

PHYSIQUE

MPSI-MP2I

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

MPSI-MP2I

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 978-2-10-082092-4

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

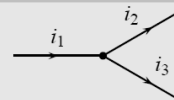
La résistance de sortie R_s d'un générateur de fonction est de l'ordre de 50Ω . Branché aux bornes d'une résistance de l'ordre du $k\Omega$, donc très supérieures à R_s , il se comporte pratiquement comme un générateur idéal, d'après la remarque de la page 121.

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.	<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 un passage en seconde année puis une belle intégration.

Ce livre est commun aux filières MPSI et MP2I. Afin de respecter les particularités de chaque classe, des ajouts de cours sont proposés, repérés en noir en MPSI et en gris en MP2I. En fin de chapitre, le programme officiel et sommaire des exercices insiste sur ceux à destination de chaque classe, avec le même code couleur.

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	63
	Corrigés	67
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
4	MP2I : lunette astronomique	82
4.1	MP2I : Principe général d'une lunette	82
4.2	MP2I : La lunette astronomique	83
	Méthodologie	84

Programme officiel et sommaire des exercices	86
Exercices	88
Corrigés	94

II Signaux électriques 103

4 Circuits électriques dans l'ARQS 105

1	Intensité du courant électrique	105
1.1	Charge électrique	105
1.2	Conducteurs électriques	106
1.3	Le courant électrique	107
1.4	Intensité d'un courant stationnaire dans un fil	108
1.5	Mesure de l'intensité d'un courant	109
1.6	L'approximation des régimes quasi-stationnaires (ARQS)	109
1.7	Intensité d'un courant variable	110
1.8	Loi des nœuds	110
2	Circuit électrique	111
3	Tension électrique	112
3.1	Mesure d'une tension	112
3.2	Additivité des tensions	113
3.3	Loi des mailles	113
3.4	Potentiel électrique	114
3.5	La masse	115
4	Dipôles électrocinétiques en courant continu	115
4.1	Puissance, conventions générateur et récepteur	115
4.2	Le résistor	116
4.3	Les générateurs de tension	117
5	Associations de dipôles	117
5.1	Associations série et parallèle	117
5.2	Lois d'association des résistances	118
5.3	Associations de générateurs	118
6	Ponts diviseurs	118
6.1	Diviseur de tension	118
6.2	Diviseur de courant	119
7	Résistances de sortie et d'entrée	119
7.1	Résistance d'entrée	119
7.2	Résistance de sortie	120

TABLE DES MATIÈRES

8	Dipôles électrocinétiques fondamentaux du régime variable	120
8.1	Le générateur idéal de tension variable	120
8.2	Le résistor	120
8.3	Le condensateur	120
8.4	La bobine	121
9	Puissance et énergie en régime variable	122
9.1	Les unités	122
9.2	Puissance instantanée reçue par un dipôle en régime variable	122
9.3	Puissance dissipée dans un résistor	122
9.4	Énergie stockée dans un condensateur	122
9.5	Énergie stockée dans une bobine	123
	Méthodologie	124
	Programme officiel et sommaire des exercices	126
	Exercices	128
	Corrigés	132
5	Circuit linéaire du premier ordre	137
1	Étude expérimentale d'un circuit RC série	137
1.1	Montage	137
1.2	Régimes transitoire et permanent	137
2	Modélisation	138
2.1	Équation différentielle sur $u_C(t)$	138
2.2	Constante de temps	138
2.3	Calcul de la tension $u_C(t)$	138
2.4	Interprétation physique	140
2.5	Bilan énergétique	141
3	Régime libre du circuit RC	141
3.1	Observation de la réponse à un signal créneau	141
3.2	Modélisation du régime libre	141
4	Étude de la tension $u_R(t)$	142
4.1	Réponse indicielle	142
4.2	Équation différentielle sur $u_R(t)$	143
4.3	Détermination de la condition initiale	143
4.4	Résolution de l'équation différentielle	143
4.5	Régime libre	144
5	Exemple de circuit inductif	144
5.1	Schéma du montage	144
5.2	Équation différentielle sur $i(t)$	145

5.3	Calcul de l'intensité $i(t)$	145
6	Simulation	146
	Méthodologie	148
	Programme officiel et sommaire des exercices	152
	Exercices	154
	Corrigés	160
6	Oscillateur harmonique	167
1	Un oscillateur harmonique mécanique (MPSI)	167
1.1	Système étudié	167
1.2	Obtention d'une équation différentielle	167
1.3	Définition d'un oscillateur harmonique	168
1.4	Résolution de l'équation différentielle	169
1.5	Signal sinusoïdal	169
2	Un oscillateur harmonique électrique	171
2.1	Système étudié	171
2.2	Mise en équation	171
2.3	Conditions initiales	171
2.4	Résolution de l'équation différentielle	172
2.5	Bilan de puissance et d'énergie	172
	Méthodologie	173
	Programme officiel et sommaire des exercices	176
	Exercices	177
	Corrigés	180
7	Circuit linéaire du second ordre	183
1	Étude expérimentale d'un circuit <i>RLC</i> série	183
1.1	Montage	183
1.2	Régimes transitoire et permanent	183
2	Équation différentielle sur la tension u_C	185
2.1	Mise en équation	185
2.2	Pulsation propre et facteur de qualité	185
3	Détermination de la tension $u_C(t)$	186
3.1	Recherche des conditions initiales	186
3.2	Solution	187
4	Durée du régime transitoire	187
4.1	Définition du temps de réponse T_R	187
4.2	Cas des systèmes peu amortis	188

TABLE DES MATIÈRES

5	Réponse à un signal créneaux	189
5.1	Observations expérimentales	189
5.2	Modélisation du régime libre	189
6	Bilan énergétique	190
7	Analogie entre un circuit <i>RLC</i> et un oscillateur mécanique	191
	Méthodologie	192
	Programme officiel et sommaire des exercices	194
	Exercices	196
	Corrigés	199
8	Régime sinusoïdal - Résonance	203
1	Régime transitoire et régime sinusoïdal forcé	203
1.1	Exemple	203
1.2	Généralisation	205
2	Signaux complexes en régime sinusoïdal forcé	205
2.1	Fondements de la méthode complexe	205
2.2	Exemple d'application	206
3	Impédance complexe	208
3.1	Impédance complexe d'un dipôle passif	208
3.2	Impédance complexe des dipôles de base	209
3.3	Association d'impédances complexes	210
3.4	Ponts diviseurs	211
4	Résonance d'intensité dans un circuit <i>RLC</i> série	211
4.1	Expérience	211
4.2	Interprétation par la méthode complexe	212
4.3	Facteur de qualité	214
4.4	Détermination expérimentale des paramètres de la résonance	214
5	Résonance de charge d'un circuit <i>RLC</i> série	215
5.1	Étude en notation complexe	215
5.2	Détermination expérimentale de ω_0 et Q	216
	Méthodologie	217
	Programme officiel et sommaire des exercices	220
	Exercices	222
	Corrigés	228
9	Fonction de transfert - diagramme de Bode	237
1	Fonction de transfert	237
1.1	Position du problème	237

1.2	Définition de la fonction de transfert	237
1.3	Fonction de gain et fonction de phase	238
1.4	Réponse du filtre à un signal sinusoïdal	238
1.5	Lien entre équation différentielle et fonction de transfert	238
2	Diagramme de Bode	239
2.1	Le gain en décibel	239
2.2	Mesure d'un gain en décibel	239
2.3	Le diagramme de Bode	240
2.4	Étude de la courbe d'amplitude	241
2.5	Domaine dérivateur, domaine intégrateur	242
3	Exemples de filtres	242
3.1	Filtre passe-bas du premier ordre	242
3.2	Filtre passe-haut du premier ordre	244
3.3	Filtre passe-bas du deuxième ordre (MPSI)	245
3.4	Filtre passe-bande du deuxième ordre	247
	Méthodologie	250
	Programme officiel et sommaire des exercices	258
	Exercices	259
	Corrigés	263
10	Filtrage d'un signal périodique	269
1	Contenu spectral d'un signal périodique	269
1.1	Valeur moyenne	269
1.2	Développement en série de Fourier	269
1.3	Exemple	270
1.4	Influence des basses fréquences	270
1.5	Influence des hautes fréquences	272
2	Puissance moyenne	272
2.1	Valeur efficace	272
2.2	Conservation de la puissance : formule de Parseval (MPSI)	273
3	Filtrage	274
4	Réponse d'un filtre à un signal périodique non sinusoïdal	274
5	Étude du filtrage d'un créneau périodique	275
5.1	Filtrage passe-bas	275
5.2	Réalisation d'un moyennneur	276
5.3	Filtrage passe-haut	276
5.4	Filtrage passe-bande	278
6	Réponse indicielle et contenu spectral	279

TABLE DES MATIÈRES

7	Enrichissement du spectre par un système non linéaire	281
7.1	Exemple : le circuit multiplieur	282
7.2	Conclusion	282
8	Mise en cascade de filtres	283
9	Simulation	285
	Méthodologie	287
	Programme officiel et sommaire des exercices	291
	Exercices	293
	Corrigés	300
 III Ondes		307
 11 Propagation d'un signal		309
1	Exemples de signaux	309
1.1	Nature physique des signaux	309
1.2	Analyse spectrale	310
2	Phénomène de propagation	310
2.1	Observations expérimentales	310
2.2	Ondes et signaux physiques	311
2.3	Onde progressive	312
2.4	Onde progressive sinusoïdale	315
2.5	Milieux dispersifs ou non-dispersifs (MPSI)	318
3	MP2I : la diffraction de la lumière	322
3.1	MP2I : diffraction par une fente	322
3.2	MP2I : universalité du phénomène de diffraction	323
	Méthodologie	324
	Programme officiel et sommaire des exercices	325
	Exercices	327
	Corrigés	333
 12 Phénomène d'interférences		339
1	Superposition de deux signaux sinusoïdaux de même fréquence	339
1.1	Expérimentation mathématique	339
1.2	Amplitude de la somme de deux signaux sinusoïdaux	339
1.3	Influence du déphasage	341
2	Interférence entre deux ondes acoustiques ou mécaniques de même fréquence	342
2.1	Phénomène d'interférence	342

2.2	Observation expérimentale	342
2.3	Étude théorique	343
2.4	Application à l'expérience	344
3	Interférences lumineuses avec les trous de Young	344
3.1	Particularité d'une expérience d'interférences lumineuses	344
3.2	Intensité lumineuse (MPSI)	345
3.3	Formule de Fresnel (MPSI)	345
3.4	Les trous de Young	346
	Méthodologie	350
	Programme officiel et sommaire des exercices	351
	Exercices	353
	Corrigés	359

IV Mécanique 365

13 Cinématique du point 367

1	Notion de point en physique	367
1.1	Définition d'un solide	367
1.2	Définition d'un point	368
1.3	Quand peut-on assimiler un système à un point ?	368
2	Repérage d'un point du plan	368
2.1	Intérêt d'avoir plusieurs systèmes de coordonnées	368
2.2	Repérage d'un point sur une droite.	368
2.3	Repérage d'un point dans le plan	368
3	Repérage d'un point dans l'espace	371
3.1	Repérage cartésien	371
3.2	Repérage cylindrique	371
3.3	Repérage sphérique	372
4	Cinématique du point	374
4.1	Notion de référentiel	374
4.2	Vecteurs position, déplacement, vitesse et accélération	376
5	Utilisation des différents systèmes de coordonnées	378
5.1	Coordonnées cartésiennes	378
5.2	Coordonnées cylindro-polaire	380
5.3	Coordonnées sphériques	383
6	Études de mouvements en coordonnées cartésiennes	385
6.1	Mouvement rectiligne et uniforme	385

TABLE DES MATIÈRES

6.2	Mouvements à vecteur accélération constante	386
7	Mouvements circulaires	387
7.1	Mouvement circulaire et uniforme	387
7.2	Généralisation : mouvement circulaire non uniforme	388
8	Interprétation du vecteur accélération	389
8.1	Repérage local le long d'une trajectoire plane : repère de Frenet . . .	389
8.2	Interprétation des composantes de l'accélération	390
	Méthodologie	392
	Programme officiel et sommaire des exercices	394
	Exercices	397
	Corrigés	402
14	Principes de la dynamique newtonienne	409
1	Éléments cinétiques d'un point matériel	409
1.1	Masse	409
1.2	Quantité de mouvement	410
2	Les trois lois de Newton	411
2.1	Première loi de Newton : principe d'inertie	411
2.2	Deuxième loi de Newton : principe fondamental de la dynamique . .	412
2.3	Troisième loi de Newton : principe des actions réciproques	414
3	Limite de validité de la mécanique classique	414
3.1	Qu'est-ce qu'un principe ?	414
3.2	Les hypothèses de la mécanique classique	414
3.3	Les limites de la mécanique classique	415
4	Classification des forces	415
4.1	Les quatre interactions fondamentales	415
4.2	Forces à distance	416
4.3	Forces de contact	419
5	Chute libre dans le champ de pesanteur	424
5.1	Mise en équation	424
5.2	Chute libre dans le vide	424
5.3	Chute libre avec frottements proportionnels à la vitesse	425
5.4	Chute libre avec frottements proportionnels au carré de la vitesse . .	427
5.5	Comparaison des deux modèles de frottements	429
6	Tir d'un projectile dans le champ de pesanteur	429
6.1	Mise en équation	429
6.2	Tir dans le vide	430
6.3	Tir en tenant compte de la résistance de l'air	431

7	Le pendule simple	433
7.1	Modélisation	433
7.2	Équation du mouvement	433
7.3	Résolution numérique	434
7.4	Linéarisation et résolution dans le cas des faibles amplitudes	434
	Méthodologie	435
	Programme officiel et sommaire des exercices	437
	Exercices	440
	Corrigés	448
15	Approche énergétique de la dynamique du point	459
1	Travail et puissance d'une force	459
1.1	Introduction et notations	459
1.2	Puissance d'une force	459
1.3	Travail élémentaire d'une force	460
1.4	Travail d'une force au cours d'un déplacement	460
2	Premiers exemples de calculs de travaux	461
2.1	Travail d'une force constamment perpendiculaire au mouvement	461
2.2	Travail d'une force constante	461
2.3	Travail d'une force de frottement de norme constante	461
3	Théorème de l'énergie cinétique	462
3.1	Définition de l'énergie cinétique	462
3.2	Théorème de l'énergie cinétique en référentiel galiléen	462
3.3	Utilisation du théorème de l'énergie cinétique	463
3.4	Intérêt d'une approche énergétique	464
4	Énergie potentielle et forces conservatives	464
4.1	Définitions	464
4.2	Gradient d'énergie potentielle (MPSI)	465
4.3	Lien entre force conservative et gradient d'énergie potentielle (MPSI)	466
4.4	Exemples de forces conservatives	467
4.5	Exemples de forces non conservatives	468
5	Énergie mécanique	468
5.1	Définition de l'énergie mécanique	468
5.2	Cas de conservation de l'énergie mécanique	469
5.3	Cas général : non conservation de l'énergie mécanique	469
	Méthodologie	471
	Programme officiel et sommaire des exercices	473
	Exercices	475

TABLE DES MATIÈRES

Corrigés	480
16 Mouvement conservatif à une dimension	489
1 Étude qualitative des mouvements et des équilibres	489
1.1 Exemple introductif	489
1.2 Position du problème	490
1.3 Analyse du mouvement à l'aide d'un graphe énergétique	490
1.4 Analyse des équilibres à l'aide d'un graphe énergétique	491
2 Mouvement conservatif dans un puits de potentiel	494
2.1 Mouvement dans un puits de potentiel harmonique	494
2.2 Mouvement dans un puits de potentiel quelconque	496
Méthodologie	499
Programme officiel et sommaire des exercices	500
Exercices	501
Corrigés	504
17 Mouvement d'une particule chargée dans un champ électrique ou magnétique	511
1 Force de Lorentz	511
1.1 Rappel de l'expression	511
1.2 Différence entre les composantes électriques et magnétiques	512
1.3 Ordre de grandeur et conséquences	512
2 Mouvement dans un champ électrique uniforme	513
2.1 Équation du mouvement	513
2.2 Étude de la trajectoire	514
2.3 Accélération d'une particule chargée par un champ électrique	515
3 Mouvement dans un champ magnétique	518
3.1 Le mouvement est uniforme	518
3.2 Étude de la trajectoire	519
4 Quelques applications de ces mouvements	521
4.1 Expérience de Thomson	521
4.2 Cyclotron	522
Méthodologie	524
Programme officiel et sommaire des exercices	525
Exercices	526
Corrigés	532
18 Moment cinétique	539
1 Observations préliminaires	539

1.1	Exemples introductifs	539
1.2	Notion intuitive de bras de levier	540
2	Moment cinétique d'un point matériel	540
2.1	Définition du moment cinétique	540
3	Moment d'une force	542
3.1	Moment d'une force par rapport à un point O	542
3.2	Moment d'une force par rapport à un axe orienté Δ	543
4	Loi du moment cinétique pour un point matériel	544
4.1	Loi du moment cinétique par rapport à un point fixe	545
4.2	Cas de conservation du moment cinétique	545
4.3	Loi du moment cinétique par rapport à un axe fixe	545
	Méthodologie	546
	Programme officiel et sommaire des exercices	547
	Exercices	548
	Corrigés	552
19	Mouvement dans un champ de force centrale. Champs newtoniens	561
1	Force centrale conservative	561
1.1	Qu'est-ce qu'une force centrale conservative ?	561
1.2	Exemples de forces centrales conservatives	562
1.3	Observations de mouvements à force centrale conservative	563
2	Généralités sur les forces centrales conservatives	565
2.1	Conséquence du caractère central de la force	565
2.2	Conséquence du caractère conservatif de la force	567
3	Cas particulier de l'attraction gravitationnelle	568
3.1	Position du problème	568
3.2	Étude qualitative du mouvement radial	568
3.3	Détermination de la trajectoire par une méthode numérique	569
4	Étude directe de la trajectoire circulaire	572
4.1	Position du problème	572
4.2	Étude à partir du principe fondamental de la dynamique	572
5	Application aux satellites terrestres (MPSI)	574
5.1	Différents types de satellites terrestres	574
5.2	Cas des satellites géostationnaires	575
	Méthodologie	578
	Programme officiel et sommaire des exercices	579
	Exercices	582
	Corrigés	588

TABLE DES MATIÈRES

20 Cinématique du solide	597
1 Repérage d'un solide	597
1.1 Définition d'un solide	597
1.2 Repérage d'un solide dans l'espace	597
2 Mouvement de translation	598
2.1 Définition	598
2.2 Mouvement d'un point d'un solide en translation	598
2.3 Conséquences	599
2.4 Deux mouvements de translations remarquables	599
3 Solides en rotation autour d'un axe fixe	599
3.1 Définition	599
3.2 Mouvement d'un point d'un solide en rotation	600
3.3 Conséquences	601
3.4 Quelques exemples de rotation autour d'un axe fixe	601
Méthodologie	602
Programme officiel et sommaire des exercices	603
Exercices	604
Corrigés	605
21 Solide en rotation autour d'un axe fixe	607
1 Moment cinétique d'un solide ou d'un système de points	607
1.1 Cas d'un point matériel : notion de moment d'inertie	607
1.2 Cas d'un système déformable	607
1.3 Cas d'un solide en rotation par rapport à un axe	608
2 Théorème du moment cinétique pour un solide en rotation	610
2.1 Rappel sur le moment d'une force	610
2.2 Théorème scalaire du moment cinétique pour un solide	610
2.3 Cas de conservation du moment cinétique	611
3 Actions mécaniques s'exerçant sur un solide en rotation	611
3.1 Couples	611
3.2 Liaison pivot d'axe (Oz)	613
4 Pendule pesant (MPSI)	614
4.1 Position du problème et équation du mouvement	614
4.2 Oscillations de faible amplitude	615
4.3 Intégrale première du mouvement et étude qualitative	616
4.4 Résolution numérique	617
5 Énergie d'un solide en rotation autour d'un axe fixe	619
5.1 Énergie cinétique d'un solide en rotation	619

5.2	Puissance d'une force appliquée à un solide en rotation	619
5.3	Théorème de l'énergie cinétique pour un solide indéformable	620
	Méthodologie	621
	Programme officiel et sommaire des exercices	622
	Exercices	624
	Corrigés	628
V	Thermodynamique	635
	Programme de thermodynamique en MP2I	637
22	Système thermodynamique à l'équilibre	641
1	Descriptions microscopique et macroscopique de la matière	641
1.1	Les phases solide, liquide et gaz	641
1.2	L'agitation thermique	642
1.3	Libre parcours moyen (MPSI)	642
1.4	Échelles microscopique, mésoscopique et macroscopique	643
1.5	État microscopique et état macroscopique	643
2	Étude d'un gaz à l'échelle microscopique	644
2.1	Distribution des vitesses moléculaires (MPSI)	644
2.2	Pression	645
2.3	Température cinétique (MPSI)	645
3	Système thermodynamique, variables d'état	646
3.1	Système thermodynamique	646
3.2	Variables d'état	647
4	Équilibre thermodynamique	648
4.1	Définition	648
4.2	Équilibre thermodynamique local	649
4.3	Conditions d'équilibre	649
4.4	Équation d'état	650
5	Énergie interne, capacité thermique à volume constant	652
5.1	L'énergie interne U	652
5.2	La capacité thermique à volume constant C_V	653
5.3	Cas d'un gaz parfait	653
5.4	Cas d'une phase condensée incompressible	655
6	Étude expérimentale d'un fluide réel	656
6.1	Dispositif expérimental	656
6.2	Étude expérimentale du gaz SF ₆ dans le diagramme d'Amagat	656

TABLE DES MATIÈRES

6.3	Étude expérimentale de SF ₆ dans le diagramme de Clapeyron	658
6.4	Diagramme de phase (P,T) expérimental	660
7	Corps pur diphasé en équilibre	660
7.1	Changements d'état physique	660
7.2	Diagramme de phases (P,T)	661
7.3	Variables d'état d'un système diphasé	663
7.4	Étude de l'équilibre liquide-gaz	664
7.5	Équilibre liquide-vapeur en présence d'une atmosphère inerte	667
	Méthodologie	669
	Programme officiel et sommaire des exercices	670
	Exercices	672
	Corrigés	675
23	Énergie échangée par un système au cours d'une transformation	679
1	Transformation thermodynamique	679
1.1	Transformation, état initial, état final	679
1.2	Différents types de transformations	680
1.3	Influence du choix du système	682
2	Travail des forces de pression	683
2.1	Expression générale du travail de la pression extérieure	683
2.2	Travail des forces de pression dans deux cas particuliers	685
2.3	Travail des forces de pression dans le cas d'une transformation mé- caniquement réversible	686
3	Transfert thermique	689
3.1	Définition	689
3.2	Les trois modes de transfert thermique	689
3.3	Transformation adiabatique	690
3.4	Notion de thermostat	691
3.5	Retour sur les transformations monotherme et isotherme	692
	Méthodologie	693
	Programme officiel et sommaire des exercices	694
	Exercices	695
	Corrigés	697
24	Premier principe. Bilans d'énergie.	701
1	Le premier principe de la thermodynamique	701
1.1	Énergie d'un système	701
1.2	Premier principe de la thermodynamique	702

TABLE DES MATIÈRES

1.3	Premier principe de la thermodynamique entre deux états voisins . . .	703
1.4	Obtention de la valeur du transfert thermique	704
1.5	Transfert thermique dans une transformation isochore sans travail autre que celui de la pression	704
1.6	Exemples d'application du premier principe	704
2	La fonction d'état enthalpie	707
2.1	Définitions	707
2.2	Premier principe pour une transformation monobare avec équilibre mécanique dans l'état initial et l'état final	708
2.3	Premier principe pour une transformation isobare	708
2.4	Transfert thermique dans une transformation isobare sans travail autre que celui de la pression	709
2.5	Enthalpie d'un gaz parfait	709
2.6	Enthalpie d'une phase condensée indilatable et incompressible	710
2.7	Enthalpie d'un système diphasé	711
3	Mesures de grandeurs thermodynamiques	713
3.1	Le calorimètre	713
3.2	Détermination d'une capacité thermique massique	714
3.3	Détermination d'une enthalpie de changement d'état	715
3.4	Mesure de la valeur en eau du calorimètre	716
4	MP2I : Modèle linéaire des échanges thermiques	717
4.1	MP2I : Flux ou puissance thermique	717
4.2	MP2I : Résistance thermique	718
4.3	MP2I : Loi de Newton	718
4.4	MP2I : Système indéformable au contact d'un thermostat	719
	Méthodologie	721
	Programme officiel et sommaire des exercices	722
	Exercices	723
	Corrigés	727
25	Deuxième principe. Bilans d'entropie.	731
1	Le deuxième principe de la thermodynamique	731
1.1	Transformations irréversibles et transformations réversibles	731
1.2	Le deuxième principe de la thermodynamique	733
2	Entropie d'un échantillon de corps pur	735
2.1	Entropie d'un gaz parfait	735
2.2	Entropie d'une phase condensée indilatable et incompressible	738
2.3	Entropie d'un système diphasé	739

TABLE DES MATIÈRES

3	Exemples de bilans d'entropie	740
3.1	Méthode générale	740
3.2	Exemple 1 : détente de Joule - Gay Lussac	740
3.3	Exemple 2 : mise en contact avec un thermostat	741
3.4	Exemple 3 : compression d'un gaz parfait	743
3.5	Exemple 4 : chauffage par effet Joule	745
3.6	Exemple 5 : solidification d'un liquide surfondu	746
4	Interprétation microscopique de l'entropie	747
	Méthodologie	749
	Programme officiel et sommaire des exercices	750
	Exercices	751
	Corrigés	757
26	Machines thermiques	765
1	Machines thermiques dithermes	765
1.1	Introduction	765
1.2	Application des deux principes à une machine thermique	765
2	Moteur thermique	766
2.1	Sens des échanges d'énergie	766
2.2	Rendement du moteur	766
2.3	Théorème de Carnot	766
2.4	Rendements des moteurs thermiques réels	767
2.5	Cogénération	767
3	Machine frigorifique	769
3.1	Sens des échanges d'énergie	769
3.2	Efficacité d'une machine frigorifique	769
3.3	Théorème de Carnot	769
3.4	Efficacité d'une machine thermique réelle	770
4	Pompe à chaleur	770
4.1	Sens des échanges d'énergie	770
4.2	Efficacité d'une pompe à chaleur	771
4.3	Théorème de Carnot	771
4.4	Efficacité d'une pompe à chaleur réelle	772
	Méthodologie	773
	Programme officiel et sommaire des exercices	774
	Exercices	775
	Corrigés	779

VI	Induction et forces de Laplace	785
27	Le champ magnétique	787
1	Le champ magnétique	787
1.1	Les champs en physique	787
1.2	Un champ vectoriel permet de décrire une interaction à distance . . .	788
1.3	Unités et ordres de grandeur	788
2	Cartes de champ magnétique	788
2.1	Spire circulaire de courant	789
2.2	Bobine longue	789
2.3	Aimant	792
3	Invariances d'une distribution de courant	792
3.1	Invariance par translation le long d'un axe	792
3.2	Invariance par rotation autour d'un axe	792
3.3	Conclusion	793
4	Propriétés de symétries du champ magnétique (MPSI)	793
4.1	Symétries et antisymétries d'une distribution de courant	793
4.2	Observation du champ magnétique d'une spire de courant	794
4.3	Règles de symétrie pour le champ magnétique	794
5	Moment magnétique	795
5.1	Vecteur surface d'une spire plane	795
5.2	Définition du moment magnétique	795
5.3	Moment magnétique d'un aimant	795
5.4	Lignes de champ d'un moment magnétique	796
	Méthodologie	797
	Programme officiel et sommaire des exercices	798
	Exercices	799
	Corrigés	801
28	Actions d'un champ magnétique	803
1	Densité linéique de force de Laplace	803
1.1	Force de Laplace sur un tronçon rectiligne dans un champ uniforme .	803
1.2	Force élémentaire de Laplace	804
1.3	De la force de Lorentz à la force de Laplace	804
2	Résultante et puissance dans le cas d'une translation	804
2.1	Force de Laplace sur une tige en translation	804
2.2	Puissance de la force Laplace	805
3	Couple magnétique	806

TABLE DES MATIÈRES

3.1	Couple de Laplace exercé par un champ magnétique uniforme sur une spire rectangulaire	806
3.2	Influence du couple de Laplace	807
3.3	Puissance du couple de Laplace	807
4	Action d'un champ magnétique uniforme sur un aimant	808
4.1	Orientation d'un aimant	808
4.2	Positions d'équilibre	808
4.3	Effet moteur d'un champ magnétique tournant	809
	Méthodologie	810
	Programme officiel et sommaire des exercices	811
	Exercices	812
	Corrigés	815
29	Lois de l'induction	819
1	Expériences d'induction électromagnétique	819
1.1	Expérience historique de Faraday	819
1.2	Autres expériences	820
1.3	Interprétation	820
2	Loi de Faraday	821
2.1	Flux magnétique	821
2.2	Force électromotrice induite	822
2.3	Convention d'alébrisation	822
2.4	Exceptions à la règle du flux	823
2.5	Conditions d'application de la loi de Faraday dans le cas d'un conducteur en mouvement dans un champ magnétique	824
3	Loi de Lenz	824
	Programme officiel et sommaire des exercices	825
30	Circuit fixe dans un champ magnétique variable	827
1	Auto-induction	827
1.1	Coefficient d'auto-induction	827
1.2	Exemple de calcul d'une inductance propre	828
1.3	Force électromotrice auto-induite	829
1.4	Schéma électrique	829
1.5	Loi de Lenz	829
1.6	Mesure expérimentale de l'inductance propre d'une bobine	829
1.7	Bilan d'énergie	829
2	Induction mutuelle	830