

PHYSIQUE

PSI-PSI\*

TOUT-EN-UN



Sous la direction de **STÉPHANE CARDINI**

ÉLISABETH EHRHARD | ANNIE GUÉRILLOT | THIERRY GUILLOT

BRUNO MORVAN | MARIE-NOËLLE SANZ

**PHYSIQUE**

**PSI-PSI\***

**TOUT-EN-UN**

**5<sup>e</sup> édition**

*l'intégrale*

**DUNOD**

Avec la collaboration de : Anne-Emmanuelle Badel,  
François Clusset et Bernard Salamito

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, 2020

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

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

ISBN 978-2-10-080996-7

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.

# Préface

C'est un plaisir et un grand honneur pour moi que de préfacier cet ouvrage remarquable de clarté, présentant de façon simple, progressive et rigoureuse, les savoirs fondamentaux qui accompagneront les futurs ingénieurs tout au long de leur carrière professionnelle.

Dans un rapport de 2014 (« Examens de l'OCDE des politiques d'innovation : France »), l'OCDE souligne que l'enjeu de dynamiser l'innovation en France est plus que jamais important ; il note aussi parmi les forces du système français sa capacité à former « des ingénieurs de grande qualité, polyvalents et innovants pour l'industrie ». Or c'est bien par le biais d'une démarche pédagogique telle que celle de ce livre que se pérennise cette force !

Les savoirs et les technologies évoluent aujourd'hui à un rythme particulièrement soutenu, ce que j'illustrerai par le fait qu'environ 1,5 million d'articles scientifiques sont publiés chaque année dans le monde.

Ces savoirs et technologies sont de plus en plus complexes :

- un processeur compte de l'ordre de 2 milliards de transistors ;
- un calculateur haute performance, nécessaire pour la conception des avions et des voitures, pour la génomique, pour la simulation des évolutions du climat... compte plusieurs centaines de milliers de ces processeurs.

Paradoxalement, la technologie est de moins en moins « apparente », les interfaces d'utilisation se doivent en effet d'être parfaitement intuitives, ce qui d'ailleurs augmente la complexité des solutions techniques à mettre en place. Tout ceci concourt à renforcer l'importance pour l'ingénieur de maîtriser les bases de culture générale scientifiques et techniques, condition *sine qua non* du maintien dans la durée de sa pertinence technique et de sa capacité d'innovation.

Il s'agira aussi pour l'ingénieur de rester en permanence curieux et ouvert aux évolutions. Ce livre l'y prépare par les exemples donnés, à la fois simples et judicieux, et les mises en perspective, qui, dans une démarche indispensable de mon point de vue, permettent à l'étudiant de comprendre la portée des concepts mis en équations.

J'y ajouterai un conseil pour les étudiants, futurs ingénieurs, qui liront ce livre : « prévoyez dès maintenant de préparer une thèse de doctorat : d'une part le doctorat est le standard mondial pour les acteurs innovants de la technologie, et d'autre part la démarche de la recherche, en construisant de nouveaux savoirs, complète tout naturellement les savoirs consolidés que vous pourrez acquérir durant votre future formation d'ingénieur ».

Jean-Philippe BOURGOIN

Agrégé de Sciences physiques

Ancien Directeur de la stratégie et des programmes du CEA

Conseiller auprès de la Ministre de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation



# Table des matières

<b>Avant-propos</b>	<b>27</b>
<b>I Électronique</b>	<b>29</b>
<b>1 Stabilité des systèmes linéaires</b>	<b>31</b>
1 Systèmes linéaires, continus et invariants . . . . .	31
1.1 Notion générale de système . . . . .	31
1.2 Systèmes continus . . . . .	32
1.3 Systèmes linéaires . . . . .	32
1.4 Systèmes invariants . . . . .	32
2 Description d'un système électronique . . . . .	33
2.1 Représentation par équation différentielle . . . . .	33
2.2 Représentation par fonction de transfert . . . . .	33
2.3 Lien entre l'équation différentielle et la transmittance . . . . .	35
3 Stabilité . . . . .	35
3.1 Définition . . . . .	35
3.2 Système du premier ordre . . . . .	36
3.3 Système du deuxième ordre . . . . .	37
3.4 Critère de stabilité d'un système du premier ou du deuxième ordre . .	38
3.5 Lien avec la stabilité mécanique . . . . .	39
Synthèse . . . . .	39
<b>2 Amplificateur linéaire intégré</b>	<b>41</b>
1 Amplificateur linéaire intégré . . . . .	41
1.1 Visite guidée d'une <i>datasheet</i> . . . . .	41
1.2 Propriétés essentielles . . . . .	42

## TABLE DES MATIÈRES

2	Étude d'un montage à rétroaction négative : l'amplificateur non inverseur . . .	46
2.1	Présentation et schéma-bloc . . . . .	46
2.2	Fonction de transfert . . . . .	47
2.3	Stabilité du montage bouclé . . . . .	48
2.4	Diagramme de Bode et fonction amplificatrice . . . . .	48
2.5	Produit gain-bande passante . . . . .	49
2.6	Complément : temps de réponse . . . . .	51
3	Étude d'un montage à rétroaction positive : le comparateur à hystérésis . . . .	51
4	Complément : compétition de rétroaction . . . . .	52
5	Limite du gain infini (régime linéaire) . . . . .	53
5.1	Cadre de l'étude . . . . .	53
5.2	Passage à la limite pour l'amplificateur non inverseur . . . . .	54
5.3	Règle de calcul simplifiée . . . . .	54
5.4	Suiveur . . . . .	55
5.5	Impédance d'entrée . . . . .	55
5.6	Impédance de sortie . . . . .	56
5.7	Amplificateur inverseur . . . . .	57
5.8	Amplificateur non inverseur . . . . .	58
5.9	Intégrateur . . . . .	59
5.10	Complément : intégrateur sur une zone limitée en fréquence . . . . .	61
5.11	Mise en cascade . . . . .	62
	Synthèse . . . . .	65
	Exercices et problèmes . . . . .	66
	Corrigés . . . . .	72
<b>3</b>	<b>Oscillateurs quasi sinusoïdaux</b>	<b>85</b>
1	Présentation d'un oscillateur quasi sinusoïdal . . . . .	85
1.1	Définition . . . . .	85
1.2	Montage étudié . . . . .	85
2	Conditions théoriques d'auto-oscillation . . . . .	87
2.1	Conditions sur le gain et la fréquence . . . . .	87
2.2	Énergie du signal . . . . .	88
3	Condition de démarrage des oscillations . . . . .	88
3.1	Condition d'instabilité du système bouclé . . . . .	88
3.2	Complément : conditions initiales . . . . .	93
	Synthèse . . . . .	94
	Exercices et problèmes . . . . .	95
	Corrigés . . . . .	99



<b>4</b>	<b>Oscillateurs à relaxation</b>	<b>107</b>
1	Amplificateur opérationnel de gain infini en régime saturé . . . . .	107
1.1	Comparateur simple . . . . .	107
1.2	Enrichissement spectral . . . . .	108
2	Comparateurs à hystérésis . . . . .	109
2.1	Comparateur « négatif » . . . . .	109
2.2	Comparateur « positif » . . . . .	111
2.3	Reconnaître un comparateur à hystérésis . . . . .	112
3	Générateur de signaux . . . . .	112
3.1	Schéma fonctionnel . . . . .	112
3.2	Montage et observation expérimentale . . . . .	112
3.3	Description des séquences de fonctionnement . . . . .	113
3.4	Période d'oscillation . . . . .	114
3.5	Choix des composants . . . . .	114
3.6	Complément : filtrage . . . . .	115
	Synthèse . . . . .	115
	Exercices et problèmes . . . . .	116
	Corrigés . . . . .	120
<b>5</b>	<b>Électronique numérique</b>	<b>127</b>
1	Échantillonnage . . . . .	127
1.1	Définition . . . . .	127
1.2	Analyse stroboscopique . . . . .	127
1.3	Théorème de Nyquist-Shannon . . . . .	129
2	Spectre d'un signal échantillonné . . . . .	129
2.1	Calcul du spectre . . . . .	129
2.2	Repliement du spectre . . . . .	131
2.3	Cas d'un signal rectangulaire . . . . .	132
2.4	Stroboscopie . . . . .	133
3	Analyse spectrale expérimentale . . . . .	134
3.1	Choix de la fréquence d'échantillonnage . . . . .	134
3.2	Choix du nombre de points . . . . .	134
3.3	Visualisation d'un spectre à l'oscilloscope . . . . .	135
4	Traitement numérique du signal . . . . .	136
4.1	Avantages de la numérisation . . . . .	136
4.2	Filtrage numérique . . . . .	136
5	Mise en œuvre concrète . . . . .	138
5.1	Présentation générale . . . . .	138

## TABLE DES MATIÈRES

5.2	Exemple : filtre passe-bas . . . . .	139
5.3	Oscillateur à porte logique . . . . .	141
	Synthèse . . . . .	142
	Exercices et problèmes . . . . .	143
	Corrigés . . . . .	146
<b>6</b>	<b>Modulation – Démodulation</b>	<b>149</b>
1	Modulation . . . . .	149
1.1	Historique . . . . .	149
1.2	Les trois types de modulation . . . . .	150
1.3	Utilisations . . . . .	150
2	Modulation d’amplitude . . . . .	151
2.1	Expression mathématique . . . . .	151
2.2	Réalisation pratique . . . . .	151
2.3	Taux de modulation . . . . .	152
2.4	Spectre d’un signal modulé . . . . .	152
2.5	Cas d’un signal quelconque . . . . .	153
3	Démodulation . . . . .	153
3.1	Changement de fréquence . . . . .	154
3.2	Démodulation synchrone . . . . .	155
4	Analyse documentaire : les transmissions hertziennes . . . . .	157
4.1	Document 1 : la découverte des ondes électromagnétiques . . . . .	157
4.2	Document 2 : modulation en tout ou rien . . . . .	157
4.3	Document 3 : attribution des fréquences . . . . .	159
4.4	Questions . . . . .	159
	Synthèse . . . . .	161
	Exercices et problèmes . . . . .	162
	Corrigés . . . . .	167
<b>II</b>	<b>Thermodynamique</b>	<b>171</b>
<b>7</b>	<b>Écriture infinitésimale des principes de la thermodynamique</b>	<b>173</b>
1	Calcul infinitésimal . . . . .	173
1.1	Notations $d$ et $\delta$ . . . . .	173
1.2	Intégration des formes différentielles . . . . .	174
1.3	Exemples . . . . .	174
2	Écriture des principes sous forme infinitésimale . . . . .	176

2.1	Premier principe . . . . .	176
2.2	Deuxième principe . . . . .	178
	Synthèse . . . . .	179
<b>8</b>	<b>Bilans d'énergie et d'entropie en présence d'écoulement</b>	<b>181</b>
1	Systèmes fermés en écoulement . . . . .	181
1.1	Vocabulaire . . . . .	181
1.2	Définition du système . . . . .	181
2	Bilans thermodynamiques d'énergie et d'entropie . . . . .	182
2.1	Bilans d'énergie . . . . .	182
2.2	Bilans d'entropie . . . . .	186
	Synthèse . . . . .	187
	Exercices et problèmes . . . . .	188
	Corrigés . . . . .	190
<b>9</b>	<b>Diffusion de particules</b>	<b>195</b>
1	Mouvement de particules . . . . .	195
1.1	Diffusion . . . . .	195
1.2	Convection . . . . .	195
2	Vecteur densité de courant de particules $\vec{j}$ . . . . .	196
2.1	Définition . . . . .	196
2.2	Débit de particules . . . . .	196
2.3	Densité de particules $n$ . . . . .	197
3	Loi de Fick . . . . .	197
3.1	Énoncé . . . . .	197
3.2	Limites de validité de la loi de Fick . . . . .	199
4	Équations de continuité et de diffusion . . . . .	199
4.1	Géométrie cartésienne . . . . .	199
4.2	Terme source . . . . .	201
4.3	Géométrie cylindrique . . . . .	202
4.4	Géométrie sphérique . . . . .	204
4.5	Généralisation . . . . .	206
5	Remarques générales . . . . .	207
5.1	Irréversibilité . . . . .	207
5.2	Solution en ordre de grandeur . . . . .	208
5.3	Lien entre $\vec{j}_{conv}$ et $n$ . . . . .	209
5.4	Complément : nombre de Péclet . . . . .	209
6	Du microscopique au mésoscopique . . . . .	210

## TABLE DES MATIÈRES

6.1	Mouvement brownien . . . . .	210
6.2	Exemple de diffusion . . . . .	211
	Synthèse . . . . .	212
	Exercices et problèmes . . . . .	213
	Corrigés . . . . .	221
<b>10</b>	<b>Diffusion thermique</b>	<b>231</b>
1	Mise en évidence expérimentale . . . . .	231
1.1	Expérience . . . . .	231
1.2	Les trois modes de transport de l'énergie thermique . . . . .	232
2	Flux d'énergie . . . . .	232
2.1	Flux thermique . . . . .	232
2.2	Loi de Fourier . . . . .	233
3	Équilibre thermodynamique local . . . . .	234
4	Équation de la diffusion thermique . . . . .	234
4.1	Géométrie cartésienne . . . . .	234
4.2	Terme source . . . . .	236
4.3	Géométrie cylindrique . . . . .	237
4.4	Géométrie sphérique . . . . .	238
4.5	Généralisation . . . . .	239
4.6	Analyse en ordre de grandeur . . . . .	241
4.7	Irréversibilité . . . . .	241
5	Conditions aux limites . . . . .	241
5.1	Continuité du flux thermique . . . . .	242
5.2	Continuité de la température ou loi de Newton . . . . .	242
5.3	Exemple de l'interface entre deux milieux . . . . .	244
5.4	Paroi calorifugée . . . . .	244
6	Régime stationnaire (sans terme source) . . . . .	244
6.1	Flux conservatif . . . . .	245
6.2	Exemple cartésien . . . . .	246
6.3	Résistance thermique et analogie électrique . . . . .	247
6.4	Expressions de la résistance thermique . . . . .	248
6.5	Associations de résistances thermiques . . . . .	251
6.6	ARQS thermique : définition et limite de validité . . . . .	252
6.7	Circuits <i>RC</i> thermiques dans l'ARQS . . . . .	254
	Synthèse . . . . .	256
	Exercices et problèmes . . . . .	257
	Corrigés . . . . .	269

<b>III Mécanique des fluides</b>	<b>287</b>
<b>11 Statique des fluides</b>	<b>289</b>
1 Introduction . . . . .	289
1.1 Les différentes échelles importantes . . . . .	289
1.2 Notion de particule de fluide . . . . .	290
2 Forces dans un fluide au repos . . . . .	291
2.1 Notations . . . . .	291
2.2 Forces de volume . . . . .	291
2.3 Force de pression . . . . .	292
2.4 Équivalent volumique des actions de pression . . . . .	293
2.5 Résultante des forces de pression s'exerçant sur une surface fermée dans le cas d'une pression uniforme . . . . .	295
2.6 Application pratique . . . . .	295
3 Relation fondamentale de la statique des fluides . . . . .	296
3.1 Expression générale . . . . .	296
3.2 Cas de la seule pesanteur . . . . .	296
4 Évolution de la pression au sein d'un fluide incompressible dans un champ de pesanteur uniforme . . . . .	297
5 Évolution de la pression au sein d'un gaz parfait isotherme dans un champ de pesanteur uniforme . . . . .	300
6 Poussée d'Archimède . . . . .	301
6.1 Notion . . . . .	301
6.2 Théorème d'Archimède . . . . .	301
Synthèse . . . . .	303
Exercices et problèmes . . . . .	304
Corrigés . . . . .	308
<b>12 Débits et lois de conservation</b>	<b>317</b>
1 Vitesse microscopique et vitesse mésoscopique . . . . .	317
2 Descriptions lagrangienne (complément) et eulérienne . . . . .	317
2.1 Complément : description lagrangienne . . . . .	318
2.2 Description eulérienne . . . . .	318
2.3 Lien entre trajectoires et lignes de courants . . . . .	320
3 Vecteur densité de courant de masse . . . . .	321
3.1 Masse élémentaire traversant une surface $dS$ par unité de temps . . .	321
3.2 Expression du vecteur densité de courant de masse . . . . .	322
4 Débit massique . . . . .	323

## TABLE DES MATIÈRES

5	Conservation de la masse . . . . .	323
5.1	Équation locale de conservation de la masse en 1D . . . . .	323
5.2	Équation locale de conservation de la masse en 3D . . . . .	325
5.3	Équation globale de conservation de la masse . . . . .	325
6	Débit volumique . . . . .	326
7	Écoulements particuliers . . . . .	326
7.1	Écoulements stationnaires . . . . .	326
7.2	Écoulements homogènes et incompressibles . . . . .	329
	Synthèse . . . . .	332
	Exercices et problèmes . . . . .	333
	Corrigés . . . . .	334
<b>13</b>	<b>Écoulements parfaits : théorème de Bernoulli, bilans</b>	<b>337</b>
1	Modèle de l'écoulement parfait . . . . .	337
2	Lien entre énergie interne massique et enthalpie massique . . . . .	337
3	Relation de Bernoulli pour les écoulements parfaits stationnaires homogènes et incompressibles . . . . .	337
4	Applications de la relation de Bernoulli . . . . .	339
4.1	Préliminaire : loi de pression dans un écoulement uniforme stationnaire homogène et incompressible . . . . .	339
4.2	Effet Venturi . . . . .	340
4.3	Débitmètre de Venturi . . . . .	342
4.4	Tube de Pitot . . . . .	344
4.5	Écoulements quasi stationnaires, formule de Toricelli . . . . .	345
5	Bilan macroscopique d'énergie mécanique en écoulement stationnaire . . . . .	346
6	Exemple de bilan d'énergie mécanique dans un cas non stationnaire . . . . .	347
7	Bilans de quantité de mouvement . . . . .	348
7.1	Méthode . . . . .	348
7.2	Exemple : la fusée . . . . .	349
8	Bilans de moment cinétique . . . . .	351
8.1	Méthode . . . . .	351
8.2	Exemple . . . . .	352
	Synthèse . . . . .	355
	Exercices et problèmes . . . . .	356
	Corrigés . . . . .	364
<b>14</b>	<b>Actions de contact sur un fluide en écoulement</b>	<b>379</b>
1	Forces de surface normales et tangentielles . . . . .	379

2	Force normale de pression . . . . .	380
3	Force tangentielle de viscosité . . . . .	380
3.1	Notion de viscosité . . . . .	380
3.2	Force de viscosité dans un écoulement de Couette plan d'un fluide newtonien . . . . .	381
3.3	Ordres de grandeur de la viscosité dynamique . . . . .	382
4	Profils de vitesses de certains écoulements parallèles . . . . .	383
4.1	Conditions aux limites . . . . .	383
4.2	Écoulement de Couette plan . . . . .	385
4.3	Écoulement de Poiseuille plan . . . . .	386
	Synthèse . . . . .	388
	Exercices et problèmes . . . . .	389
	Corrigés . . . . .	392
<b>15</b>	<b>Écoulements homogènes et incompressibles dans une conduite cylindrique</b>	<b>397</b>
1	Vitesse débitante . . . . .	397
2	Écoulements laminaires et turbulents . . . . .	399
2.1	Approche descriptive . . . . .	399
2.2	Les deux modes de transport de la quantité de mouvement . . . . .	400
3	Nombre de Reynolds . . . . .	403
3.1	Définition à partir des flux surfaciques . . . . .	404
3.2	Définition à partir des temps caractéristiques . . . . .	404
3.3	Définition à partir d'une analyse dimensionnelle . . . . .	404
3.4	Transition entre régimes laminaire et turbulent dans une conduite . . . . .	405
3.5	Écoulements similaires . . . . .	406
3.6	Transition entre régime laminaire et régime turbulent dans un cas plus général . . . . .	406
4	Chute de pression dans une conduite horizontale à faible nombre de Reynolds . . . . .	407
4.1	Profil des vitesses dans un écoulement de Poiseuille cylindrique . . . . .	407
4.2	Loi de Hagen-Poiseuille . . . . .	409
5	Chute de pression dans une conduite horizontale à grand nombre de Reynolds : pertes de charge . . . . .	412
5.1	Profil de vitesses . . . . .	412
5.2	Définitions . . . . .	413
5.3	Perte de charge régulière dans une conduite . . . . .	414
5.4	Perte de charge singulière . . . . .	417
	Synthèse . . . . .	420
	Exercices et problèmes . . . . .	421

## TABLE DES MATIÈRES

Corrigés . . . . .	427
<b>16 Écoulement externe homogène et incompressible autour d'un obstacle</b>	<b>437</b>
1 Couche limite en écoulement externe . . . . .	437
1.1 Notion . . . . .	437
1.2 Épaisseur caractéristique de la couche limite . . . . .	438
1.3 Couche limite collée ou décollée . . . . .	438
2 Écoulements autour d'un cylindre en fonction du nombre de Reynolds . . . . .	439
3 Force de traînée subie par une sphère . . . . .	441
3.1 Définition . . . . .	441
3.2 Évolution de la force de traînée avec le nombre de Reynolds . . . . .	442
4 Force de traînée subie par des objets de formes diverses . . . . .	447
5 Traînée et portance d'une aile d'avion à haut nombre de Reynolds . . . . .	448
5.1 Caractéristiques d'une aile d'avion . . . . .	448
5.2 Définition de la traînée et de la portance d'une aile d'avion . . . . .	450
5.3 Complément : polaire d'une aile . . . . .	452
5.4 Complément : notion de décrochage . . . . .	454
5.5 Complément : notion de traînée induite . . . . .	454
5.6 Complément : hélices tractrices et éoliennes . . . . .	455
Synthèse . . . . .	456
Exercices et problèmes . . . . .	457
Corrigés . . . . .	464
<b>IV Électromagnétisme</b>	<b>473</b>
<b>17 Électromagnétisme en régime statique : le champ électrique</b>	<b>475</b>
1 Charges électriques . . . . .	475
1.1 Existence des charges électriques . . . . .	475
1.2 Charge électrique au niveau microscopique . . . . .	475
1.3 Charge électrique à l'échelle mésoscopique . . . . .	476
1.4 Distribution volumique de charge électrique . . . . .	477
1.5 Distributions surfacique, linéique et ponctuelle de charges . . . . .	478
1.6 Propriétés de la charge totale d'un système fermé . . . . .	480
2 Force électrique, définition du champ électrique . . . . .	480
2.1 Expérience historique de Coulomb et force de Coulomb . . . . .	480
2.2 Définition du champ électrostatique . . . . .	482
2.3 Champ électrique créé par une charge ponctuelle . . . . .	482



3	Théorème de Gauss . . . . .	484
3.1	Énoncé . . . . .	484
3.2	Théorème de Gauss et calcul du champ électrique . . . . .	484
3.3	Théorème de Gauss pour le champ de gravitation . . . . .	484
4	Équations locales de l'électrostatique . . . . .	486
4.1	Du théorème de Gauss à l'équation locale de Maxwell-Gauss . . . . .	486
4.2	Équation de Maxwell-Faraday en électrostatique, existence du potentiel électrostatique . . . . .	487
4.3	Énergie potentielle électrique d'une charge . . . . .	489
4.4	Équations de Poisson et de Laplace . . . . .	490
4.5	Linéarité des équations locales de l'électrostatique et conséquence . . . . .	491
5	Symétries du champ électrique . . . . .	491
5.1	Principe de Curie, plan de symétrie ou d'antisymétrie . . . . .	491
5.2	Observation des lignes de champ du champ électrique généré par une distribution de charges présentant un plan de symétrie . . . . .	494
5.3	Observation des lignes de champ du champ électrique généré par une distribution présentant un plan d'antisymétrie . . . . .	495
5.4	Propriétés de symétrie pour le champ électrique . . . . .	495
5.5	Symétrie élevée d'une distribution de charges . . . . .	496
6	Invariances de la distribution de charges par des transformations géométriques . . . . .	497
6.1	Invariance par translation selon un axe . . . . .	497
6.2	Invariance par rotation autour d'un axe . . . . .	497
7	Propriétés topographiques du champ électrique et du potentiel . . . . .	498
7.1	Le champ électrique est dirigé vers les potentiels décroissants . . . . .	498
7.2	<i>Extrema</i> relatifs du potentiel et charges électriques . . . . .	498
7.3	Intersection des lignes de champ électrique . . . . .	499
7.4	Le champ électrique est perpendiculaire aux surfaces équipotentielles . . . . .	499
7.5	Conservation du flux électrique en un lieu vide de charge . . . . .	500
7.6	Valeur du champ et surfaces équipotentielles successives . . . . .	500
7.7	Exemples d'interprétation de cartes de lignes de champs . . . . .	501
8	Calculs de champs électriques ou de gravitation créés par des distributions de symétrie élevée . . . . .	503
8.1	Choix d'une surface de Gauss . . . . .	503
8.2	Méthode . . . . .	503
8.3	Champ électrostatique et potentiel créés par un fil chargé . . . . .	503
8.4	Champ de gravitation d'une boule homogène . . . . .	505
8.5	Champ électrostatique et potentiel créés par un plan chargé . . . . .	506
9	Calculs de champs électriques par application du principe de superposition . . . . .	509

## TABLE DES MATIÈRES

9.1	Distributions concernées . . . . .	509
9.2	Étude du champ électrique dans une cavité d'une distribution volumique de charges . . . . .	509
	Synthèse . . . . .	510
	Exercices et problèmes . . . . .	511
	Corrigés . . . . .	517
<b>18</b>	<b>Courant électrique – Conducteur métallique</b>	<b>531</b>
1	Courant électrique . . . . .	531
1.1	Cas où les porteurs de charge sont tous identiques . . . . .	531
1.2	Cas où plusieurs types de porteurs de charges contribuent au courant total . . . . .	533
1.3	Vecteur densité de courant électrique et changement de référentiel . . . . .	533
2	Équation de conservation de la charge . . . . .	534
2.1	Équation de conservation de la charge dans le cas d'un problème à une dimension selon un axe . . . . .	535
2.2	Équation de conservation de la charge dans le cas général . . . . .	535
2.3	Équation locale de conservation de la charge en régime stationnaire . . . . .	536
2.4	Conclusion . . . . .	536
3	Courant dans un métal : modèle de Drüde . . . . .	536
3.1	Description microscopique du métal . . . . .	537
3.2	Conduction dans un métal soumis à un champ électrique permanent : modèle de Drüde . . . . .	538
3.3	Conductivité d'un métal, loi d'Ohm locale, ordres de grandeur . . . . .	539
3.4	Loi d'Ohm intégrale . . . . .	540
3.5	Puissance cédée aux porteurs . . . . .	541
3.6	Limite de validité du modèle de Drüde . . . . .	542
3.7	Approche documentaire : la conductivité des semi-conducteurs . . . . .	542
	Synthèse . . . . .	548
	Exercices et problèmes . . . . .	549
	Corrigés . . . . .	550
<b>19</b>	<b>Condensateurs</b>	<b>553</b>
1	Propriétés d'un conducteur en équilibre statique . . . . .	553
2	Phénomène d'influence électrique . . . . .	554
3	Calcul du champ électrique créé dans un condensateur . . . . .	554
4	Capacité du condensateur plan, énergie contenue . . . . .	556
4.1	Condensateur sans diélectrique . . . . .	556
4.2	Condensateur avec diélectrique . . . . .	557

Synthèse . . . . .	557
Exercices et problèmes . . . . .	558
Corrigés . . . . .	561
<b>20 Électromagnétisme en régime statique : le champ magnétique</b>	<b>565</b>
1 Définition du champ magnétique . . . . .	565
1.1 Force magnétique . . . . .	566
1.2 Puissance de la force magnétique . . . . .	566
1.3 Unité du champ magnétique et ordres de grandeur . . . . .	566
2 Distribution de courants . . . . .	567
3 Le champ magnétique est un champ à flux conservatif . . . . .	568
3.1 Équation de Maxwell-Thomson . . . . .	568
3.2 Propriété topographique du champ magnétostatique . . . . .	568
4 Théorème d'Ampère . . . . .	569
4.1 Équation de Maxwell-Ampère . . . . .	569
4.2 Énoncé du théorème d'Ampère . . . . .	569
4.3 Démonstration du théorème d'Ampère . . . . .	569
4.4 Calcul du courant enlacé en présence d'une distribution linéique . . . . .	570
5 Équations de Maxwell de la magnétostatique . . . . .	571
5.1 Linéarité des équations . . . . .	571
5.2 Caractère local des équations . . . . .	571
5.3 Existence, continuité et dérivabilité du champ magnétique. Cas du champ magnétique au niveau d'une distribution linéique . . . . .	571
6 Propriétés de symétrie du champ magnétostatique . . . . .	572
6.1 Symétrie et antisymétrie de la distribution de courants . . . . .	572
6.2 Observation des symétries de $\vec{B}$ sur un cas particulier . . . . .	572
6.3 Propriétés de symétrie pour le champ magnétostatique . . . . .	573
6.4 Symétrie élevée d'une distribution de courants . . . . .	574
7 Calculs de champs magnétostatiques à l'aide du théorème d'Ampère . . . . .	574
7.1 Choix du contour d'Ampère . . . . .	574
7.2 Méthode de calcul du champ $\vec{B}$ créé par une distribution de courant présentant de fortes symétries . . . . .	575
7.3 Champ magnétostatique créé par un fil infini parcouru par un courant permanent, application au champ au voisinage d'un fil . . . . .	575
7.4 Champ magnétostatique créé par un fil épais infini . . . . .	577
7.5 Champ magnétique créé par un solénoïde infini . . . . .	578
7.6 Champ magnétique créé par une bobine torique . . . . .	583
8 Force de Laplace exercée sur des conducteurs parcourus par des courants . . . . .	585

## TABLE DES MATIÈRES

8.1	Force de Laplace exercée sur une distribution volumique de courant . . . . .	585
8.2	Force de Laplace exercée sur un conducteur filiforme . . . . .	586
	Synthèse . . . . .	587
	Exercices et problèmes . . . . .	588
	Corrigés . . . . .	593
<b>21</b>	<b>Équations de Maxwell</b>	<b>601</b>
1	Les équations de Maxwell en régime variable . . . . .	601
1.1	Insuffisances des équations du régime permanent . . . . .	601
1.2	Équation de Maxwell-Gauss . . . . .	602
1.3	Équation de Maxwell-Thomson . . . . .	603
1.4	Équation de Maxwell-Faraday . . . . .	603
1.5	Équation de Maxwell-Ampère . . . . .	604
1.6	Synthèse . . . . .	605
1.7	Lien avec la conservation de la charge . . . . .	606
2	Propriétés de symétrie . . . . .	606
2.1	Application du principe de Curie . . . . .	606
2.2	Exemple . . . . .	607
3	Énergie cédée aux porteurs de charge . . . . .	608
3.1	Densité de force électromagnétique . . . . .	608
3.2	Puissance électromagnétique cédée au milieu . . . . .	608
	Synthèse . . . . .	609
	Exercices et problèmes . . . . .	610
	Corrigés . . . . .	613
<b>22</b>	<b>Approximation des régimes quasi stationnaires</b>	<b>619</b>
1	Échelles spatiale et temporelle . . . . .	619
1.1	Définition des notations . . . . .	619
1.2	Expression des ordres de grandeur . . . . .	620
2	Hypothèses de l'ARQS magnétique . . . . .	621
2.1	Définition . . . . .	621
2.2	Propriétés de l'ARQS magnétique . . . . .	623
3	Induction électromagnétique dans un conducteur massif . . . . .	623
3.1	Induction électromagnétique . . . . .	623
3.2	Description du dispositif . . . . .	624
3.3	Principe de la mise en équation . . . . .	625
3.4	Calcul du champ électrique et du courant induits . . . . .	625
3.5	Bilan d'énergie et applications . . . . .	626

3.6	Complément : champ magnétique créé par les courants induits . . . .	627
3.7	Généralisation . . . . .	628
4	Induction électromagnétique dans un circuit électrique filiforme . . . . .	629
5	Énergie magnétique . . . . .	630
5.1	Inductance propre et mutuelle inductance . . . . .	630
5.2	Densité volumique d'énergie magnétique . . . . .	630
5.3	Couplage parfait, couplage partiel . . . . .	631
	Synthèse . . . . .	632
	Exercices et problèmes . . . . .	633
	Corrigés . . . . .	637

## **V Conversion de puissance 643**

### **23 Puissance électrique en régime sinusoïdal 645**

1	Définitions générales . . . . .	645
1.1	Les différents régimes de fonctionnement . . . . .	645
1.2	Valeur instantanée, valeur moyenne, valeur efficace . . . . .	646
2	Puissance reçue par un dipôle . . . . .	647
2.1	Puissance instantanée . . . . .	647
2.2	Puissance moyenne en régime périodique . . . . .	647
2.3	Dipôles qui ne consomment pas de puissance en régime périodique . . . . .	647
2.4	Dipôles qui consomment de la puissance en régime périodique . . . . .	648
3	Puissance en régime sinusoïdal . . . . .	649
3.1	Impédance complexe . . . . .	649
3.2	Puissance moyenne reçue par un dipôle en régime sinusoïdal . . . . .	650
3.3	Diagramme de Fresnel et puissance moyenne reçue par un dipôle . . . . .	651
3.4	Étude du facteur de puissance d'une installation électrique . . . . .	652
3.5	Puissance et décomposition en série de Fourier . . . . .	654
	Synthèse . . . . .	654
	Exercices et problèmes . . . . .	655
	Corrigés . . . . .	658

### **24 Milieux ferromagnétiques et transformateur 665**

1	Moment magnétique d'un aimant permanent . . . . .	665
1.1	Champ créé par aimant . . . . .	665
1.2	Modèle de champ . . . . .	666
1.3	Actions subies par un dipôle magnétique . . . . .	667

## TABLE DES MATIÈRES

2	Équations de Maxwell dans un milieu magnétique, dans l'ARQS . . . . .	668
2.1	Aimantation . . . . .	668
2.2	Vecteur excitation magnétique et équation de Maxwell-Ampère . . .	669
2.3	Formes intégrées des équations de Maxwell . . . . .	670
3	Milieu ferromagnétique . . . . .	671
3.1	Qu'est-ce qu'un matériau ferromagnétique ? . . . . .	671
3.2	Cycles d'hystérésis . . . . .	672
3.3	Milieu doux, milieu dur . . . . .	673
3.4	Complément : comprendre le ferromagnétisme . . . . .	675
4	Circuit magnétique . . . . .	676
4.1	Tore ferromagnétique . . . . .	676
4.2	Canalisation des lignes de champ . . . . .	679
4.3	Électroaimant . . . . .	680
4.4	Pertes . . . . .	682
5	Transformateur . . . . .	684
5.1	Constitution . . . . .	684
5.2	Loi de transformation des tensions (en alternatif) . . . . .	684
5.3	Loi de transformation des courants (en charge) . . . . .	685
5.4	Loi de transformation des puissances . . . . .	686
5.5	Transformateur idéal . . . . .	686
5.6	Normalisation et orientation des courants . . . . .	687
5.7	Pertes . . . . .	688
5.8	Énergie stockée dans un transformateur . . . . .	689
5.9	Transfert d'impédance . . . . .	689
5.10	Relevé expérimental d'un cycle d'hystérésis . . . . .	690
5.11	Utilisations . . . . .	691
	Synthèse . . . . .	691
	Exercices et problèmes . . . . .	693
	Corrigés . . . . .	700
<b>25</b>	<b>Introduction à la conversion électro-magnéto-mécanique</b>	<b>709</b>
1	Description d'un contacteur électromagnétique . . . . .	709
2	Force électromagnétique . . . . .	710
3	Application au contacteur . . . . .	710
3.1	Carte de champ . . . . .	710
3.2	Établissement de l'inductance . . . . .	710
3.3	Établissement de la force . . . . .	712
4	Complément : établissement de la formule de la force . . . . .	712

Synthèse . . . . .	714
Exercices et problèmes . . . . .	715
Corrigés . . . . .	722
<b>26 Machine synchrone</b>	<b>731</b>
1 Architecture . . . . .	731
1.1 Le stator . . . . .	732
1.2 Le rotor . . . . .	733
1.3 Cadre de l'étude . . . . .	734
2 Champs glissants . . . . .	734
2.1 Le champ créé par la phase statorique $\mathcal{E}_1$ . . . . .	734
2.2 Effet d'une multiplication des encoches . . . . .	735
2.3 Effet d'une rotation des courants . . . . .	737
2.4 Le champ statorique . . . . .	738
2.5 Le champ rotorique . . . . .	739
3 Couple électromagnétique . . . . .	740
3.1 Le principe physique de création d'un couple . . . . .	740
3.2 L'énergie électromagnétique . . . . .	740
3.3 Le couple électromagnétique . . . . .	741
3.4 Signification de l'angle $\alpha$ et stabilité de la machine . . . . .	742
3.5 Le démarrage du moteur synchrone . . . . .	744
4 Schéma électrique équivalent . . . . .	745
4.1 Complément : circuit rotorique . . . . .	745
4.2 Circuits statoriques . . . . .	745
4.3 Complément : mesure expérimentale des éléments du schéma électrique	748
4.4 Complément : calcul des coefficients d'inductance et de mutuelle . . . . .	748
4.5 Diagramme de Fresnel . . . . .	749
4.6 Bilan de puissance . . . . .	753
5 Utilisations . . . . .	756
Synthèse . . . . .	758
Exercices et problèmes . . . . .	759
Corrigés . . . . .	769
<b>27 Machine à courant continu</b>	<b>781</b>
1 Organisation de la machine à courant continu . . . . .	781
2 Étude du circuit statorique . . . . .	782
3 Étude du circuit rotorique . . . . .	783
3.1 Organisation générale . . . . .	783

## TABLE DES MATIÈRES

3.2	Principe de fonctionnement du collecteur . . . . .	783
4	Couple électromagnétique . . . . .	786
4.1	Analogies entre la MS et la MCC . . . . .	786
4.2	Couple électromagnétique . . . . .	787
5	Force contre-électromotrice . . . . .	788
5.1	Conversion de puissance . . . . .	788
5.2	Complément : bilan d'énergie . . . . .	788
6	Schéma électrique de la machine . . . . .	790
6.1	Fonctionnement moteur . . . . .	790
6.2	Fonctionnement générateur . . . . .	790
6.3	Synthèse . . . . .	791
7	Complément : rendement de la machine à courant continu . . . . .	791
7.1	Effets dissipatifs dans une machine réelle . . . . .	791
7.2	Bilan de puissance dans la machine à courant continu . . . . .	792
8	Moteur à courant continu en régime transitoire . . . . .	795
8.1	Démarrage du moteur . . . . .	795
8.2	Moteur en régime transitoire . . . . .	796
	Synthèse . . . . .	798
	Exercices et problèmes . . . . .	799
	Corrigés . . . . .	804
<b>28</b>	<b>Conversion électronique de puissance</b>	<b>811</b>
1	Les différentes présentations de l'énergie électrique . . . . .	811
1.1	Présentation alternative de l'énergie . . . . .	811
1.2	Présentation continue de l'énergie . . . . .	812
1.3	Ordres de grandeur . . . . .	812
2	Généralités sur les convertisseurs électroniques statiques de puissance . . . . .	813
2.1	Structure générale d'un convertisseur . . . . .	813
2.2	Les diverses conversions nécessaires . . . . .	814
2.3	Exemple introductif : recherche d'un convertisseur continu/continu convenable . . . . .	814
2.4	Cahier des charges et structure d'un convertisseur . . . . .	816
3	Dipôles type source de tension ou de courant . . . . .	817
3.1	Dipôles type source de tension . . . . .	817
3.2	Dipôles type source de courant . . . . .	819
3.3	Réversibilité des sources . . . . .	821
3.4	Conclusion et retour sur la structure d'un convertisseur . . . . .	821



4	Règles d'association des sources et structure du convertisseur à deux interrupteurs . . . . .	821
4.1	Règles de connexions des sources . . . . .	822
4.2	Structure d'un convertisseur direct . . . . .	822
5	Les interrupteurs électroniques . . . . .	823
5.1	Interrupteur idéal . . . . .	823
5.2	Diode idéale ou interrupteur à commutation spontanée . . . . .	824
5.3	Transistor idéal ou interrupteur idéal commandé à l'amorçage et au blocage . . . . .	825
5.4	Interrupteur réversible en courant, ou interrupteur bidirectionnel . . . . .	826
6	Hacheur série ou hacheur dévolteur . . . . .	826
6.1	Étude préliminaire : $E$ et $I$ sont des constantes . . . . .	827
6.2	Application : commande d'un moteur à courant continu . . . . .	830
7	Redresseur . . . . .	835
7.1	Cahier des charges et architecture . . . . .	835
7.2	Nature des interrupteurs . . . . .	836
7.3	Formes d'ondes dans le cas d'un redressement d'une tension sinusoïdale avec une charge $r - L$ . . . . .	837
8	Onduleur . . . . .	838
8.1	Cahier des charges et choix d'une architecture . . . . .	838
8.2	Étude du courant et détermination de la nature des interrupteurs . . . . .	839
	Synthèse . . . . .	840
	Exercices et problèmes . . . . .	842
	Corrigés . . . . .	850

**VI Physique des ondes 865**

**29 Équation de d'Alembert unidimensionnelle 867**

1	La corde vibrante . . . . .	867
1.1	Cadre de l'étude . . . . .	867
1.2	Équation de propagation sur la position . . . . .	868
2	Solutions progressives de l'équation de d'Alembert . . . . .	870
2.1	Ondes progressives . . . . .	870
2.2	Ondes progressives harmoniques . . . . .	870
2.3	Équation de dispersion . . . . .	872
2.4	Vitesse de phase . . . . .	872
2.5	Génération d'une onde progressive . . . . .	873
2.6	Superposition d'ondes progressives harmoniques . . . . .	873

## TABLE DES MATIÈRES

3	Solutions stationnaires de l'équation de d'Alembert . . . . .	874
3.1	Corde attachée à une extrémité . . . . .	874
3.2	Corde attachée aux deux extrémités . . . . .	877
3.3	Analyse des solutions stationnaires . . . . .	879
3.4	Méthode des variables séparées . . . . .	880
3.5	Conditions aux limites . . . . .	881
3.6	Régime harmonique forcé . . . . .	882
4	Équivalence ondes progressives harmoniques – ondes stationnaires harmoniques . . . . .	883
	Synthèse . . . . .	884
	Exercices et problèmes . . . . .	885
	Corrigés . . . . .	892
<b>30</b>	<b>Ondes dans un câble coaxial sans perte</b>	<b>901</b>
1	Présentation . . . . .	901
2	Mise en équation . . . . .	901
3	Impédance caractéristique . . . . .	903
4	Réflexion en amplitude sur une impédance terminale . . . . .	904
4.1	Court-circuit . . . . .	905
4.2	Circuit ouvert . . . . .	907
4.3	Résistance terminale . . . . .	908
	Synthèse . . . . .	909
	Exercices et problèmes . . . . .	910
	Corrigés . . . . .	915
<b>31</b>	<b>Ondes sonores dans les fluides</b>	<b>927</b>
1	Le son . . . . .	927
2	Approximation acoustique . . . . .	928
2.1	Présentation . . . . .	928
2.2	Principe fondamental de la dynamique . . . . .	928
2.3	Conservation de la masse . . . . .	930
2.4	Évolution isentropique . . . . .	930
3	Équation de propagation . . . . .	931
3.1	Cas unidimensionnel . . . . .	931
3.2	Complément : cas tridimensionnel . . . . .	932
3.3	Célérité . . . . .	933
4	Étude énergétique . . . . .	934
4.1	Vecteur densité de courant énergétique . . . . .	934

4.2	Densité volumique d'énergie sonore . . . . .	935
4.3	Complément : démonstration de l'équation de continuité . . . . .	935
4.4	Intensité acoustique . . . . .	935
5	Ondes planes progressives harmoniques (OPPH) . . . . .	937
5.1	Notation des OPPH . . . . .	937
5.2	Équation de dispersion et vitesse de phase . . . . .	938
5.3	Caractère longitudinal de l'OPPH sonore . . . . .	938
5.4	Impédance acoustique pour des ondes planes progressives . . . . .	939
5.5	Justification de l'évolution isentropique . . . . .	940
5.6	Démonstration de $ v_1  \ll c$ et $a \ll \lambda$ . . . . .	941
5.7	Validation numérique de l'approximation acoustique . . . . .	941
5.8	Vocabulaire musical . . . . .	942
6	Ondes sphériques progressives harmoniques . . . . .	942
6.1	Présentation . . . . .	942
6.2	Ondes sphériques progressives . . . . .	943
6.3	Ondes sphériques progressives harmoniques . . . . .	943
6.4	Ondes sphériques et ondes planes . . . . .	944
7	Réflexion et transmission sur une interface plane . . . . .	945
7.1	Position du problème . . . . .	945
7.2	Modélisation et conditions aux limites . . . . .	945
7.3	Justification des conditions aux limites en 0 . . . . .	946
7.4	Coefficients de réflexion et de transmission en amplitude . . . . .	946
7.5	Coefficients de réflexion et de transmission en puissance . . . . .	947
7.6	Approche documentaire : l'échographie médicale . . . . .	949
8	Mesure de vitesse par effet Doppler . . . . .	950
8.1	Effet Doppler . . . . .	950
8.2	Détection hétérodyne . . . . .	952
	Synthèse . . . . .	955
	Exercices et problèmes . . . . .	956
	Corrigés . . . . .	965
<b>32</b>	<b>Ondes électromagnétiques dans le vide</b>	<b>979</b>
1	Densité d'énergie électromagnétique et énergie transportée . . . . .	979
1.1	Bilan de Poynting de l'énergie électromagnétique . . . . .	979
1.2	Vecteur de Poynting, densité volumique d'énergie électromagnétique	981
2	Domaines de fréquence des ondes électromagnétiques . . . . .	982
2.1	Radiofréquences . . . . .	983
2.2	Fréquences optiques . . . . .	984

TABLE DES MATIÈRES

2.3	Rayonnements ionisants : X et $\gamma$ . . . . .	984
3	Équations de propagation des ondes électromagnétiques dans le vide . . . . .	984
3.1	Équations de Maxwell dans le vide . . . . .	984
3.2	Équation de propagation vérifiée par $\vec{E}$ ou $\vec{B}$ . . . . .	985
4	Onde électromagnétique progressive harmonique dans le vide . . . . .	986
4.1	Les vecteurs attachés à une onde électromagnétique progressive . . . . .	986
4.2	Onde sphérique et onde plane . . . . .	986
5	Structure des ondes électromagnétiques planes progressives et harmoniques dans le vide . . . . .	987
5.1	Transversalité des ondes électromagnétiques planes . . . . .	988
5.2	Représentations réelle et complexe du champ électrique d'une onde électromagnétique plane progressive et harmonique . . . . .	988
5.3	Champ électrique d'une OEPPH polarisée rectilignement . . . . .	989
5.4	Couplage entre les champs $\vec{E}$ et $\vec{B}$ d'une OEPPH . . . . .	990
5.5	Retour sur la transversalité des ondes . . . . .	991
5.6	Équation de dispersion . . . . .	991
5.7	Conclusion : structure d'une OEPPH . . . . .	992
5.8	Énergie transportée par une OEPPH . . . . .	992
6	Réflexion d'une OEPPH sur un plan conducteur parfait en incidence normale . . . . .	996
6.1	Plan conducteur parfait . . . . .	996
6.2	Conditions de passage pour le champ électromagnétique . . . . .	997
6.3	Existence et calcul du champ électrique de l'onde réfléchie . . . . .	1000
6.4	Coefficients de réflexion . . . . .	1001
6.5	Expressions des champs totaux . . . . .	1001
6.6	Description du champ total : onde stationnaire . . . . .	1002
6.7	Mise en évidence d'un courant surfacique sur le plan conducteur . . . . .	1003
7	Approche documentaire : le laser . . . . .	1004
7.1	But de l'approche documentaire . . . . .	1004
7.2	Document : extraits de C.SCHWOB, « Le laser : principe de fonctionnement », <i>Reflète de la Physique</i> n° 21, octobre 2010 . . . . .	1004
7.3	Les mots clefs . . . . .	1009
	Synthèse . . . . .	1009
	Exercices et problèmes . . . . .	1011
	Corrigés . . . . .	1016

**33 Onde thermique. Dispersion absorption 1027**

1	Exemple introductif : onde thermique en géométrie unidirectionnelle . . . . .	1027
1.1	Équation de la diffusion thermique . . . . .	1028

1.2	Évolution de la température dans le sol . . . . .	1028
1.3	Conclusion : interprétation physique . . . . .	1031
2	Dispersion et absorption dans les milieux régis par une équation de propagation linéaire . . . . .	1032
2.1	Équation de propagation linéaire . . . . .	1032
2.2	Forme générique des solutions . . . . .	1032
2.3	Équation de dispersion . . . . .	1033
2.4	Interprétation des parties réelle et imaginaire de $k$ . . . . .	1033
3	Propagation d'un paquet d'onde dans un milieu dispersif non absorbant . . .	1034
3.1	Onde parfaitement monochromatique . . . . .	1035
3.2	Paquet d'onde . . . . .	1035
	Synthèse . . . . .	1040
	Exercices et problèmes . . . . .	1041
	Corrigés . . . . .	1049
<b>34</b>	<b>Ondes électromagnétiques planes dans les milieux conducteurs</b>	<b>1061</b>
1	Propagation d'une onde plane harmonique dans un conducteur ohmique . . .	1061
1.1	Retour sur le modèle de Drüde . . . . .	1061
1.2	Équation de propagation d'une onde plane harmonique dans un conducteur, en basse fréquence . . . . .	1063
1.3	Métal parfait . . . . .	1067
2	Onde électromagnétique dans un plasma . . . . .	1068
2.1	Qu'est-ce qu'un plasma ? . . . . .	1068
2.2	Ions et électrons du plasma . . . . .	1068
2.3	Conductivité du plasma . . . . .	1069
2.4	Équation de propagation et équation de dispersion dans le plasma . .	1070
2.5	Description des ondes dans le plasma . . . . .	1071
	Synthèse . . . . .	1075
	Exercices et problèmes . . . . .	1076
	Corrigés . . . . .	1084
<b>VII</b>	<b>Annexe mathématique</b>	<b>1095</b>
<b>35</b>	<b>Outils mathématiques</b>	<b>1097</b>
1	Calcul différentiel . . . . .	1097
1.1	Différentielle d'une fonction d'une seule variable . . . . .	1097
1.2	Différentielle d'une fonction de plusieurs variables . . . . .	1098
1.3	Formes différentielles . . . . .	1100

## TABLE DES MATIÈRES

1.4	Intégration des différentielles et des formes différentielles . . . . .	1101
1.5	Intégration de l'expression d'une dérivée partielle . . . . .	1101
2	Notions de quantité infinitésimale et d'infiniment petit . . . . .	1103
2.1	Historique . . . . .	1103
2.2	Interprétation physique de $d$ et $\delta$ . . . . .	1103
2.3	Infiniment petits d'ordre supérieur . . . . .	1103
3	Analyse vectorielle . . . . .	1104
3.1	Champ scalaire, champ vectoriel . . . . .	1104
3.2	Circulation et flux d'un champ vectoriel . . . . .	1105
3.3	Gradient d'un champ scalaire . . . . .	1106
3.4	Divergence d'un champ vectoriel . . . . .	1108
3.5	Rotationnel d'un champ vectoriel . . . . .	1109
3.6	Application des opérateurs à des produits de champs . . . . .	1112
3.7	Opérateur Nabla . . . . .	1112
3.8	Combinaisons d'opérateurs . . . . .	1113
3.9	Équations aux dérivées partielles . . . . .	1116
3.10	Analyse de Fourier . . . . .	1117
4	Équations trigonométriques de la physique des ondes . . . . .	1119
5	Transformation géométrique du graphe d'une fonction . . . . .	1119
	Synthèse . . . . .	1121
<b>VIII Résolutions de problèmes</b>		<b>1123</b>
<b>36 Résolutions de problèmes</b>		<b>1125</b>
	Données numériques . . . . .	1126
	Énoncés . . . . .	1130
	Indications . . . . .	1144
	Corrigés . . . . .	1146
<b>Index</b>		<b>1184</b>

# 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 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, ainsi que de nombreux exercices de niveaux variés, en fin de chapitres, 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 cinq auteurs a permis de confronter les différentes pratiques et de sélectionner les exercices et problèmes les plus formateurs, adaptés tant aux étudiants de PSI que de PSI\*. Le niveau de difficulté est signalé, des plus simples (★) aux plus ardues (★★★). Le lecteur pourra se contenter dans un premier temps de chercher les exercices de la rubrique « s'entraîner » ; il n'aura peut-être pas le temps de traiter ceux de la rubrique « approfondir », ce qui n'est absolument pas rédhibitoire pour brillamment intégrer. Les auteurs ont en effet proposé un grand nombre d'exercices afin que les étudiants les plus rapides, ou les redoublants, puissent trouver à s'exercer efficacement.

L'ouvrage souhaite rester au plus près des questions actuelles des concours. Le lecteur trouvera ainsi en dernière partie des Résolutions de problèmes, afin de travailler ce type de question non guidée. Un large choix en est proposé.

Les auteurs ont souhaité que cet ouvrage serve aussi de référence dans la suite des études du lecteur, en précisant certains points qui ne sont pas exigibles aux concours, clairement indiqués par le terme « complément » dans le titre. Ces paragraphes, peu nombreux, forment un tout cohérent dans chaque chapitre. Le lecteur ingénieur ou étudiant (en école d'ingénieur, en ENS, en école d'officier...) pourra ainsi approfondir sa réflexion, lorsqu'il lui faudra revenir aux bases de sa discipline pour innover.

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 !

Stéphane CARDINI

Ancien élève de l'ENS (Cachan)

Agrégé de Sciences physiques

Professeur de Chaire supérieure

