

# TABLE DES MATIÈRES

<b>Chapitre 1 - Le magnétisme, des origines à nos jours</b> .....	13
1. La découverte des pierres d'aimant et l'observation du phénomène de magnétisme au cours des âges .....	13
1.1. Les objets en fer et en pierre d'aimant dans la haute antiquité .....	13
1.2. Les premiers écrits traitant de la pierre d'aimant - Origine du nom «magnétisme» .....	14
1.3. Premières observations des phénomènes magnétiques.....	15
1.3.1. L'attraction magnétique .....	15
1.3.2. Le phénomène d'écrantage magnétique.....	15
1.3.3. La boussole .....	15
1.3.4. L'état des connaissances en 1779.....	17
2. L'apport du XIX <sup>e</sup> siècle .....	18
3. Le magnétisme au XX <sup>e</sup> siècle.....	20
4. Le magnétisme technique.....	22
Champs magnétiques .....	22
Aimants.....	24
Nouvelles applications .....	24
5. Nouvelles voies de recherche.....	25
5.1. Nanostructures magnétiques.....	25
5.2. Multicouches magnétiques .....	26
5.3. Magnétisme moléculaire.....	27
5.4. Autres voies de recherche .....	27
Références.....	28
<b>Chapitre 2 - Magnétostatique</b> .....	29
1. Magnétostatique des courants et de la matière .....	29
1.1. Magnétostatique des courants dans le vide .....	29
1.1.1. Lois fondamentales de la magnétostatique : l'induction magnétique .....	30
1.1.2. Théorème d'Ampère - Champ magnétique .....	32
1.1.3. Conservation du flux - Potentiel vecteur .....	33
1.1.4. Conditions aux limites pour B et A à la traversée d'une nappe de courant .....	34
1.1.5. Induction et champ produits par un circuit filiforme Coefficient de champ d'une bobine .....	34
1.1.6. Etude de quelques distributions simples de courant .....	34
1.1.7. Induction et champ créés à grande distance par des courants confinés dans un volume fini : moment magnétique, dipôle magnétique, masse magnétique .....	37
1.1.8. Relations fondamentales dans l'approche coulombienne.....	39
1.2. Magnétostatique de la matière .....	40
1.2.1. Moment magnétique, aimantation et induction associée à la matière .....	40
1.2.2. Détermination de B (et A) à partir des courants liés : approche ampérienne.....	41
1.2.3. Le champ magnétique H dans la matière aimantée.....	42
1.2.4. Détermination de H à partir des masses magnétiques équivalentes : approche coulombienne .....	42
1.2.5. Application à deux cas simples.....	44
1.2.6. Le champ démagnétisant $H_d$ .....	45
1.2.7. Coefficient de champ démagnétisant.....	46

1.3.	Réponse de la matière à un champ magnétique .....	47
1.3.1.	Choix du champ magnétique H comme variable indépendante .....	47
1.3.2.	Différents types de comportement magnétique d'une substance .....	48
1.3.3.	Cas de substances anisotropes .....	49
1.3.4.	Remarque .....	50
1.3.5.	Correction du champ démagnétisant - Notion de susceptibilité externe .....	50
1.4.	Problème général de la détermination de B et M .....	51
1.5.	Approximation des circuits magnétiques .....	53
2.	Energie, forces et couples au sein des systèmes magnétiques .....	55
2.1.	Le couplage électromagnétique dans le vide .....	55
2.1.1.	Force et champ de Lorentz .....	56
2.1.2.	Champ électrique créé dans un conducteur en mouvement par une induction magnétique B .....	56
2.1.3.	Champ électrique créé par une induction variable .....	58
2.1.4.	Induction magnétique créée par un champ électrique variable .....	59
2.1.5.	Equations de Maxwell dans le vide .....	60
2.1.6.	Couplage électromagnétique dans la limite des phénomènes lents Energie magnétique .....	60
2.1.7.	Forces déduites de l'énergie - Nature de l'énergie magnétique .....	62
2.1.8.	Auto-induction .....	63
2.1.9.	Mutuelle induction .....	63
2.1.10.	Moments magnétiques spontané et induit. ....	64
2.1.11.	Energie d'un moment rigide dans une induction donnée .....	65
2.1.12.	Energie d'interaction dipolaire .....	65
2.2.	Energie, forces et couples dans les systèmes magnétiques .....	67
2.2.1.	Calcul direct des couples et des forces dans un système magnétique .....	68
2.2.2.	L'énergie d'aimantation de la matière et l'énergie de champ démagnétisant .....	69
2.2.3.	Energie de Zeeman et énergie magnétostatique .....	72
2.2.4.	Couple magnétostatique agissant sur l'aimantation .....	72
2.2.5.	Energie d'un système magnétique complet .....	73
3.	Calculs annexes .....	74
3.1.	Calcul de $B_m$ hors de la matière .....	74
3.2.	Calcul de $B_m$ dans la matière .....	75
3.3.	Calcul de l'intégrale $\Sigma$ .....	76
	Exercices .....	77
	Solutions des exercices .....	83
	Références .....	88
	<b>Chapitre 3 - Phénoménologie du magnétisme à l'échelle macroscopique</b> .....	89
1.	Présentation de quelques types de comportements magnétiques .....	89
1.1.	Diamagnétisme .....	89
1.2.	Paramagnétisme .....	90
1.3.	Antiferromagnétisme .....	91
1.4.	Ferromagnétisme .....	92
1.5.	Ferrimagnétisme .....	93
1.6.	Propriétés magnétiques des éléments purs à l'état atomique .....	94
1.7.	Propriétés magnétiques des édifices polyatomiques .....	94
2.	Phénoménologie des matériaux fortement magnétiques .....	96
2.1.	Courbes d'aimantation isothermes .....	96
2.2.	Domaines de Weiss et parois de Bloch .....	97
2.3.	Anisotropie magnétique .....	99
2.3.1.	Cas de la Symétrie cubique .....	99
2.3.2.	Cas de la symétrie hexagonale .....	100
2.3.3.	Cas de la symétrie quadratique .....	100
2.3.4.	Cas de la symétrie uniaxiale .....	101
2.3.5.	Quelques remarques sur l'anisotropie magnétique .....	101

2.4. Effets liés à l'anisotropie - Notion de champ d'anisotropie - Règle des phases.....	102
2.4.1. Matériau uniaxial de symétrie quadratique ou hexagonale .....	102
2.4.2. Anisotropie magnétocristalline en symétrie cubique .....	106
2.4.3. Anisotropie magnétique en phase paramagnétique.....	107
2.5. Phénomènes dépendant du temps.....	107
2.5.1. Traînage de fluctuations thermiques.....	108
2.5.2. Traînage de diffusion .....	109
3. Phénomènes physiques associés au magnétisme.....	110
Exercices .....	112
Solutions des exercices.....	113
Références.....	113
<b>Chapitre 4 - Phénoménologie du magnétisme à l'échelle microscopique.....</b>	<b>115</b>
1. Le modèle classique du diamagnétisme : cas des électrons localisés.....	115
2. Systèmes comportant des moments magnétiques localisés sans interaction.....	118
2.1. Effet d'un champ uniforme sur un moment magnétique : la précession.....	118
2.2. Cas d'une assemblée de moments magnétiques localisés sans interaction : le paramagnétisme de Curie.....	120
2.3. Le superparamagnétisme .....	125
3. Interactions d'échange.....	126
3.1. Généralités.....	126
3.2. L'interaction d'échange et l'approximation du champ moléculaire .....	126
3.3. Aspects expérimentaux .....	128
4. Le ferromagnétisme dans le modèle de champ moléculaire .....	129
5. L'antiferromagnétisme dans le modèle de champ moléculaire.....	132
5.1. Température de Néel.....	133
5.2. Susceptibilité paramagnétique.....	134
5.3. Susceptibilité perpendiculaire.....	134
5.4. Susceptibilité parallèle.....	135
5.5. Le métamagnétisme .....	136
6. Le ferrimagnétisme dans le modèle de champ moléculaire .....	137
7. Autres types d'arrangements magnétiques (hélismagnétisme, structures modulées en amplitude ...) dans le modèle de champ moléculaire.....	139
7.1. Structure hélismagnétique .....	140
7.2. Structure modulée sinusoidalement en amplitude .....	141
7.3. Structures magnétiques observées dans les substances amorphes .....	142
8. Les deux grandes familles de matériaux magnétiques .....	143
9. Les tracés d'Arrott.....	144
9.1. Matériau n'ayant pas d'aimantation spontanée.....	144
9.2. Matériau présentant une faible aimantation spontanée.....	145
10. Conclusions.....	147
Exercices.....	148
Solutions des exercices.....	148
Références.....	149
<b>Chapitre 5 - Ferromagnétisme d'un système idéal.....</b>	<b>151</b>
1. Introduction.....	151
2. Le principe des configurations ferromagnétiques ou l'art du compromis .....	152
2.1. L'interaction d'échange .....	152
2.2. L'interaction dipolaire magnétique .....	153
2.3. Compétition entre interactions d'échange et interactions dipolaires .....	154
2.4. Rôle de l'anisotropie magnétocristalline .....	154
2.5. Les solutions de compromis .....	155

3. Les parois entre domaines .....	156
3.1. Parois des milieux ordinaires (parois de Bloch) .....	157
3.1.1. Géométrie des parois de Bloch .....	157
3.1.2. Evaluation de l'énergie et de la largeur de paroi .....	158
3.1.3. Calcul exact de l'énergie et de la largeur de paroi .....	160
3.2. Les parois dans les milieux très anisotropes (parois étroites) .....	163
3.3. Les parois dans les matériaux en couches très minces .....	165
4. Les configurations en domaines .....	168
4.1. Configurations en domaines dans les cristaux uniaxes .....	168
4.2. Domaines de fermeture .....	171
5. Les configurations magnétiques dans les particules de petites dimensions	
Particules monodomaines .....	172
5.1. Configurations stables les plus probables .....	173
5.2. Particules ellipsoïdales et anisotropie de forme .....	175
6. Observation des domaines et des parois .....	176
6.1. Domaines ferro- et ferrimagnétiques .....	176
6.1.1. La méthode de Bitter .....	176
6.1.2. Observation de domaines magnétiques par les effets magnétooptiques .....	177
6.1.3. Observation de domaines magnétiques par les rayons X .....	178
6.1.4. Observation de domaines magnétiques par les neutrons .....	180
6.1.5. Observation de domaines magnétiques par les électrons .....	182
6.1.6. Observation des domaines magnétiques par l'anisotropie d'une précipitation .....	183
6.2. Observation de domaines antiferromagnétiques .....	183
6.2.1. Observation des domaines antiferromagnétiques par microscopie optique .....	183
6.2.2. Observation des domaines antiferromagnétiques par les rayons X et les électrons .....	184
6.2.3. Observation des domaines antiferromagnétiques par les neutrons .....	185
7. De l'état macroscopiquement désaimanté à l'état saturé :	
les processus d'aimantation sous l'effet d'un champ extérieur .....	186
7.1. Effet d'un champ appliqué parallèlement à l'axe facile dans un système uniaxe :	
aimantation par déplacement de parois .....	187
7.1.1. Résultat d'observations :	
grossissement des domaines parallèles au champ au détriment des autres .....	187
7.1.2. La loi de comportement : droite de champ démagnétisant .....	188
7.1.3. Le mécanisme de déplacement de parois dans les systèmes parfaits où l'échange est dominant .....	190
7.1.4. Le mécanisme de déplacement de parois dans les systèmes parfaits à très forte anisotropie intrinsèque .....	192
7.2. Effet du champ appliqué perpendiculairement à l'axe facile dans un système uniaxe : aimantation par rotation des moments .....	193
7.3. Champ appliqué obliquement par rapport à l'axe facile .....	194
7.4. Systèmes monocristallins cubiques (illustration de la règle des phases de Néel) .....	196
7.5. Processus d'aimantation dans les systèmes polycristallins .....	198
8. Retournement de l'aimantation à partir de l'état saturé et coercitivité .....	200
8.1. Réversibilité ou irréversibilité ? .....	201
8.2. Retournement par rotation collective uniforme des moments (rotation de l'aimantation à saturation) : modèle de Stoner-Wohlfarth .....	201
8.2.1. Présentation et mise en équation du système modèle .....	201
8.2.2. Champ appliqué antiparallèlement à $M_r$ .....	202
8.2.3. Champ inverse appliqué obliquement par rapport à la direction de $M_r$ .....	204
8.3. D'autres modes de retournement collectif sont-ils possibles ? .....	206
8.3.1. Systèmes possédant une forte anisotropie magnétocristalline :	
inégalité de Brown .....	206
8.3.2. Systèmes sans anisotropie magnétocristalline .....	207
Références .....	208

<b>Chapitre 6 - Irréversibilité des processus d'aimantation et hystérésis dans les matériaux ferromagnétiques réels : le rôle des défauts</b> .....	211
1. Introduction : le modèle du matériau parfait n'est pas suffisant .....	211
2. Le rôle des défauts dans le phénomène d'irréversibilité du processus d'aimantation par déplacement de parois .....	213
2.1. Principe du modèle : mise en œuvre d'un potentiel oscillant irrégulier .....	214
2.2. Mécanismes d'accrochage des parois sur des défauts particuliers .....	216
2.2.1. Champ de contraintes inhomogène : mise en jeu d'une anisotropie uniaxiale induite modifiant localement l'énergie de paroi .....	216
2.2.2. Lacunes ou inclusions non magnétiques de grande taille : réductions locales de l'aire des parois et de l'énergie magnétostatique .....	217
2.3. Le champ critique de «décrochage» associé au processus de déplacement non libre des parois.....	219
2.3.1. Champ coercitif associé au modèle du potentiel oscillant.....	219
2.3.2. Le champ critique dans le cas d'une paroi déformable .....	220
3. Le rôle des défauts dans le phénomène de retournement de l'aimantation à partir de l'état saturé.....	222
3.1. Paradoxe de Brown .....	222
3.2. Défauts et nucléation.....	223
3.2.1. Les défauts donnant lieu à la nucléation de domaines inverses en champ nul .....	223
3.2.2. Les défauts ne donnant lieu à nucléation que dans un champ inverse notable .....	226
4. Hystérésis et irréversibilité : expérience et modèles simples.....	226
4.1. Comportements observés.....	226
4.1.1. La courbe de première aimantation, tracée à partir d'un état désaimanté .....	226
4.1.2. L'aimantation d'une substance donnée peut prendre toutes les valeurs contenues dans son cycle d'hystérésis majeur .....	229
4.1.3. La courbe d'aimantation anhystérique .....	230
4.2. Modélisation du comportement observé dans le domaine de Rayleigh.....	231
4.2.1. Représentation de Preisach .....	231
4.2.2. Théorie de l'hystérésis dans le domaine de Rayleigh (potentiel aléatoire de Néel).....	233
4.3. Des matériaux doux aux matériaux durs.....	235
5. Les traînages magnétiques : des effets à la fois retardés et amplifiés.....	237
5.1. Des effets d'activation thermique à l'origine des deux sortes de traînage magnétique.....	238
5.2. Le traînage magnétique de fluctuations	
Exemple des matériaux durs au voisinage du champ coercitif.....	239
5.2.1. Fondements de l'analyse du comportement observé : application au retournement d'aimantation dans les aimants permanents.....	239
5.2.2. Variation de l'aimantation avec le temps comparée à la variation de l'aimantation avec le champ : notion de champ de fluctuations .....	242
5.3. Le traînage magnétique de diffusion .....	244
5.3.1. Une anisotropie uniaxe localisée, thermiquement activée.....	244
5.3.2. La désaccommodation.....	246
Références.....	247
<b>Chapitre 7 - Magnétisme dans le modèle des électrons localisés</b> .....	249
1. Magnétisme de l'atome ou de l'ion libre .....	249
1.1. Cas d'un seul électron.....	249
1.1.1. Moment magnétique orbital .....	249
1.1.2. Moment magnétique de spin .....	251
1.1.3. Les états électroniques individuels ou atomes hydrogénoïdes .....	252
1.2. Atome ayant un nombre quelconque d'électrons .....	253
1.2.1. Méthode de Hartree - Approximation du champ central : les configurations.....	253
1.2.2. Termes .....	255
1.2.3. Couplage spin-orbite .....	256
1.2.4. Multiplets.....	256

2. Le magnétisme des atomes liés .....	259
2.1. Magnétisme localisé et magnétisme itinérant .....	259
2.2. Substances non magnétiques .....	260
2.3. Quelles sont donc les substances qui peuvent présenter un magnétisme notable ? .....	261
2.4. Les deux séries fondamentales d'éléments magnétiques .....	261
2.4.1. Distribution spatiale des orbitales électroniques .....	262
2.4.2. Influence des atomes voisins : effets de champ cristallin .....	262
3. Quelques exemples de moments magnétiques localisés .....	264
3.1. Les oxydes de fer .....	264
3.2. Autres composés ioniques de métaux 3d .....	264
3.3. Composés ioniques à base d'éléments terres rares .....	265
3.4. Composés intermétalliques à base de terres rares .....	266
3.5. Métaux de terres rares .....	267
4. L'anisotropie magnétocristalline : le champ électrique cristallin .....	267
4.1. Cas d'un électron d soumis au potentiel électrostatique d'un environnement uniaxial .....	268
4.2. Ordres de grandeur du champ cristallin .....	270
4.3. Effets du champ cristallin sur l'anisotropie magnétique des éléments 3d .....	271
4.3.1. Extinction du moment orbital .....	271
4.3.2. Cas d'un état $L = 2$ .....	271
4.3.3. Cas des ions $Fe^{3+}$ et $Mn^{2+}$ dans des isolants (ferrites par exemple) .....	271
4.3.4. Etats de bas spin .....	271
4.3.5. Influence de la symétrie .....	272
4.4. Effets du champ cristallin sur les ions des éléments de terres rares .....	272
4.4.1. Cas d'un multiplet $J = 4$ et $B_2^0 < 0$ .....	273
4.4.2. Cas d'un multiplet $J = 4$ et $B_2^0 > 0$ .....	274
4.4.3. Cas d'un multiplet $J = 5/2$ et $B_2^0 > 0$ .....	274
4.5. L'anisotropie des composés 4f uniaxiaux de symétrie hexagonale ou quadratique .....	275
Exercices .....	277
Références .....	278
<b>Chapitre 8 - Magnétisme dans le modèle des électrons itinérants .....</b>	<b>279</b>
1. Généralités .....	279
2. Propriétés particulières des métaux magnétiques .....	280
2.1. Les très faibles ferromagnétiques .....	281
2.2. Les métaux de transition et leurs alliages .....	281
2.3. Les métaux de terres rares .....	281
2.4. Les composés de terres rares et de métaux de transition .....	282
3. Le magnétisme des électrons totalement libres .....	282
3.1. Description simple d'un métal .....	282
3.2. Notion de densité d'états .....	283
3.3. Paramagnétisme de Pauli .....	283
3.4. Diamagnétisme de Landau .....	284
4. Le modèle de Stoner du ferromagnétisme itinérant .....	284
4.1. Critère d'instabilité ferromagnétique .....	284
4.2. Susceptibilité magnétique d'un métal en présence d'interaction .....	285
4.3. Solution ferromagnétique .....	286
4.4. Applications .....	288
5. Généralisation du critère de Stoner .....	288
5.1. Théorie de Stoner et théorie du champ moléculaire .....	288
5.2. Susceptibilité généralisée .....	288
5.3. Le champ moléculaire local .....	289
5.4. Susceptibilité dynamique .....	289
5.5. Le champ moléculaire local instantané .....	290

6. Les métaux de transition.....	291
6.1. La bande d des métaux de transition .....	291
6.2. Origine du magnétisme .....	293
6.3. Champ cristallin .....	295
6.4. Anisotropie magnétocristalline.....	296
7. Moment magnétique localisé en magnétisme itinérant .....	297
7.1. Le magnétisme des impuretés.....	297
7.1.1. Notion de densité d'états locale.....	297
7.1.2. Magnétisme d'une impureté .....	298
7.2. L'effet Kondo.....	298
7.3. Les verres de spin et la frustration.....	299
7.4. Moments magnétiques et métaux de transition.....	300
8. Magnétisme et environnement .....	301
9. Magnétisme des alliages de métaux de transition .....	302
10. Conclusion .....	305
Références.....	305
<b>Chapitre 9 - Les interactions d'échange .....</b>	<b>307</b>
1. Généralités sur les fonctions d'onde à plusieurs électrons .....	307
2. Interactions d'échange dans les isolants.....	309
2.1. Le superéchange.....	309
2.2. L'échange antisymétrique .....	310
3. Interactions d'échange dans les métaux .....	311
3.1. Interaction indirecte entre moments 4f (Interaction RKKY) .....	311
3.2. Interaction d'échange dans les métaux 3d .....	313
3.3. Double échange.....	314
4. Résumé.....	315
Références.....	315
<b>Chapitre 10 - Approche thermodynamique du magnétisme .....</b>	<b>317</b>
1. Rappels de thermodynamique .....	317
2. Potentiels thermodynamiques pour un système magnétique indéformable.....	319
3. Relations de Maxwell et inégalités .....	321
4. Cas du solide magnétique déformable .....	322
5. Les phénomènes de couplage.....	323
6. Énergie libre «à la Landau» .....	324
7. Exposants critiques et lois d'échelle.....	326
8. Anomalies magnétiques vers $T_C$ .....	328
9. Le modèle du champ moléculaire à l'épreuve de l'expérience.....	329
Exercice.....	330
Solution de l'exercice.....	330
Références.....	332
<b>Chapitre 11 - Couplage magnétocalorique et effets associés .....</b>	<b>333</b>
1. Variations thermiques de l'aimantation et chaleur spécifique.....	333
2. L'effet magnétocalorique.....	335
3. Effets thermiques irréversibles.....	337
4. Effets dimensionnels associés à l'effet magnétocalorique .....	339
5. Application des effets magnétothermiques.....	340
Exercices .....	340
Solutions des exercices.....	342
Références.....	343

<b>Chapitre 12 - Les effets magnétoélastiques</b> .....	345
1. Les principaux effets magnétoélastiques .....	345
1.1. Anomalie de dilatation - Magnétostriction spontanée et forcée d'échange.....	345
1.2. Influence de la pression hydrostatique sur les propriétés magnétiques .....	346
1.3. Anomalies sur les constantes élastiques : effet morphique .....	346
1.4. Magnétostriction anisotrope fortement sensible au champ magnétique .....	346
1.5. Influence d'une contrainte uniaxiale sur les propriétés magnétiques .....	347
1.6. Autres effets magnétoélastiques .....	348
2. Origine microscopique du couplage magnétoélastique.....	348
2.1. Couplage magnétoélastique d'échange isotrope.....	349
2.2. Couplage magnétoélastique anisotrope .....	350
2.2.1. Principe du calcul de l'énergie de couplage.....	350
2.2.2. Application au cas de la symétrie cubique .....	350
3. Notation symétrisée de Callen .....	351
4. Magnétostriction .....	353
4.1. La magnétostriction d'échange en symétrie cubique .....	353
4.2. La magnétostriction anisotrope en symétrie cubique .....	355
4.2.1. Mesure des coefficients de magnétostriction en symétrie cubique .....	357
4.2.2. Variation thermique de la magnétostriction .....	358
4.2.3. Variations sous champ magnétique de la magnétostriction anisotrope en symétrie cubique.....	359
4.3. La magnétostriction des cristaux hexagonaux .....	361
4.4. La magnétostriction des substances isotropes.....	362
4.4.1. Courbes de magnétostriction pour une substance intrinsèquement isotrope .....	362
4.4.2. Influence de l'état désaimanté sur la courbe de magnétostriction .....	364
4.4.3. Effet de la température sur la magnétostriction .....	366
4.5. La magnétostriction des matériaux polycristallins .....	366
4.6. Effets magnétoélastiques observés sur les surfaces et dans les couches minces .....	368
4.7. Magnétostriction dipolaire, ou effet de forme.....	370
4.8. Remarques sur la mesure de la magnétostriction.....	372
4.8.1. Contraintes internes liées à la magnétostriction.....	372
4.8.2. Détermination précise de la magnétostriction de Joule .....	372
5. Torsion d'un fil aimanté parcouru par un courant : effet Wiedemann .....	373
6. Effets magnétoélastiques inverses et effet $\Delta E$ .....	374
6.1. Effet d'une pression hydrostatique sur une substance magnétique .....	374
6.2. Effet d'une contrainte uniaxiale sur la courbe d'aimantation.....	375
6.2.1. Cas d'une substance de symétrie cubique.....	375
6.2.2. Cas d'une substance isotrope.....	376
6.2.3. Cas d'un matériau polycristallin.....	378
6.3. Effet de la torsion sur un barreau aimanté (effets Wiedemann inverse et Matteuci) .....	379
6.4. Ecart à la loi de Hooke pour les solides ferromagnétiques : l'effet $\Delta E$ .....	380
7. Modélisation des transducteurs magnétostrictifs.....	381
7.1. Coefficient de couplage magnéto-mécanique .....	382
7.2. Densité d'énergie élastique dynamique hors résonance .....	384
7.3. Couplage magnétoélastique à la résonance.....	384
Appendice : rappels d'élasticité linéaire .....	385
Exercices .....	387
Solutions des exercices.....	388
Références.....	390
<b>Chapitre 13 - Les effets magnéto-optiques</b> .....	391
1. Présentation des effets magnéto-optiques.....	391
1.1. Effets en transmission .....	392
1.1.1. Effet Faraday .....	392
1.1.2. Biréfringence magnétique rectiligne quadratique .....	394
1.1.3. Biréfringence magnétique rectiligne linéaire .....	394



1.2.	Effets en réflexion.....	395
1.2.1.	Effet Kerr polaire.....	395
1.2.2.	Effet Kerr longitudinal.....	395
1.2.3.	Effet Kerr transverse.....	395
1.3.	Effets magnéto-optiques non linéaires.....	396
1.4.	Diffraction magnétique et dichroïsme magnétique des rayons X.....	396
2.	Traitement phénoménologique.....	397
2.1.	Equation de propagation - Modes propres.....	397
2.2.	Effets en transmission.....	399
2.2.1.	Effet Faraday.....	399
2.2.2.	Effet Voigt.....	400
2.3.	Effets Kerr.....	401
2.3.1.	La configuration fondamentale de l'effet Kerr transverse.....	402
2.3.2.	La configuration fondamentale de l'effet Kerr longitudinal.....	402
2.3.3.	La configuration fondamentale de l'effet Kerr polaire.....	402
2.4.	Systèmes de couches minces.....	403
3.	Présentation physique.....	403
4.	Mesure et ordre de grandeur des effets magnéto-optiques.....	406
4.1.	Les méthodes de modulation.....	407
4.1.1.	La modulation d'amplitude (ou d'intensité).....	407
4.1.2.	La modulation de phase (et de direction de polarisation).....	408
4.2.	Détermination magnéto-optique de la direction des axes de facile aimantation.....	409
4.3.	Mesure de l'angle de rotation $\Theta$ d'une direction de polarisation rectiligne (cas des effets Faraday, Kerr polaire et longitudinal).....	409
4.4.	Mesure de l'ellipticité.....	411
4.5.	Mesure d'une variation d'intensité (cas de l'effet Kerr transverse, des dichroïsmes circulaire et rectiligne).....	411
4.6.	Mesure du déphasage et de sa variation.....	412
4.7.	Quelques ordres de grandeurs.....	412
4.7.1.	Effet Faraday.....	413
4.7.2.	Effet Kerr polaire.....	414
4.7.3.	Effet Kerr longitudinal.....	415
4.7.4.	Effet Kerr transverse.....	416
5.	Utilisations et applications des effets magnéto-optiques.....	417
5.1.	Utilisations en physique.....	417
5.1.1.	Caractérisation magnétique - Hystérésigraphie.....	417
5.1.2.	Évolution de l'aimantation dans les systèmes homogènes Transitions de phases.....	418
5.1.3.	Magnéto-optique en diffraction.....	418
5.1.4.	Résonances.....	418
5.1.5.	Imagerie de domaines magnétiques.....	418
5.1.6.	Cartes de champ magnétique.....	421
5.2.	Applications.....	421
5.2.1.	Isolateurs optiques.....	421
5.2.2.	Capteurs de champ magnétique.....	423
5.2.3.	Contrôle non destructif.....	424
5.2.4.	Enregistrement magnéto-optique.....	424
	Appendice : Optique des matériaux non magnétiques.....	425
	Références.....	432
	<b>Chapitre 14 - Résistivité magnétique, magnétorésistance, effet Hall.....</b>	<b>437</b>
1.	Définitions.....	437
1.1.	Résistivité électrique.....	437
1.2.	Magnétorésistance.....	437
1.3.	Effet Hall.....	438
1.4.	Effet Hall planaire.....	438

2. Transport dans les matériaux métalliques magnétiques.....	439
2.1. Résistivité magnétique.....	439
2.2. Cas d'un moment localisé.....	439
2.3. Magnétisme itinérant, alliages de métaux de transition.....	440
2.3.1. Cas d'un métal magnétiquement ordonné.....	440
2.3.2. Fluctuations de spin et effet Kondo.....	440
2.4. Magnétorésistance.....	442
2.4.1. Effet cyclotron.....	442
2.4.2. Termes dépendant de l'aimantation - Désordre de spin.....	443
2.5. Effet Hall dans un matériau magnétique.....	443
3. Magnéto-transport dans les semiconducteurs.....	444
3.1. Semi-conducteurs non magnétiques.....	444
3.2. Semi-conducteurs magnétiques.....	445
4. Les transitions métal-isolant dans les matériaux magnétiques.....	445
4.1. Composés semi-conducteurs de métaux de transition.....	445
4.2. Types de transitions isolant-métal.....	446
4.2.1. La transition de Mott «classique».....	446
4.2.2. Les transitions par croisement de bandes (EuO au point de Curie).....	446
4.2.3. Les transitions de Mott-Hubbard.....	446
4.2.4. Les transitions de type Anderson dans les systèmes désordonnés.....	447
4.2.5. Un exemple : la magnétorésistance géante des manganites.....	448
4.3. Les demi-métaux.....	448
5. Effets quantiques.....	449
5.1. Effet Shubnikov-de Haas.....	449
5.2. Effet Hall quantique.....	450
6. Applications.....	451
6.1. Capteurs de champ à effet Hall.....	451
6.2. Capteurs magnétorésistifs.....	451
Remarque finale.....	451
Références.....	452
<b>Annexes</b> .....	455
1. Symboles utilisés dans le texte.....	455
2. Unités et constantes universelles.....	459
2.1. Conversion des unités MKSA en système CGS et autres systèmes d'unités d'usage courant.....	459
2.2. Quelques valeurs numériques utiles.....	460
3. Tableau périodique des éléments.....	461
4. Susceptibilités magnétiques.....	463
5. Matériaux ferromagnétiques.....	467
6. Fonctions spéciales.....	469
6.1. Harmoniques sphériques.....	469
6.2. Polynômes de Legendre.....	471
6.3. Fonction de Langevin.....	471
6.4. Fonctions de Brillouin.....	472
6.5. Fonctions de Bessel modifiées.....	473
7. Equations de Maxwell.....	475
<b>Bibliographie générale</b> .....	477
<b>Index des matériaux et des sujets</b> .....	481
<b>Table des matières</b> .....	487