements	413
6 Tir d'un projectile dans le champ de pesanteur	413
6.1 Mise en équation	413
6.2 Tir dans le vide	414
6.3 Tir en tenant compte de la résistance de l'air	415
7 Le pendule simple	417
7.1 Modélisation	417
7.2 Équation du mouvement	417
7.3 Résolution numérique	418
7.4 Linéarisation et résolution dans le cas des faibles amplitudes	418
Méthodologie	419
Programme officiel et sommaire des exercices	421
Exercices	422

Corrigés	430
15 Approche énergétique de la dynamique du point	441
1 Travail et puissance d'une force	441
1.1 Introduction et notations	441
1.2 Puissance d'une force	441
1.3 Travail élémentaire d'une force	442
1.4 Travail d'une force au cours d'un déplacement	442
2 Premiers exemples de calculs de travaux	443
2.1 Travail d'une force constamment perpendiculaire au mouvement	443
2.2 Travail d'une force constante	443
2.3 Travail d'une force de frottement de norme constante	443
3 Théorème de l'énergie cinétique	444
3.1 Définition de l'énergie cinétique	444
3.2 Théorème de l'énergie cinétique en référentiel galiléen	444
3.3 Utilisation du théorème de l'énergie cinétique	445
3.4 Intérêt d'une approche énergétique	446
4 Énergie potentielle et forces conservatives	446
4.1 Définitions	446
4.2 Gradient d'énergie potentielle	447
4.3 Lien entre force conservative et gradient d'énergie potentielle	448
4.4 Exemples de forces conservatives	449
4.5 Exemples de forces non conservatives	450
5 Énergie mécanique	450
5.1 Définition de l'énergie mécanique	450
5.2 Cas de conservation de l'énergie mécanique	451
5.3 Cas général : non conservation de l'énergie mécanique	451
Méthodologie	453
Programme officiel et sommaire des exercices	455
Exercices	456
Corrigés	461
16 Mouvement conservatif à une dimension	469
1 Étude qualitative des mouvements et des équilibres	469
1.1 Exemple introductif	469
1.2 Position du problème	470
1.3 Analyse du mouvement à l'aide d'un graphe énergétique	470
1.4 Analyse des équilibres à l'aide d'un graphe énergétique	471

TABLE DES MATIÈRES

2	Mouvement conservatif dans un puits de potentiel	474
2.1	Mouvement dans un puits de potentiel harmonique	474
2.2	Mouvement dans un puits de potentiel quelconque	476
	Méthodologie	479
	Programme officiel et sommaire des exercices	480
	Exercices	481
	Corrigés	484
17	Mouvement d'une particule chargée dans un champ électrique ou magnétique	491
1	Force de Lorentz	491
1.1	Rappel de l'expression	491
1.2	Différence entre les composantes électriques et magnétiques	492
1.3	Ordre de grandeur et conséquences	492
2	Mouvement dans un champ électrique uniforme	493
2.1	Équation du mouvement	493
2.2	Étude de la trajectoire	494
2.3	Accélération d'une particule chargée par un champ électrique	495
3	Mouvement dans un champ magnétique	498
3.1	Le mouvement est uniforme	498
3.2	Étude de la trajectoire	499
4	Quelques applications de ces mouvements	501
4.1	Expérience de Thomson	501
4.2	Cyclotron	502
	Méthodologie	504
	Programme officiel et sommaire des exercices	505
	Exercices	506
	Corrigés	512
18	Moment cinétique	519
1	Observations préliminaires	519
1.1	Exemples introductifs	519
1.2	Notion intuitive de bras de levier	520
2	Moment cinétique d'un point matériel	520
2.1	Définition du moment cinétique	520
3	Moment d'une force	522
3.1	Moment d'une force par rapport à un point O	522
3.2	Moment d'une force par rapport à un axe orienté Δ	523
4	Loi du moment cinétique pour un point matériel	524

4.1	Loi du moment cinétique par rapport à un point fixe	525
4.2	Cas de conservation du moment cinétique	525
4.3	Loi du moment cinétique par rapport à un axe fixe	525
	Méthodologie	526
	Programme officiel et sommaire des exercices	527
	Exercices	528
	Corrigés	532
19	Mouvement dans un champ de force centrale. Champs newtoniens	541
1	Force centrale conservative	541
1.1	Qu'est-ce qu'une force centrale conservative?	541
1.2	Exemples de forces centrales conservatives	542
1.3	Observations de mouvements à force centrale conservative	543
2	Généralités sur les forces centrales conservatives	545
2.1	Conséquence du caractère central de la force	545
2.2	Conséquence du caractère conservatif de la force	547
3	Cas particulier de l'attraction gravitationnelle	548
3.1	Position du problème	548
3.2	Étude qualitative du mouvement radial	548
3.3	Détermination de la trajectoire par une méthode numérique	549
4	Étude directe de la trajectoire circulaire	552
4.1	Position du problème	552
4.2	Étude à partir du principe fondamental de la dynamique	552
5	Application aux satellites terrestres	554
5.1	Différents types de satellites terrestres	554
5.2	Cas des satellites géostationnaires	555
	Méthodologie	558
	Programme officiel et sommaire des exercices	559
	Exercices	561
	Corrigés	567
20	Cinématique du solide	575
1	Repérage d'un solide	575
1.1	Définition d'un solide	575
1.2	Repérage d'un solide dans l'espace	575
2	Mouvement de translation	576
2.1	Définition	576
2.2	Mouvement d'un point d'un solide en translation	576

TABLE DES MATIÈRES

2.3	Conséquences	577
2.4	Deux mouvements de translations remarquables	577
3	Solides en rotation autour d'un axe fixe	577
3.1	Définition	577
3.2	Mouvement d'un point d'un solide en rotation	578
3.3	Conséquences	579
3.4	Quelques exemples de rotation autour d'un axe fixe	579
	Méthodologie	580
	Programme officiel et sommaire des exercices	581
	Exercices	582
	Corrigés	583
21	Solide en rotation autour d'un axe fixe	585
1	Moment cinétique d'un solide ou d'un système de points	585
1.1	Cas d'un point matériel : notion de moment d'inertie	585
1.2	Cas d'un système déformable	585
1.3	Cas d'un solide en rotation par rapport à un axe	586
2	Théorème du moment cinétique pour un solide en rotation	588
2.1	Rappel sur le moment d'une force	588
2.2	Théorème scalaire du moment cinétique pour un solide	588
2.3	Cas de conservation du moment cinétique	589
3	Actions mécaniques s'exerçant sur un solide en rotation	589
3.1	Couples	589
3.2	Liaison pivot d'axe (Oz)	591
4	Pendule pesant	592
4.1	Position du problème et équation du mouvement	592
4.2	Oscillations de faible amplitude	593
4.3	Intégrale première du mouvement et étude qualitative	594
4.4	Résolution numérique	595
5	Énergie d'un solide en rotation autour d'un axe fixe	597
5.1	Énergie cinétique d'un solide en rotation	597
5.2	Puissance d'une force appliquée à un solide en rotation	597
5.3	Théorème de l'énergie cinétique pour un solide indéformable	598
5.4	Théorème de l'énergie cinétique pour un système déformable	599
	Méthodologie	601
	Programme officiel et sommaire des exercices	602
	Exercices	604
	Corrigés	608

V	Thermodynamique	615
22	Système thermodynamique à l'équilibre	617
1	Descriptions microscopique et macroscopique de la matière	617
1.1	Les phases solide, liquide et gaz	617
1.2	L'agitation thermique	618
1.3	Libre parcours moyen	618
1.4	Échelles microscopique, mésoscopique et macroscopique	619
1.5	État microscopique et état macroscopique	619
2	Étude d'un gaz à l'échelle microscopique	620
2.1	Distribution des vitesses moléculaires	620
2.2	Pression	621
2.3	Température	621
3	Système thermodynamique, variables d'état	622
3.1	Système thermodynamique	622
3.2	Variables d'état	623
4	Équilibre thermodynamique	624
4.1	Définition	624
4.2	Équilibre thermodynamique local	625
4.3	Conditions d'équilibre	625
4.4	Équation d'état	626
5	Énergie interne, capacité thermique à volume constant	628
5.1	L'énergie interne U	628
5.2	La capacité thermique à volume constant C_V	629
5.3	Cas d'un gaz parfait	629
5.4	Cas d'une phase condensée incompressible	631
6	Étude expérimentale d'un fluide réel	632
6.1	Dispositif expérimental	632
6.2	Étude expérimentale du gaz SF_6 dans le diagramme d'Amagat	632
6.3	Étude expérimentale de SF_6 dans le diagramme de Clapeyron	634
6.4	Diagramme de phase (P,T) expérimental	636
7	Corps pur diphasé en équilibre	636
7.1	Changements d'état physique	636
7.2	Diagramme de phases (P,T)	637
7.3	Variables d'état d'un système diphasé	639
7.4	Étude de l'équilibre liquide-gaz	640
7.5	Équilibre liquide-vapeur en présence d'une atmosphère inerte	643
	Méthodologie	645

TABLE DES MATIÈRES

Programme officiel et sommaire des exercices	646
Exercices	648
Corrigés	651
23 Énergie échangée par un système au cours d'une transformation	655
1 Transformation thermodynamique	655
1.1 Transformation, état initial, état final	655
1.2 Différents types de transformations	656
1.3 Influence du choix du système	658
2 Travail des forces de pression	659
2.1 Expression générale du travail de la pression extérieure	659
2.2 Travail des forces de pression dans deux cas particuliers	661
2.3 Travail des forces de pression dans le cas d'une transformation mé- caniquement réversible	662
3 Transfert thermique	665
3.1 Définition	665
3.2 Les trois modes de transfert thermique	665
3.3 Transformation adiabatique	666
3.4 Notion de thermostat	667
3.5 Retour sur les transformations monotherme et isotherme	668
Méthodologie	669
Programme officiel et sommaire des exercices	670
Exercices	671
Corrigés	673
24 Premier principe. Bilans d'énergie.	677
1 Le premier principe de la thermodynamique	677
1.1 Énergie d'un système	677
1.2 Premier principe de la thermodynamique	678
1.3 Premier principe de la thermodynamique entre deux états voisins	679
1.4 Obtention de la valeur du transfert thermique	680
1.5 Transfert thermique dans une transformation isochore sans travail autre que celui de la pression	680
1.6 Exemples d'application du premier principe	680
2 La fonction d'état enthalpie	683
2.1 Définitions	683
2.2 Premier principe pour une transformation monobare avec équilibre mécanique dans l'état initial et l'état final	684

TABLE DES MATIÈRES

2.3	Premier principe pour une transformation isobare	684
2.4	Transfert thermique dans une transformation isobare sans travail autre que celui de la pression	685
2.5	Enthalpie d'un gaz parfait	685
2.6	Enthalpie d'une phase condensée indilatable et incompressible	686
2.7	Enthalpie d'un système diphasé	687
3	Mesures de grandeurs thermodynamiques	689
3.1	Le calorimètre	689
3.2	Détermination d'une capacité thermique massique	690
3.3	Détermination d'une enthalpie de changement d'état	691
3.4	Mesure de la valeur en eau du calorimètre	692
	Méthodologie	694
	Programme officiel et sommaire des exercices	695
	Exercices	696
	Corrigés	699
25	Deuxième principe. Bilans d'entropie.	703
1	Le deuxième principe de la thermodynamique	703
1.1	Transformations irréversibles et transformations réversibles	703
1.2	Le deuxième principe de la thermodynamique	705
2	Entropie d'un échantillon de corps pur	707
2.1	Entropie d'un gaz parfait	707
2.2	Entropie d'une phase condensée indilatable et incompressible	710
2.3	Entropie d'un système diphasé	711
3	Exemples de bilans d'entropie	712
3.1	Méthode générale	712
3.2	Exemple 1 : détente de Joule - Gay Lussac	712
3.3	Exemple 2 : mise en contact avec un thermostat	713
3.4	Exemple 3 : compression d'un gaz parfait	715
3.5	Exemple 4 : chauffage par effet Joule	717
3.6	Exemple 5 : solidification d'un liquide surfondu	718
4	Interprétation microscopique de l'entropie	719
	Méthodologie	721
	Programme officiel et sommaire des exercices	722
	Exercices	723
	Corrigés	729
26	Machines thermiques	737

TABLE DES MATIÈRES

1	Machines thermiques dithermes	737
1.1	Introduction	737
1.2	Application des deux principes à une machine thermique	737
2	Moteur thermique	738
2.1	Sens des échanges d'énergie	738
2.2	Rendement du moteur	738
2.3	Théorème de Carnot	738
2.4	Rendements des moteurs thermiques réels	739
2.5	Cogénération	739
3	Machine frigorifique	741
3.1	Sens des échanges d'énergie	741
3.2	Efficacité d'une machine frigorifique	741
3.3	Théorème de Carnot	741
3.4	Efficacité d'une machine thermique réelle	742
4	Pompe à chaleur	742
4.1	Sens des échanges d'énergie	742
4.2	Efficacité d'une pompe à chaleur	743
4.3	Théorème de Carnot	743
4.4	Efficacité d'une pompe à chaleur réelle	744
	Méthodologie	745
	Programme officiel et sommaire des exercices	746
	Exercices	747
	Corrigés	751

VI Induction et forces de Laplace 757

27 Le champ magnétique 759

1	Le champ magnétique	759
1.1	Les champs en physique	759
1.2	Un champ vectoriel permet de décrire une interaction à distance . . .	760
1.3	Unités et ordres de grandeur	760
2	Cartes de champ magnétique	760
2.1	Spire circulaire de courant	761
2.2	Bobine longue	761
2.3	Aimant	764
3	Invariances d'une distribution de courant	764
3.1	Invariance par translation le long d'un axe	764

TABLE DES MATIÈRES

3.2	Invariance par rotation autour d'un axe	764
3.3	Conclusion	765
4	Propriétés de symétries du champ magnétique	765
4.1	Symétries et antisymétries d'une distribution de courant	765
4.2	Observation du champ magnétique d'une spire de courant	766
4.3	Règles de symétrie pour le champ magnétique	766
5	Moment magnétique	767
5.1	Vecteur surface d'une spire plane	767
5.2	Définition du moment magnétique	767
5.3	Moment magnétique d'un aimant	767
5.4	Lignes de champ d'un moment magnétique	768
	Méthodologie	769
	Programme officiel et sommaire des exercices	770
	Exercices	771
	Corrigés	773
28	Actions d'un champ magnétique	775
1	Densité linéique de force de Laplace	775
1.1	Force de Laplace sur un tronçon rectiligne dans un champ uniforme	775
1.2	Force élémentaire de Laplace	776
1.3	De la force de Lorentz à la force de Laplace	776
2	Résultante et puissance dans le cas d'une translation	776
2.1	Force de Laplace sur une tige en translation	776
2.2	Puissance de la force Laplace	777
3	Couple magnétique	778
3.1	Couple de Laplace exercé par un champ magnétique uniforme sur une spire rectangulaire	778
3.2	Influence du couple de Laplace	779
3.3	Puissance du couple de Laplace	779
4	Action d'un champ magnétique uniforme sur un aimant	780
4.1	Orientation d'un aimant	780
4.2	Positions d'équilibre	780
4.3	Effet moteur d'un champ magnétique tournant	781
	Méthodologie	782
	Programme officiel et sommaire des exercices	783
	Exercices	784
	Corrigés	787

TABLE DES MATIÈRES

29 Lois de l'induction	791
1 Expériences d'induction électromagnétique	791
1.1 Expérience historique de Faraday	791
1.2 Autres expériences	792
1.3 Interprétation	792
2 Loi de Faraday	793
2.1 Flux magnétique	793
2.2 Force électromotrice induite	794
2.3 Convention d'algébrisation	794
2.4 Exceptions à la règle du flux	795
2.5 Conditions d'application de la loi de Faraday dans le cas d'un conducteur en mouvement dans un champ magnétique	796
3 Loi de Lenz	796
Programme officiel et sommaire des exercices	797
30 Circuit fixe dans un champ magnétique variable	799
1 Auto-induction	799
1.1 Coefficient d'auto-induction	799
1.2 Exemple de calcul d'une inductance propre	800
1.3 Force électromotrice auto-induite	801
1.4 Schéma électrique	801
1.5 Loi de Lenz	801
1.6 Mesure expérimentale de l'inductance propre d'une bobine	801
1.7 Bilan d'énergie	801
2 Induction mutuelle	802
2.1 Coefficient d'induction mutuelle	802
2.2 Exemple de calcul d'une inductance mutuelle	803
2.3 Forces électromotrices induites dans les deux circuits	804
2.4 Schéma électrique	804
2.5 Étude de deux circuits couplés	805
3 Transformateur de tension	807
3.1 Constitution	807
3.2 Principe de fonctionnement	807
3.3 Utilisations	808
Méthodologie	809
Programme officiel et sommaire des exercices	812
Exercices	813
Corrigés	818