

**PHYSIQUE**

**PC/PC\***



Marie-Noëlle Sanz

Bernard Salamito | Damien Moulin

**PHYSIQUE**

**PC/PC\***

**TOUT-EN-UN**

6<sup>e</sup> édition

**DUNOD**

*l'intégrale*

Avec la collaboration de :  
François Crépin  
Marie-Hélène Auvray  
Anne-Emmanuelle Badel  
François Clausset

Couverture : création Hokus Pokus, adaptation Studio Dunod

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<sup>er</sup> 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, 2022

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

[www.dunod.com](http://www.dunod.com)

ISBN 978-2-10-083659-8

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



**Marie-Noëlle Sanz**

Marie-Noëlle Sanz, ancienne élève de l'ENS (Paris Sciences Lettres ex-Sèvres Ulm), agrégée de Sciences Physiques, professeur de Chaires Supérieures. Depuis plus de 25 ans, elle enseigne en seconde année de CPGE (PC puis PC\*) au lycée Saint-Louis à Paris. Elle a participé à des jurys de concours, tant à l'écrit qu'à l'oral. Elle a été membre du jury de l'Agrégation (externe et interne). Depuis 2003, elle dirige et coécrit les Tout-en-un (première et deuxième année).



**Bernard Salamito**

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



**Damien Moulin**

Damien Moulin, ancien élève de l'ENS (Paris Sciences Lettres ex-Ulm), diplômé d'un master de physique de l'École Polytechnique, agrégé de Sciences Physiques, enseigne en MPSI au lycée Paul Eluard de Saint-Denis. Il participe à des jurys de concours.



# Avant-propos

La nouvelle édition du TOUT-EN-UN PHYSIQUE PC/PC\* reprend les fondamentaux qui ont assuré, édition après édition, le succès de l'ouvrage, tout en évoluant pour rester conforme aux nouveaux programmes et aux exigences des épreuves de concours. Elle se place dans la continuité du TOUT-EN-UN PHYSIQUE PCSI.

Les lecteurs y trouveront :

- un cours complet qui respecte les programmes officiels ;
- quelques compléments, signalés comme tels ;
- les capacités numériques figurant au programme ;
- de très nombreux exercices de niveaux variés.

Les exercices sont classés en trois catégories :

- S'entraîner : ce sont des exercices d'application directe de cours.
- Approfondir : il s'agit d'exercices plus ambitieux, sujets d'oral ou courts extraits d'écrits de concours.
- Préparer les concours : les énoncés sont plus longs, ils sont issus de problèmes de concours, parfois extrêmement récents, parfois plus anciens mais qui restent d'actualité.

La difficulté des exercices est signalée par une à quatre étoiles.

Les principaux résultats et définitions sont placés dans un encadré gris.

Les points-méthode sont repérés par :

✓ Ceci est un point-méthode.

Enfin, les mises en garde se présentent de la façon suivante :

⚠ Ceci est une mise en garde.

Nous espérons que cet ouvrage sera utile aux étudiants de C.P.G.E mais aussi à tout étudiant intéressé par les Sciences Physiques ainsi qu'aux candidats aux concours du CAPES et de l'Agrégation.

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont participé aux précédentes éditions du TOUT-EN-UN, en particulier François Vandebrouck.





# Table des matières

<b>Avant-propos</b>	<b>1</b>
<b>I Thermodynamique</b>	<b>23</b>
<b>1 Systèmes en écoulement stationnaire</b>	<b>25</b>
1 Les deux principes de la thermodynamique pour un système fermé . . . . .	25
1.1 Le premier principe . . . . .	25
1.2 Le second principe . . . . .	29
2 Principes de la thermodynamique pour un système en écoulement en régime stationnaire . . . . .	32
2.1 Système ouvert . . . . .	32
2.2 Bilan d'une grandeur extensive $Y$ en régime stationnaire . . . . .	33
2.3 Premier principe pour un système en écoulement en régime stationnaire	34
2.4 Second principe pour un système en écoulement en régime stationnaire	38
2.5 Premier et second principes pour un système ouvert sous forme infinitésimale . . . . .	39
3 Diagrammes $(T,s)$ et $(P,h)$ . . . . .	40
3.1 Principe d'un diagramme thermodynamique . . . . .	40
3.2 Le diagramme entropique $(T,s)$ . . . . .	44
3.3 Le diagramme des frigoristes $(P,h)$ . . . . .	46
3.4 Application des deux principes à l'aide des diagrammes . . . . .	48
4 Applications : étude du circuit d'eau d'une centrale électrique thermique . . .	51
4.1 Le cycle de Rankine . . . . .	51
4.2 Représentation du cycle de Rankine dans le diagramme $(\ln P,h)$ . . .	52
4.3 Application des deux principes . . . . .	53
4.4 Rendement . . . . .	54
4.5 Représentation du cycle de Rankine dans le diagramme $(T,s)$ . . . . .	54

TABLE DES MATIÈRES

4.6	Exemple de valeurs numériques . . . . .	55
<b>2</b>	<b>Diffusion de particules</b>	<b>85</b>
1	Diffusion moléculaire . . . . .	85
1.1	Mise en évidence expérimentale . . . . .	85
1.2	Diffusion et convection . . . . .	85
2	Courant de particules . . . . .	86
2.1	Flux de particules à travers une surface . . . . .	86
2.2	Vecteur densité de courant de particules - Exemple dans un cas convectif	86
3	Bilans de particules . . . . .	87
3.1	Bilan de particules à une dimension . . . . .	87
3.2	Cas d'un problème à symétrie cylindrique . . . . .	89
3.3	Cas d'un problème à symétrie sphérique . . . . .	91
3.4	Equation de conservation dans le cas tridimensionnel . . . . .	92
4	Loi de Fick . . . . .	94
4.1	Loi phénoménologique de Fick . . . . .	94
4.2	Limites de validité de la loi de Fick . . . . .	94
5	Équation de diffusion . . . . .	95
5.1	Équation de diffusion à une dimension . . . . .	95
5.2	Équation de diffusion à trois dimensions . . . . .	95
5.3	Phénomènes diffusifs . . . . .	96
5.4	Conditions aux limites et condition initiale . . . . .	97
5.5	Longueur et temps caractéristiques associés . . . . .	98
5.6	Cas du régime stationnaire . . . . .	99
6	Approche microscopique . . . . .	101
6.1	Diffusion et marche au hasard . . . . .	101
6.2	Expression du coefficient de diffusion . . . . .	104
<b>3</b>	<b>Diffusion thermique</b>	<b>129</b>
1	Généralités sur les transferts thermiques . . . . .	129
1.1	Introduction . . . . .	129
1.2	Hypothèse de l'équilibre thermodynamique local . . . . .	130
1.3	Les trois modes de transfert thermique . . . . .	130
2	Flux thermique - Vecteur densité de courant thermique . . . . .	131
2.1	Flux thermique surfacique . . . . .	131
2.2	Vecteur densité de courant thermique . . . . .	132
2.3	Flux thermique traversant une surface . . . . .	133
2.4	Exemple : le flux conducto-convectif . . . . .	133

3	Généralités sur les bilans énergétiques . . . . .	134
3.1	Production d'énergie . . . . .	134
3.2	Bilan énergétique . . . . .	134
3.3	Continuité du flux thermique surfacique . . . . .	136
4	Équation locale de bilan thermique . . . . .	137
4.1	Hypothèses de travail . . . . .	137
4.2	Bilan énergétique local à une dimension . . . . .	138
4.3	Bilan thermique local en symétrie cylindrique . . . . .	139
4.4	Bilan thermique local en symétrie sphérique . . . . .	141
4.5	Bilan thermique local tridimensionnel . . . . .	142
5	Loi de Fourier - Conductivité thermique . . . . .	142
5.1	Loi phénoménologique de Fourier . . . . .	142
5.2	Limites de validité de la loi de Fourier . . . . .	143
5.3	Conductivités thermiques . . . . .	143
6	Équation de la diffusion thermique . . . . .	144
6.1	Équation de la diffusion thermique à une dimension . . . . .	144
6.2	Cas d'une géométrie quelconque . . . . .	145
6.3	Cas où il n'y a pas de sources internes . . . . .	146
6.4	Longueur et temps caractéristiques associés . . . . .	147
6.5	Exercice : bilan entropique à une dimension . . . . .	147
7	Conditions aux limites pour le champ de température . . . . .	148
8	Résolution numérique de l'équation de la diffusion thermique . . . . .	149
8.1	Méthode des différences finies . . . . .	150
8.2	Application au problème du choc thermique . . . . .	151
8.3	Convergence et stabilité . . . . .	152
9	Propriétés du régime permanent . . . . .	154
9.1	Densité de courant thermique en régime permanent . . . . .	154
9.2	Champ de température en régime permanent . . . . .	155
10	Résistance thermique . . . . .	156
10.1	Analogie avec l'électrocinétique . . . . .	156
10.2	Cas unidimensionnel . . . . .	158
10.3	Exercice : résistance thermique d'un manchon cylindrique . . . . .	158
10.4	Approximation des régimes quasi stationnaires . . . . .	159
11	Un exemple de résolution de l'équation de diffusion de la chaleur en régime variable . . . . .	159
<b>4</b>	<b>Rayonnement thermique</b>	<b>181</b>
1	Corps noir . . . . .	181

TABLE DES MATIÈRES

1.1	Réflexion, transmission, absorption . . . . .	181
1.2	Le modèle du corps noir . . . . .	182
2	Le rayonnement d'équilibre thermique . . . . .	182
2.1	Quelques définitions . . . . .	183
2.2	Loi de Planck . . . . .	185
2.3	Loi de Stefan-Boltzmann . . . . .	186
2.4	Loi du déplacement de Wien . . . . .	187
2.5	Flux surfacique émis par un corps noir . . . . .	187
2.6	Résistance thermique radiative . . . . .	188
3	Application à l'étude de l'effet de serre . . . . .	188
3.1	Effet de serre d'une vitre idéale . . . . .	188
3.2	Température d'équilibre de la Terre sans atmosphère . . . . .	190
3.3	Température d'équilibre de la Terre en tenant compte de la présence de l'atmosphère . . . . .	190
3.4	Amélioration du modèle . . . . .	191

**II Mécanique 193**

**5 Changements de référentiels en mécanique classique 195**

1	Exemples . . . . .	195
1.1	Cas de deux référentiels en translation rectiligne l'un par rapport à l'autre . . . . .	195
1.2	Cas d'un référentiel en rotation uniforme autour d'un axe fixe d'un autre référentiel . . . . .	196
1.3	Conclusion . . . . .	197
2	Référentiel en translation par rapport à un autre . . . . .	197
2.1	Transformation de Galilée . . . . .	197
2.2	Composition des vitesses . . . . .	198
2.3	Composition des accélérations . . . . .	199
3	Référentiel en rotation uniforme autour d'un axe fixe . . . . .	200
3.1	Présentation de la situation . . . . .	200
3.2	Composition des vitesses . . . . .	201
3.3	Composition des accélérations . . . . .	201
4	Le point coïncident . . . . .	202
4.1	Notion de point coïncident . . . . .	202
4.2	Cas d'un référentiel en translation . . . . .	202
4.3	Cas d'un référentiel en rotation uniforme par rapport à un axe fixe . . . . .	202

<b>6</b>	<b>Dynamique dans un référentiel non galiléen</b>	<b>213</b>
1	Référentiels galiléens et référentiels non galiléens . . . . .	213
1.1	Référentiels galiléens . . . . .	213
1.2	À la recherche d'un référentiel galiléen . . . . .	214
2	Principe fondamental de la dynamique dans un référentiel non galiléen . . . .	217
2.1	Cas d'un référentiel en translation par rapport à un référentiel galiléen	217
2.2	Cas d'un référentiel en rotation par rapport à un axe fixe d'un référentiel galiléen . . . . .	219
2.3	Récapitulation . . . . .	220
2.4	Exemples d'étude de mouvement dans un référentiel non galiléen . .	221
3	Théorème du moment cinétique dans un référentiel non galiléen . . . . .	224
3.1	Cas d'un référentiel en translation par rapport à un référentiel galiléen	224
3.2	Cas d'un référentiel en rotation par rapport à un axe fixe d'un référentiel galiléen . . . . .	225
3.3	Exemples . . . . .	225
4	Étude énergétique dans un référentiel non galiléen . . . . .	227
4.1	Théorème de l'énergie cinétique en référentiel non galiléen . . . . .	227
4.2	La force d'inertie d'entraînement dérive-t-elle d'une énergie potentielle? . . . . .	228
4.3	Système conservatif dans un référentiel non galiléen . . . . .	229
4.4	Retour sur deux exemples étudiés . . . . .	230
5	Mécanique terrestre . . . . .	231
5.1	Champ de pesanteur . . . . .	231
5.2	Principe fondamental de la dynamique dans le référentiel terrestre . .	234
5.3	Application à l'étude du pendule de Foucault . . . . .	234

### **III Mécanique des fluides** **259**

<b>7</b>	<b>Description d'un fluide en mouvement</b>	<b>261</b>
1	L'approximation des milieux continus . . . . .	261
1.1	Description d'un milieu à différentes échelles . . . . .	261
1.2	L'échelle mésoscopique et la particule de fluide . . . . .	262
1.3	Fluides et solides . . . . .	263
2	Le champ de vitesse dans un fluide en écoulement . . . . .	264
2.1	Description eulérienne . . . . .	264
2.2	Lignes de courant et tubes de champ . . . . .	265
2.3	Écoulement stationnaire . . . . .	267
2.4	Accélération en variables d'Euler; notion de dérivée particulaire . . .	267

TABLE DES MATIÈRES

3	Conservation de la masse dans un écoulement . . . . .	270
3.1	Vecteur densité de courant de masse; débit massique . . . . .	270
3.2	Débit volumique . . . . .	271
3.3	Équation de conservation de la masse . . . . .	272
3.4	Cas particulier d'un écoulement stationnaire . . . . .	275
4	Conditions aux limites cinématiques . . . . .	277
4.1	Cas d'une paroi fixe . . . . .	277
4.2	Cas d'une paroi déformable ou mobile . . . . .	277
4.3	Interface entre deux fluides non miscibles . . . . .	278
4.4	Loin d'un obstacle . . . . .	278
5	Exemples fondamentaux d'écoulements . . . . .	278
5.1	Écoulement incompressible . . . . .	278
5.2	Écoulement irrotationnel . . . . .	280
5.3	Complément : exemple d'écoulement tourbillonnaire et incompressible	284
<b>8</b>	<b>Actions mécaniques dans un fluide en mouvement</b>	<b>299</b>
1	Actions mécaniques s'exerçant sur un fluide . . . . .	299
1.1	Actions à distance; forces volumiques . . . . .	299
1.2	Actions de contact; forces surfaciques . . . . .	300
1.3	Forces de pression . . . . .	301
1.4	Équivalent volumique des forces de pression . . . . .	302
1.5	Force de viscosité de cisaillement . . . . .	303
1.6	Transport diffusif de quantité de mouvement . . . . .	308
2	L'équation de Navier-Stokes . . . . .	311
2.1	Expression pour l'écoulement incompressible d'un fluide newtonien .	311
2.2	Le nombre de Reynolds . . . . .	312
2.3	Équation de Navier-Stokes sous forme adimensionnée . . . . .	313
2.4	Notion de couche limite . . . . .	315
2.5	Modèle de l'écoulement parfait . . . . .	317
3	Conditions aux limites dans un écoulement . . . . .	317
3.1	Conditions aux limites cinématiques . . . . .	317
3.2	Conditions aux limites dynamiques . . . . .	319
3.3	Tableau récapitulatif des conditions aux limites . . . . .	320
4	Étude descriptive de l'écoulement autour d'une sphère . . . . .	321
4.1	Force de traînée et force de portance . . . . .	321
4.2	Analyse de résultats expérimentaux . . . . .	321
4.3	Généralisation . . . . .	325

<b>9</b>	<b>Équations locales de la dynamique des fluides</b>	<b>335</b>
1	Écoulements de fluides réels . . . . .	335
1.1	L'équation de Navier-Stokes . . . . .	335
1.2	Écoulements parallèles . . . . .	336
2	Écoulements parfaits . . . . .	343
2.1	Équation d'Euler . . . . .	343
2.2	Commentaires . . . . .	344
2.3	Quelques conséquences immédiates . . . . .	344
3	Statique des fluides en référentiel non galiléen . . . . .	348
3.1	Premier exemple : équilibre d'un fluide dans une citerne . . . . .	348
3.2	Second exemple : l'aplatissement de la Terre . . . . .	350
4	Le théorème de Bernoulli . . . . .	352
4.1	Énoncé . . . . .	352
4.2	Applications . . . . .	354
<b>10</b>	<b>Bilans macroscopiques</b>	<b>397</b>
1	Introduction . . . . .	397
1.1	Systèmes fermés . . . . .	397
1.2	Exemple : bilan de masse . . . . .	398
2	Bilans de quantité de mouvement . . . . .	400
2.1	Principe . . . . .	400
2.2	Premier exemple : force exercée par un fluide sur les parois d'une conduite de section variable . . . . .	400
2.3	Deuxième exemple : action d'un jet cylindrique sur une plaque . . . . .	403
2.4	Troisième exemple : retour sur l'écoulement de Poiseuille . . . . .	406
3	Bilans d'énergie cinétique . . . . .	408
3.1	Principe . . . . .	408
3.2	Premier exemple : puissance d'une pompe . . . . .	409
3.3	Deuxième exemple : retour sur l'écoulement de Couette plan . . . . .	410
3.4	Troisième exemple : retour sur l'écoulement de Poiseuille . . . . .	412
<b>IV</b>	<b>Électromagnétisme</b>	<b>435</b>
<b>11</b>	<b>Sources du champ électromagnétique</b>	<b>437</b>
1	Charge électrique . . . . .	437
1.1	Rappels . . . . .	437
1.2	Charges ponctuelles . . . . .	437

TABLE DES MATIÈRES

1.3	Densité volumique de charges . . . . .	438
2	Vecteur densité de courant électrique . . . . .	439
2.1	Définition . . . . .	439
2.2	Intensité traversant une surface . . . . .	441
3	Équation de conservation de la charge . . . . .	442
3.1	Cas unidimensionnel . . . . .	442
3.2	Cas général . . . . .	443
3.3	Cas du régime stationnaire . . . . .	444
<b>12</b>	<b>Champ électrostatique</b>	<b>447</b>
1	Charge ponctuelle . . . . .	447
1.1	Loi de Coulomb . . . . .	447
1.2	Champ électrostatique créé par une charge ponctuelle . . . . .	448
1.3	Potentiel électrostatique créé par une charge ponctuelle . . . . .	449
2	Champ créé par une distribution de charges . . . . .	450
2.1	Principe de superposition . . . . .	450
2.2	Champ et potentiel créés par une distribution discrète de charges ponctuelles . . . . .	450
2.3	Champ et potentiel créés par une distribution volumique de charges . . . . .	451
3	Propriétés de symétrie . . . . .	452
3.1	Symétries usuelles des distributions de charges . . . . .	452
3.2	Symétries du champ et du potentiel . . . . .	456
4	Circulation du champ électrostatique - Équation de Maxwell-Faraday . . . . .	461
4.1	Circulation d'un champ de vecteur . . . . .	461
4.2	Circulation du champ électrostatique . . . . .	462
4.3	Équation locale de Maxwell-Faraday . . . . .	463
5	Flux du champ électrostatique - Équation de Maxwell-Gauss . . . . .	464
5.1	Flux d'un champ de vecteurs . . . . .	464
5.2	Équation de Maxwell-Gauss . . . . .	465
5.3	Théorème de Gauss . . . . .	465
5.4	Équation aux dérivées partielles vérifiée par le potentiel . . . . .	467
6	Topographie du champ électrostatique . . . . .	467
6.1	Lignes de champs et équipotentiels . . . . .	467
6.2	Propriétés des lignes de champ électrostatique et des équipotentiels . . . . .	468
6.3	Quelques exemples . . . . .	471
7	Analogie avec le champ gravitationnel . . . . .	473
7.1	Interaction gravitationnelle . . . . .	473
7.2	Champ de gravitation . . . . .	473



7.3	Propriétés du champ de gravitation . . . . .	474
<b>13</b>	<b>Exemples de champs électrostatiques</b>	<b>491</b>
1	Méthodes d'étude des champs et des potentiels . . . . .	491
2	Exemple de problème à symétrie sphérique : sphère uniformément chargée . .	492
2.1	Étude des symétries . . . . .	492
2.2	Application du théorème de Gauss . . . . .	493
2.3	Champ créé par la sphère . . . . .	494
2.4	Application : énergie de constitution d'une sphère uniformément chargée	495
3	Exemple de problème à symétrie cylindrique : cylindre uniformément chargé	496
3.1	Étude des symétries . . . . .	497
3.2	Application du théorème de Gauss . . . . .	497
3.3	Champ créé par le cylindre . . . . .	498
4	Exemples de problèmes à symétrie plane . . . . .	498
4.1	Étude des symétries . . . . .	498
4.2	Calcul du champ et du potentiel par résolution des équations de Maxwell	499
4.3	Calcul du champ par le théorème de Gauss . . . . .	500
4.4	Modélisation surfacique . . . . .	501
4.5	Application au condensateur plan . . . . .	502
<b>14</b>	<b>Dipôle électrostatique</b>	<b>527</b>
1	Potentiel et champ créés . . . . .	527
1.1	Introduction . . . . .	527
1.2	Dipôle électrostatique, approximation dipolaire . . . . .	527
1.3	Moment dipolaire . . . . .	528
1.4	Analyse des symétries et des invariances . . . . .	528
1.5	Potentiel créé par un dipôle électrostatique . . . . .	529
1.6	Champ créé par un dipôle électrostatique . . . . .	530
1.7	Topographie du champ . . . . .	531
2	Action d'un champ extérieur sur un dipôle . . . . .	532
2.1	Cas d'un champ uniforme . . . . .	532
2.2	Cas d'un champ non uniforme . . . . .	534
2.3	Énergie potentielle d'un dipôle rigide dans un champ électrostatique extérieur . . . . .	537
3	Interactions moléculaires . . . . .	538
3.1	Moment dipolaire permanent . . . . .	538
3.2	Quelques valeurs de moments dipolaires . . . . .	539
3.3	Interactions ion-molécules . . . . .	539

## TABLE DES MATIÈRES

3.4	Interaction molécule - molécule . . . . .	540
4	Moment dipolaire induit . . . . .	542
4.1	Polarisabilité . . . . .	542
4.2	Modèle de Thomson . . . . .	543
4.3	Interaction entre un dipôle induit et un dipôle permanent . . . . .	544
4.4	Forces de Van der Waals . . . . .	544
<b>15</b>	<b>Conduction électrique dans un conducteur ohmique</b>	<b>553</b>
1	Loi d'Ohm . . . . .	553
1.1	Modèle de Drude de la conduction électrique . . . . .	553
1.2	Loi d'Ohm en régime variable . . . . .	556
1.3	Résistance électrique . . . . .	557
2	Effet Hall . . . . .	558
2.1	Étude du phénomène . . . . .	558
2.2	Tension de Hall . . . . .	560
2.3	Application à la mesure de champ magnétique . . . . .	561
2.4	Interprétation de la force de Laplace . . . . .	562
3	Aspect énergétique . . . . .	562
<b>16</b>	<b>Champ magnétostatique</b>	<b>565</b>
1	Propriétés locales et globales du champ magnétostatique . . . . .	565
1.1	Équations de Maxwell du champ magnétostatique . . . . .	565
1.2	Flux du champ magnétostatique . . . . .	565
1.3	Circulation du champ magnétostatique - Théorème d'Ampère . . . . .	566
2	Symétries et invariances du champ magnétique . . . . .	567
2.1	Symétries et invariances usuelles des distributions de courant . . . . .	567
2.2	Symétries du champ magnétique . . . . .	569
3	Topographie du champ magnétostatique . . . . .	574
3.1	Propriétés des lignes de champ du champ magnétostatique . . . . .	574
3.2	Comment distinguer une carte de champ électrostatique d'une carte de champ magnétostatique ? . . . . .	575
3.3	Exemples . . . . .	576
4	Exemples de champs magnétostatiques . . . . .	577
4.1	Méthodes d'étude du champ magnétostatique . . . . .	577
4.2	Exemple de problème à symétrie cylindrique : câble infini, de rayon $a$ , parcouru par un courant uniformément réparti en volume . . . . .	578
4.3	Solénoïde long . . . . .	580
<b>17</b>	<b>Dipôle magnétique</b>	<b>607</b>

1	Moment magnétique d'une boucle de courant plane . . . . .	607
1.1	Rappels de première année . . . . .	607
1.2	Moment magnétique atomique . . . . .	608
1.3	Quelques notions sur les propriétés magnétiques de la matière . . . . .	610
2	Action d'un champ magnétique extérieur sur un dipôle magnétique . . . . .	611
2.1	Actions subies par un dipôle dans un champ magnétique uniforme . . . . .	611
2.2	Actions subies par un dipôle dans un champ magnétique non uniforme . . . . .	611
2.3	Énergie potentielle du dipôle dans un champ extérieur . . . . .	611
2.4	L'expérience Stern et Gerlach . . . . .	612
<b>18</b>	<b>Équations de Maxwell</b>	<b>625</b>
1	Champ électromagnétique - Équations de Maxwell . . . . .	625
1.1	Définition du champ électromagnétique . . . . .	625
1.2	Équations de Maxwell . . . . .	625
1.3	Remarques et commentaires . . . . .	626
1.4	Équations de Maxwell et loi de conservation de la charge . . . . .	627
2	Forme intégrale des équations de Maxwell . . . . .	628
2.1	Théorème de Gauss . . . . .	628
2.2	Flux du champ magnétique . . . . .	628
2.3	Loi de Faraday . . . . .	629
2.4	Théorème d'Ampère généralisé . . . . .	630
3	Énergie électromagnétique . . . . .	631
3.1	Puissance cédée par le champ électromagnétique à la matière . . . . .	631
3.2	Bilan d'énergie électromagnétique . . . . .	631
3.3	Équation locale de Poynting . . . . .	633
3.4	Exemples . . . . .	635
4	Approximation des régimes quasi stationnaires . . . . .	638
4.1	Équation de propagation des champs dans un milieu vide de charge et de courant . . . . .	638
4.2	Cadre de l'approximation des régimes quasi stationnaires . . . . .	639
4.3	Exercice : solénoïde en régime lentement variable . . . . .	640
4.4	Approximation des régimes quasi stationnaires à dominante magnétique . . . . .	642
4.5	Équations locales de l'électromagnétisme dans le cadre de l'A.R.Q.S à dominante magnétique . . . . .	643
4.6	Retour sur l'exemple du solénoïde : aspect énergétique . . . . .	646

<b>V</b>	<b>Optique</b>	<b>661</b>
<b>19</b>	<b>Modèle scalaire des ondes lumineuses</b>	<b>663</b>
1	Le modèle scalaire de la lumière . . . . .	663
1.1	Nature de l'onde lumineuse . . . . .	663
1.2	La vibration lumineuse . . . . .	664
1.3	Propriétés de la vibration lumineuse . . . . .	665
2	Éclairement et intensité vibratoire . . . . .	666
2.1	Les récepteurs de l'onde lumineuse . . . . .	666
2.2	Éclairement ou intensité vibratoire . . . . .	667
3	Lumière monochromatique . . . . .	668
3.1	Définitions . . . . .	668
3.2	Domaine visible . . . . .	669
3.3	Notation complexe . . . . .	670
3.4	Expression de l'éclairement . . . . .	670
4	Chemin optique . . . . .	671
4.1	Définition . . . . .	671
4.2	Calcul pratique du chemin optique . . . . .	671
4.3	Relation fondamentale entre le chemin optique et le retard de phase . . . . .	672
4.4	Des exceptions à la règle précédente . . . . .	673
5	Surface d'onde . . . . .	674
5.1	Définition . . . . .	674
5.2	Théorème de Malus . . . . .	674
5.3	Chemin optique et condition de stigmatisme . . . . .	675
6	Onde sphérique, onde plane . . . . .	676
6.1	Onde sphérique . . . . .	676
6.2	Onde plane . . . . .	678
6.3	Expression . . . . .	679
6.4	Complément : l'approximation paraxiale . . . . .	680
7	Lumières réelles . . . . .	683
7.1	Composition spectrale . . . . .	683
7.2	Différents types de lumière . . . . .	684
7.3	Notions sur la transformée de Fourier . . . . .	686
7.4	Trains d'onde . . . . .	690
<b>20</b>	<b>Superposition d'ondes lumineuses</b>	<b>705</b>
1	Superposition de deux ondes lumineuses . . . . .	705
1.1	Éclairement résultant . . . . .	705

1.2	Formule de Fresnel . . . . .	709
1.3	Figure d'interférences . . . . .	712
1.4	Retour sur la notion de cohérence . . . . .	714
1.5	Superposition de deux ondes planes . . . . .	716
2	Superposition de $N$ ondes lumineuses . . . . .	718
2.1	Expression de la vibration lumineuse résultante . . . . .	718
2.2	Éclairement résultant . . . . .	719
<b>21</b>	<b>Dispositif interférentiel par division du front d'onde : les trous d'Young</b>	<b>723</b>
1	Le dispositif des trous d'Young . . . . .	723
1.1	Présentation du dispositif . . . . .	723
1.2	Notion de dispositif interférentiel à division du front d'onde . . . . .	724
1.3	Description du champ d'interférences . . . . .	725
1.4	Généralisation à d'autres dispositifs interférentiels par division du front d'onde . . . . .	730
1.5	Montage de Fraunhofer . . . . .	730
2	Élargissement spatial de la source . . . . .	733
2.1	Influence du déplacement de la source ponctuelle . . . . .	733
2.2	Visibilité des franges produites par deux sources ponctuelles incohérentes . . . . .	734
2.3	Visibilité des franges produites par une source étendue . . . . .	737
3	Élargissement spectral de la source . . . . .	739
3.1	Doublet de longueurs d'onde . . . . .	739
3.2	Source de faible largeur spectrale . . . . .	741
3.3	Éclairage en lumière blanche . . . . .	743
4	Dispositif interférentiel de $N$ fentes d'Young . . . . .	744
4.1	Description du dispositif . . . . .	744
4.2	Ordre d'interférences et éclairage . . . . .	744
4.3	Condition d'interférences totalement constructives . . . . .	746
4.4	Réseau plan de diffraction . . . . .	747
<b>22</b>	<b>L'interféromètre de Michelson</b>	<b>765</b>
1	L'interféromètre de Michelson . . . . .	765
1.1	Présentation du dispositif . . . . .	765
1.2	Les deux voies de l'interféromètre . . . . .	766
1.3	Le dispositif séparateur . . . . .	766
1.4	Schéma de principe de l'interféromètre . . . . .	768
2	Configuration de la lame d'air éclairée par une source étendue . . . . .	768

TABLE DES MATIÈRES

2.1	Définition . . . . .	769
2.2	Observation des franges . . . . .	769
2.3	Franges d'égale inclinaison . . . . .	775
3	Configuration du coin d'air éclairé par une source étendue . . . . .	777
3.1	Définition . . . . .	777
3.2	Observation des franges . . . . .	777
3.3	Franges d'égale épaisseur . . . . .	781

**VI Physique des ondes 797**

**23 Ondes mécaniques unidimensionnelles 799**

1	Corde vibrante . . . . .	799
1.1	Tension d'une corde . . . . .	799
1.2	Mise en place du modèle . . . . .	799
1.3	Équation d'onde . . . . .	800
2	Onde acoustique dans un solide élastique . . . . .	802
2.1	Module d'Young . . . . .	802
2.2	Ondes de déformations longitudinales . . . . .	805
2.3	Récapitulation . . . . .	806
3	Solutions de l'équation de d'Alembert unidimensionnelle . . . . .	806
3.1	Rappels de première année : onde progressive . . . . .	806
3.2	Solution en onde progressive harmonique . . . . .	808
3.3	Solution en ondes progressives . . . . .	810
3.4	Célérité des ondes . . . . .	811
3.5	Onde stationnaire . . . . .	811
4	Propagation dans un milieu limité . . . . .	814
4.1	Régime libre d'une corde fixée à ses deux extrémités . . . . .	814
4.2	Corde fixée à une extrémité : oscillations forcées, résonance . . . . .	817
5	Dispersion-absorption . . . . .	818
5.1	Exemple . . . . .	818
5.2	Interpération . . . . .	820
5.3	Paquets d'ondes . . . . .	822

**24 Ondes acoustiques dans les fluides 867**

1	Approximation acoustique, propagation des ondes sonores . . . . .	867
1.1	Introduction . . . . .	867
1.2	Approximation acoustique . . . . .	868

1.3	Mise en équation eulérienne . . . . .	868
1.4	Équation de propagation pour la surpression . . . . .	871
1.5	Célérité du son . . . . .	872
2	Ondes planes progressives harmoniques . . . . .	875
2.1	Ondes planes . . . . .	875
2.2	Ondes planes progressives harmoniques . . . . .	876
3	Aspect énergétique . . . . .	878
3.1	Puissance transférée à travers une surface $S$ . . . . .	878
3.2	Densité volumique d'énergie . . . . .	878
3.3	Bilan énergétique . . . . .	879
3.4	Densité volumique d'énergie potentielle . . . . .	880
3.5	Densité volumique d'énergie . . . . .	881
3.6	Récapitulation . . . . .	881
3.7	Cas d'une onde plane progressive . . . . .	881
3.8	Cas d'une onde plane progressive harmonique. Valeurs moyennes . . . . .	883
3.9	Cas général . . . . .	884
3.10	Intensité sonore . . . . .	884
4	Ondes sphériques harmoniques . . . . .	887
4.1	Surpression . . . . .	887
4.2	Champ des vitesses . . . . .	888
4.3	Intensité sonore . . . . .	889
5	Réflexion et transmission d'une onde sonore plane progressive sous incidence normale . . . . .	890
5.1	Relation de passage . . . . .	891
5.2	Coefficients de réflexion et de transmission en amplitude . . . . .	892
5.3	Coefficients de réflexion et de transmission en énergie . . . . .	894
6	Complément : tuyaux sonores, ondes stationnaires. Application aux instruments à vent . . . . .	895
6.1	Introduction . . . . .	895
6.2	Conditions aux limites, ondes stationnaires . . . . .	896
6.3	Aspect énergétique . . . . .	899
<b>25</b>	<b>Ondes électromagnétiques</b>	
	<b>    dans le vide</b>	<b>935</b>
1	Équation de propagation des champs . . . . .	935
2	Ondes planes progressives harmoniques . . . . .	936
2.1	Onde plane . . . . .	936

TABLE DES MATIÈRES

2.2	Onde plane progressive harmonique . . . . .	936
2.3	Polarisation des ondes planes progressives harmoniques . . . . .	941
3	Aspect énergétique des ondes planes progressives . . . . .	945
3.1	Densité volumique d'énergie . . . . .	945
3.2	Vecteur de Poynting . . . . .	946
3.3	Valeurs moyennes . . . . .	947
3.4	Quelques ordres de grandeur . . . . .	948
3.5	Interprétation corpusculaire . . . . .	949
4	Analyse d'une lumière polarisée . . . . .	950
4.1	Lumière polarisée et lumière naturelle . . . . .	950
4.2	Lumière polarisée rectilignement . . . . .	950
4.3	Action d'une lame cristalline biréfringente . . . . .	954
4.4	Lames demi-onde . . . . .	955
4.5	Lames quart d'onde . . . . .	957
4.6	Utilisation d'une lame quart-d'onde pour analyser une lumière polarisée elliptiquement ou circulairement . . . . .	961
4.7	Analyse d'une lumière non polarisée . . . . .	963
4.8	Analyse d'une lumière quelconque . . . . .	963
<b>26</b>	<b>Ondes électromagnétiques dans un milieu matériel</b>	<b>983</b>
1	Propagation d'une onde dans un conducteur . . . . .	983
1.1	Équation de Maxwell-Ampère dans le conducteur . . . . .	983
1.2	Équation de propagation du champ électromagnétique . . . . .	984
1.3	Relation de dispersion . . . . .	985
1.4	Vitesse de phase, vitesse de groupe . . . . .	985
1.5	Champ électromagnétique . . . . .	985
1.6	Épaisseur de peau . . . . .	986
1.7	Puissance moyenne . . . . .	987
2	Propagation d'une onde électromagnétique dans un plasma peu dense . . . . .	988
2.1	Description d'un plasma . . . . .	988
2.2	Interaction entre une onde plane progressive harmonique et un plasma . . . . .	991
2.3	Propagation d'une onde électromagnétique plane transverse électrique . . . . .	993
2.4	Étude de la relation de dispersion . . . . .	997
2.5	Aspect énergétique . . . . .	999
3	Réflexion et transmission d'une onde électromagnétique plane progressive harmonique à l'interface entre deux milieux . . . . .	1000
3.1	Indice complexe . . . . .	1000
3.2	Position du problème . . . . .	1001



3.3	Coefficients de réflexion et de transmission du champ électrique . . .	1002
3.4	Coefficients de réflexion et de transmission en puissance . . . . .	1003
3.5	Application au cas d'une interface vide-plasma . . . . .	1005
<b>27</b>	<b>Le LASER - Principe de fonctionnement</b>	<b>1023</b>
1	Quelques repères historiques . . . . .	1023
2	Interaction entre la lumière et la matière . . . . .	1024
2.1	Description du système étudié . . . . .	1024
2.2	Statistique de Maxwell-Boltzmann . . . . .	1024
2.3	Le modèle d'Einstein d'interaction de la lumière avec la matière . . .	1025
2.4	Les coefficients d'Einstein et la loi de Planck du rayonnement . . . .	1028
2.5	Notion de largeur de raie . . . . .	1029
3	Amplification d'une onde lumineuse dans un gaz . . . . .	1030
3.1	Équations d'évolution des populations . . . . .	1030
3.2	Sections efficaces d'émission induite et d'absorption . . . . .	1030
3.3	Évolution temporelle d'un système à deux niveaux . . . . .	1032
3.4	Coefficient d'absorption linéique et condition d'amplification . . . .	1033
3.5	Pompage optique sur un système à plusieurs niveaux . . . . .	1033
4	La cavité laser . . . . .	1035
4.1	Présentation . . . . .	1035
4.2	Modes de la cavité laser . . . . .	1036
4.3	Conditions d'oscillation d'un laser . . . . .	1036
<b>28</b>	<b>Faisceau laser</b>	<b>1039</b>
1	Introduction . . . . .	1039
2	Description du mode fondamental gaussien . . . . .	1040
2.1	Solution paraxiale de l'équation de Helmholtz à symétrie cylindrique	1040
2.2	Description du faisceau gaussien . . . . .	1041
3	Action d'une lentille mince sur un faisceau gaussien . . . . .	1045
3.1	Image d'un faisceau gaussien par une lentille . . . . .	1045
3.2	Focalisation d'un faisceau gaussien . . . . .	1046
3.3	Réduction de la divergence d'un faisceau gaussien à l'aide d'un sys- tème afocal . . . . .	1047
<b>VII</b>	<b>Mécanique quantique</b>	<b>1061</b>
<b>29</b>	<b>Introduction à la mécanique quantique</b>	<b>1063</b>
1	Ondes ou particules? . . . . .	1063

## TABLE DES MATIÈRES

1.1	Interférences avec des ondes lumineuses . . . . .	1063
1.2	Interférences avec des ondes de matière . . . . .	1066
1.3	Principe de complémentarité de Bohr . . . . .	1068
2	La fonction d'onde et l'équation de Schrödinger . . . . .	1068
2.1	Description de l'état d'une particule . . . . .	1068
2.2	Amplitude de probabilité et condition de normalisation . . . . .	1069
2.3	Interprétation probabiliste . . . . .	1069
2.4	L'équation de Schrödinger . . . . .	1070
2.5	Complément : Vecteur densité de courant de probabilité de présence .	1071
2.6	L'équation de Schrödinger indépendante du temps . . . . .	1072
3	Inégalités de Heisenberg . . . . .	1075
3.1	Inégalité de Heisenberg spatiale . . . . .	1075
3.2	Inégalité temps - énergie . . . . .	1077
4	De la limite quantique à la limite classique . . . . .	1078
4.1	Exemple de l'oscillateur harmonique . . . . .	1078
4.2	Quantique ou classique ? . . . . .	1081
4.3	Principe de correspondance de Bohr . . . . .	1082
<b>30</b>	<b>Évolution d'une particule quantique libre</b>	<b>1095</b>
1	La particule quantique libre . . . . .	1095
1.1	Définition . . . . .	1095
1.2	États stationnaires d'une particule quantique libre . . . . .	1095
1.3	Représentation d'une particule quantique par un paquet d'ondes . . . . .	1097
1.4	Vecteur densité de courant de probabilité . . . . .	1102
2	Interférences et diffraction d'ondes de matière . . . . .	1103
2.1	Diffraction par une fente . . . . .	1103
2.2	Diffraction par deux fentes . . . . .	1105
2.3	Expérience des fentes d'Young avec des atomes d'hélium . . . . .	1106
<b>31</b>	<b>Évolution d'une particule quantique dans un potentiel</b>	<b>1125</b>
1	Cas d'un puits de potentiel infiniment profond . . . . .	1126
1.1	Fonctions d'onde propres . . . . .	1126
1.2	Analogie avec les modes propres de vibration d'une corde . . . . .	1128
1.3	Niveaux d'énergie . . . . .	1130
1.4	Interprétation de l'existence d'un état d'énergie minimale . . . . .	1131
1.5	Densité de probabilité de présence . . . . .	1132
1.6	Évolution temporelle d'une superposition d'états stationnaires . . . .	1133

2	Cas d'un puits de potentiel de profondeur finie . . . . .	1134
2.1	États symétriques et antisymétriques . . . . .	1135
2.2	États liés et états de diffusion . . . . .	1136
2.3	Détermination des fonctions d'onde propres symétriques et antisymétriques des états liés . . . . .	1136
2.4	Niveaux d'énergie . . . . .	1137
2.5	Profondeur de pénétration . . . . .	1139
2.6	Interprétation à l'aide de l'inégalité temps-énergie . . . . .	1140
2.7	Comparaison avec le puits de potentiel infiniment profond . . . . .	1142
3	Barrière de potentiel et effet tunnel . . . . .	1143
3.1	Expression de la fonction d'onde propre . . . . .	1144
3.2	Probabilités de réflexion et de transmission. Effet tunnel . . . . .	1145
3.3	Représentation de la densité de probabilité de présence . . . . .	1146
3.4	Approximation d'une barrière épaisse . . . . .	1147
3.5	Applications de l'effet tunnel . . . . .	1148

**VIII Appendice 1195**

**A Outils mathématiques 1197**

1	Calcul différentiel . . . . .	1197
1.1	Dérivées partielles . . . . .	1197
1.2	Théorème de Schwarz . . . . .	1197
1.3	Différentielle . . . . .	1198
2	Analyse vectorielle . . . . .	1199
2.1	Gradient d'un champ scalaire . . . . .	1199
2.2	Divergence d'un champ de vecteurs . . . . .	1201
2.3	Rotationnel d'un champ de vecteurs . . . . .	1202
2.4	Laplacien scalaire et laplacien vectoriel . . . . .	1205
2.5	Opérateur « b scalaire gradient » . . . . .	1206
2.6	Le vecteur symbolique « nabla » . . . . .	1207
2.7	Quelques propriétés des opérateurs différentiels . . . . .	1208
2.8	Théorèmes de Stokes . . . . .	1209
2.9	Théorème d'Ostrogradski . . . . .	1210



**Première partie**

**Thermodynamique**

