

TABLE DES MATIÈRES

Chapitre 15 - Les aimants permanents	13
1. La mise en œuvre d'un aimant.....	14
1.1. Les deux cycles d'hystérésis du matériau : cycles en aimantation $M(H)$ et en induction $B(H)$	14
1.2. Principes de fonctionnement d'un aimant permanent idéal inséré dans un système d'exploitation type	14
1.2.1. Droite de charge et point de fonctionnement d'un aimant	15
1.2.2. Fonctionnements statique et dynamique d'un aimant permanent	17
1.2.3. Le produit énergétique maximum (fonctionnement statique)	17
1.2.4. Énergie libre mise en jeu dans un fonctionnement dynamique	19
1.3. Paramétrisation des performances des matériaux à aimant réels	20
1.3.1. Cycles en aimantation et en induction des divers types de matériaux durs	20
1.3.2. Le produit énergétique maximum $(BH)_{\max}$	21
1.3.3. Les paramètres et leurs plages de variation	21
2. Aimants orientés (ou texturés) et aimants isotropes.....	24
2.1. Présentation	24
2.2. Comparaison des comportements magnétiques	25
3. Principaux matériaux à aimant industriel	26
3.1. Les différents types d'aimants frittés et orientés	27
3.1.1. Les AlNiCo.....	27
3.1.2. Les ferrites	27
3.1.3. Les aimants samarium-cobalt	28
3.1.4. Les aimants à base de néodyme-fer-bore	28
3.2. Paramètres et courbes typiques.....	29
3.2.1. Aimants frittés et orientés	29
3.2.2. Aimants liés	29
4. Les utilisations des aimants permanents	31
4.1. Les grands domaines d'utilisation des aimants permanents.....	31
4.1.1. La miniaturisation.....	31
4.1.2. Sources de champs permanents	32
4.1.3. Aimants en répulsion.....	33
4.2. Propriétés des aimants industriels.....	34
4.2.1. Principales propriétés des aimants AlNiCo.....	34
4.2.2. Principales caractéristiques des aimants ferrites	35
4.2.3. Principales propriétés des aimants terres rares.....	36
4.3. Systèmes électromagnétiques	37
4.3.1. Evolution des moteurs.....	37
4.3.2. Les actionneurs à aimants permanents	39
4.4. Systèmes magnétomécaniques.....	40
4.4.1. Paliers magnétiques.....	40
4.4.2. Accouplements magnétiques	41

4.5.	Aimants utilisés comme source de champ magnétique	42
4.5.1.	Capteurs	42
4.5.2.	Systèmes à courants induits	43
4.5.3.	Source de champ	44
4.6.	Calcul des systèmes à aimants permanents	45
4.6.1.	Calcul de circuit fermé	46
4.6.2.	Calcul de circuit ouvert	46
4.6.3.	Méthodes numériques	47
4.6.4.	Caractéristiques des aimants	49
5.	Matériaux à aimant : microstructures et procédés d'élaboration.....	49
5.1.	La résistance au retournement d'aimantation (coercitivité) : comment la développer ?	49
5.1.1.	L'anisotropie uniaxiale forte	50
5.1.2.	Le rôle des défauts et la nécessité d'une microstructure	50
5.2.	Nécessaire réduction en grains du matériau à aimant.....	51
5.2.1.	Réduction en grains pour retarder la nucléation.....	51
5.2.2.	Réduction en grains pour augmenter la rémanence et la rectangularité du cycle M(H)	51
5.3.	Principes généraux des procédés mis en œuvre pour l'obtention des microstructures d'aimants	52
5.3.1.	Aimants frittés orientés	52
5.3.2.	Poudres coercitives et aimants liés	54
6.	Les matériaux de base pour aimant permanent	55
6.1.	Caractéristiques magnétiques des éléments 3d et 4f face aux propriétés requises pour obtenir un matériau dur	55
6.1.1.	Moments magnétiques et interactions d'échange dans les métaux de terres rares et de transition	56
6.1.2.	Anisotropie magnétocristalline des éléments 3d et 4f	57
6.2.	Matériaux à aimant à base d'éléments de transition.....	58
6.3.	Les alliages intermétalliques R-M (R = terre rare et M = métal de transition).....	61
6.3.1.	Le couplage d'échange R-M, via les électrons d	61
6.3.2.	Couplage R-M = ferromagnétisme ou ferrimagnétisme	64
6.3.3.	Anisotropie magnétocristalline dans les composés R-M de structure cristallographique uniaxiale : axe privilégié ou plan privilégié	66
6.4.	Revue des composés intermétalliques.....	67
6.4.1.	Composés binaires $R_x M_{1-x}$	68
6.4.2.	Composés ternaires	73
6.4.3.	Composés ternaires interstitiels	73
7.	Mécanismes de renversement de l'aimantation	75
7.1.	Analyse du renversement de l'aimantation dans les systèmes magnétiques dépourvus d'anisotropie magnétocristalline : application aux AlNiCo.....	75
7.2.	Renversement de l'aimantation dans les systèmes à forte anisotropie magnétocristalline : retournement non collectif par étapes	76
7.2.1.	Les étapes du processus	77
7.2.2.	Les moteurs du retournement : champs magnétiques et effets thermiques.....	78
7.3.	Le champ de renversement de l'aimantation H_R : analyse de sa relation avec les paramètres magnétiques intrinsèques de la phase principale	78
7.3.1.	H_R fonction de H_A et des effets dipolaires locaux	79
7.3.2.	H_R fonction de la barrière d'énergie mise en œuvre par le mécanisme critique	80

7.4. Quel mécanisme détermine le renversement d'aimantation ?.....	81
7.4.1. Analyse de la courbe de première aimantation et notamment de la susceptibilité initiale	82
7.4.2. Observation des domaines et des mouvements de parois dans l'état thermiquement désaimanté	83
7.4.3. Variation du champ de retournement avec l'angle d'application du champ : $H_R(\theta_c)$..	84
7.4.4. La modélisation des différents mécanismes impliqués dans le processus non collectif de renversement de l'aimantation	86
Références.....	87
Chapitre 16 - Les matériaux doux pour l'électrotechnique et l'électronique basse fréquence	89
1. Présentation générale des matériaux doux.....	89
1.1. Les qualités requises d'un matériau doux.....	90
1.2. Rôle des caractéristiques structurales et électromagnétiques.....	90
1.2.1. Polarisation	90
1.2.2. Perméabilité.....	91
1.2.3. Dissipation d'énergie.....	92
1.3. Analyse des pertes d'énergie.....	92
1.3.1. Aspects macroscopiques	92
1.3.2. Calcul des pertes dans un matériau conducteur	93
1.4. Pertes en champ tournant ou trapézoïdal.....	96
2. Matériaux cristallins à base de fer.....	96
2.1. Le fer et les aciers doux	96
2.2. Les alliages fer-silicium classiques	97
2.3. Les tôles Fe-Si à grains non orientés (NO).....	99
2.3.1. Caractéristiques magnétiques.....	99
2.3.2. Utilisations.....	100
2.3.3. Évolution et perspectives des tôles NO	100
2.4. Les tôles Fe-Si à grains orientés (GO)	101
2.4.1. Optimisation de la structure en domaines	101
2.4.2. Caractéristiques magnétiques.....	103
2.5. Tôles fer-silicium de faible épaisseur.....	104
2.6. Alliages à haute teneur en silicium.....	105
2.6.1. Alliages obtenus par solidification rapide.....	105
2.6.2. Alliages enrichis par diffusion.....	107
3. Les alliages fer-nickel et fer-cobalt.....	108
3.1. La famille des fer-nickel.....	108
3.1.1. Alliages autour de 30% Ni.....	109
3.1.2. Alliages autour de 50% Ni.....	110
3.1.3. Alliages autour de 80% Ni (Permalloys).....	110
3.2. Les alliages fer-cobalt	111
4. Les ferrites doux	112
4.1. Propriétés électromagnétiques.....	112
4.1.1. Polarisation à saturation.....	112
4.1.2. Température de Curie.....	113
4.1.3. Anisotropie	113
4.1.4. Magnétostriktion.....	113
4.1.5. Résistivité	113
4.1.6. Produit perméabilité - Fréquence de coupure.....	113

4.2. Utilisations des ferrites	114
4.2.1. Électronique de puissance.....	114
4.2.2. Applications de faible puissance.....	114
5. Les alliages amorphes.....	115
5.1. Caractéristiques générales.....	115
5.2. Les grandes classes d'alliages doux amorphes.....	116
5.2.1. Alliages à haute polarisation.....	116
5.2.2. Alliages à faible magnétostriction	116
5.3. Utilisations des alliages amorphes.....	117
6. Les matériaux nanocristallins.....	117
6.1. Caractéristiques électromagnétiques	118
6.1.1. Polarisation	118
6.1.2. Anisotropie	118
6.1.3. Magnétostriction.....	119
6.1.4. Résistivité	119
6.1.5. Anisotropie uniaxiale induite.....	119
6.2. Le modèle d'anisotropie aléatoire.....	120
6.3. Usages des nanocristallins	121
7. La transformation de l'énergie aux fréquences industrielles (50-400 Hz).....	122
7.1. Les transformateurs de distribution.....	123
7.2. Les machines tournantes.....	127
7.2.1. Rappels sur l'énergie des systèmes magnétiques	128
7.2.2. Application à l'étude de quelques structures	128
7.2.3. Les grandes classes de machines	132
7.2.4. Matériaux magnétiques doux utilisés dans les machines tournantes.....	134
8. Les actionneurs	135
8.1. Un exemple d'actionneur tournant : la machine pas à pas à réluctance variable.....	135
8.2. Critères de choix, ordres de grandeurs	141
9. La transformation de l'énergie en électronique de puissance.....	143
9.1. Les inductances de lissage et les composants à accumulation d'énergie inductive	143
9.2. Contraintes liées à la haute fréquence	145
9.3. L'interfaçage commande-puissance.....	146
9.3.1. La durée maximale d'impulsion	146
9.3.2. Temps de réponse.....	147
9.3.3. Remarque sur l'interrupteur statique.....	147
Exercice : Étude d'un dispositif stabilisateur de tension utilisant une inductance saturable.....	148
Solution de l'exercice	151
Références.....	153
Chapitre 17 - Les matériaux doux pour l'électronique haute fréquence	155
1. Susceptibilité et perméabilité complexes.....	155
1.1. Susceptibilité et perméabilité complexes isotropes	156
1.1.1. Signification physique de χ' , χ'' , μ' et μ''	156
1.1.2. Régime dynamique quelconque.....	157
1.1.3. Relations de Kramers-Kronig	158
1.2. Matériaux anisotropes - Tenseur de susceptibilité et perméabilité complexes.....	158

2. Méthodes de mesure de la susceptibilité et de la perméabilité complexes.....	159
2.1. Susceptibilités interne et externe	159
2.1.1. Calcul de la susceptibilité externe dans un cas simple.....	160
2.1.2. Effet du champ démagnétisant sur les dérives et sur les pertes.....	160
2.1.3. Effet de peau et résonance dimensionnelle	161
2.2. Théorème de réciprocité	162
2.3. Mesure par perturbation d'une bobine	162
2.4. Mesure à deux bobines.....	163
2.5. Limitations en fréquence des méthodes de bobine	164
2.6. Mesure sur échantillon torique	164
3. Les mécanismes élémentaires de susceptibilité.....	166
3.1. Mécanisme de rotation	167
3.1.1. Rotation isotrope (ou symétrie uniaxiale)	168
3.1.2. Rotation anisotrope	172
3.2. Mécanisme de paroi	173
3.2.1. Comportement balistique - Masse de Döring.....	174
3.2.2. Introduction de l'amortissement - Mobilité de paroi	176
3.2.3. Equation du mouvement d'une paroi plane isolée	177
3.2.4. Généralisation aux parois courbes	177
3.2.5. Relaxation de diffusion	178
3.2.6. Désaccommodation	178
4. Susceptibilité dans l'état désaimanté : le problème de l'homogénéisation.....	179
4.1. Les approximations d'additivité ou de moyenne	180
4.1.1. Modèle de Snøek.....	180
4.1.2. Modèle de Globus <i>et al.</i>	180
4.2. Modèle du milieu effectif	182
4.3. Contribution de paroi et contribution de rotation	183
5. Susceptibilité dans l'état saturé - Modes magnétostatiques.....	184
5.1. Susceptibilités et perméabilités circulaires - Gyrotropie.....	185
5.2. Résonance magnétostatique uniforme.....	186
5.3. Résonance non uniforme : modes magnétostatiques	187
5.4. Rôle de l'interaction d'échange : ondes de spins.....	189
6. Panorama des matériaux et des applications radiofréquences	191
6.1. Spinelles	191
6.2. Hexaferrites planaires	194
6.3. Applications aux composants inductifs linéaires	195
7. Panorama des matériaux et des applications hyperfréquences	198
7.1. Grenats ferrimagnétiques.....	198
7.2. Applications hyperfréquences	199
7.2.1. Dispositifs non réciproques.....	199
7.2.2. Résonateur accordable	203
Appendice : Méthode du milieu effectif.....	204
Exercices.....	209
Solutions des exercices.....	209
Références.....	210

Chapitre 18 - Les matériaux magnétostrictifs	213
1. La famille des Invars et des Elinvars	213
1.1. Alliages à dilatation thermique contrôlée	213
1.2. Alliages à module élastique stable	215
2. Matériaux magnétostrictifs pour actionneurs	216
2.1. Les matériaux à forte magnétostriction anisotrope	216
2.2. Le Terfenol-D	217
2.3. Applications du Terfenol-D aux actionneurs	222
2.3.1. Actionneur linéaire	222
2.3.2. Actionneur différentiel	222
2.3.3. Actionneur à effet Wiedemann	223
2.3.4. Moteur linéaire magnétostrictif	223
2.3.5. Moteurs magnétostrictifs rotatifs	224
2.3.6. Les sonars	225
3. Matériaux pour capteurs	226
3.1. Le Metglas 2605SC	227
3.2. Capteurs basés sur les effets magnétoélastiques inverses	228
3.2.1. Capteur de force	228
3.2.2. Magnétomètre ultrasensible	229
3.2.3. Couplement à effet Wiedemann inverse	229
3.3. Capteurs basés sur les effets magnétoélastiques directs	230
3.3.1. Magnétomètres magnétostrictifs	230
3.3.2. Détecteur de position	230
4. Actionneurs et capteurs intégrés	231
5. Conclusions et perspectives	232
Exercices	233
Solutions des Exercices	233
Références	235
Chapitre 19 - La supraconductivité	237
1. Introduction	237
2. Définition de la supraconductivité	238
3. Quelques propriétés fondamentales des supraconducteurs	239
3.1. Champ critique thermodynamique et courant critique	239
3.2. Longueurs caractéristiques	239
4. Effets physiques reliés à la phase	240
4.1. Quantification du flux dans un anneau	240
4.2. Effet Josephson	241
4.3. Effet Josephson alternatif	242
4.4. Dynamique d'une jonction shuntée	242
5. Les SQUID	243
5.1. Le SQUID dc	244
5.2. Le SQUID rf	245
5.3. Le SQUID dans la pratique	246
6. Supraconducteur de type I et supraconducteur de type II	247
6.1. Champs critiques d'un supraconducteur de type II	248
6.2. Le réseau d'Abrikosov	249

6.3. Courant critique dans les supraconducteurs de type II	249
6.4. L'ancrage des vortex.....	250
7. Les matériaux supraconducteurs.....	251
8. Les applications	251
Références.....	253
Chapitre 20 - Couches minces et multicouches magnétiques	255
1. Du contrôle de l'environnement local au contrôle des propriétés physiques.....	256
2. Elaboration et nanostructure des couches minces et multicouches magnétiques.....	259
2.1. Généralités.....	259
2.2. Techniques expérimentales les plus communément utilisées pour l'élaboration des couches minces et multicouches magnétiques.....	260
2.2.1. La pulvérisation cathodique.....	260
2.2.2. L'épitaxie par jet moléculaire (EJM, MBE en anglais).....	262
2.2.3. Les méthodes de caractérisation chimique et structurale des couches minces et multicouches	264
3. Magnétisme des surfaces, interfaces et couches minces.....	264
3.1. Augmentation du moment magnétique à la surface de métaux de transition	264
3.2. Apparition de moments en surface dans des matériaux n'ayant pas de moment en volume.....	266
3.3. Effets induits par le substrat sur le magnétisme de films ultraminces épitaxiés.....	266
3.4. Effet de dimensionalité réduite sur la transition de phase magnétique.....	268
3.5. Anisotropie magnétique des couches minces.....	268
3.5.1. Anisotropie de forme.....	271
3.5.2. Anisotropie magnétocristalline	272
3.5.3. Anisotropie magnétoélastique.....	272
3.5.4. Effet de rugosité et d'interdiffusion	273
4. Mécanismes de couplage dans les multicouches magnétiques	274
4.1. Couplage direct ferromagnétique par trous d'épingle ou par couplage dipolaire	274
4.2. Couplage à travers une couche non-magnétique dans les multicouches formées d'une alternance de couches de métal de transition ferromagnétique et de couches de métal de transition ou noble non-magnétique (exemple Co/Cu).....	276
4.3. Couplage interfacial entre couches de métaux de transition ferromagnétiques et de terres rares.....	277
5. Propriétés de transport de couches minces et multicouches	280
5.1. Généralités sur le transport électronique dans les métaux.....	280
5.1.1. Image classique	280
5.1.2. Description de la conductivité électrique dans le cadre d'un modèle de bandes, modèle du gaz d'électrons libres	281
5.1.3. Modèle à deux courants, diffusion dépendante du spin dans les métaux de transition magnétique.....	284
5.2. Effet de taille finie sur la conductivité de couches minces métalliques.....	285
5.3. Magnétorésistance des couches minces et multicouches métalliques magnétiques.....	286
5.3.1. Anisotropie de la magnétorésistance dans les métaux de transition ferromagnétiques massifs et en couches minces.....	286
5.3.2. L'effet de magnétorésistance géante (GMR).....	288
5.3.3. Origine physique de la magnétorésistance géante	289
5.3.4. Les différents types de multicouches à magnétorésistance géante.....	291

5.4. Effet tunnel d'électrons de spin polarisé.....	293
5.5. Applications des couches minces et multicouches magnétiques.....	295
5.5.1. Media pour l'enregistrement magnétique	295
5.5.2. Media pour l'enregistrement magnéto-optique.....	296
5.5.3. Matériaux doux.....	296
5.5.4. Matériaux magnétostrictifs	297
5.5.5. Matériaux pour usage micro-ondes	297
5.5.6. Matériaux magnétorésistifs	297
Références.....	298
Chapitre 21 - Les principes de l'enregistrement magnétique	301
1. Introduction.....	302
2. Panorama des divers procédés d'enregistrement magnétique	302
2.1. Enregistrement analogique	303
2.2. Enregistrement numérique.....	305
2.3. Enregistrement perpendiculaire.....	306
2.4. Enregistrement magnéto-optique.....	307
2.5. Mémoire à propagation de domaines	307
3. Les milieux d'enregistrement (media).....	309
3.1. Milieux particuliers	310
3.1.1. Modèle de Stoner-Wohlfarth	310
3.1.2. Superparamagnétisme des milieux particuliers	311
3.2. Milieux granulaires, couches minces métalliques.....	312
3.3. Milieux continus : couches monocristallines épitaxiales et couches amorphes homogènes.....	314
4. Le processus d'écriture	315
4.1. Champ produit par une tête magnétique	315
4.2. Stabilité de l'aimantation écrite.....	317
4.3. Ecriture d'une transition par une tête de Karlqvist.....	319
5. Le processus de lecture.....	322
5.1. Lecture inductive.....	322
5.2. Lecture magnétorésistive	325
6. Remarque conclusive.....	331
Références.....	331
Chapitre 22 - Ferrofluides	333
1. Introduction.....	333
2. Caractéristiques d'un ferrofluide	334
2.1. Stabilité.....	334
2.2. Types de ferrofluides et fabrication.....	335
2.2.1. Ferrofluides surfactés	335
2.2.2. Ferrofluides ioniques.....	336
3. Propriétés des ferrofluides.....	336
3.1. Superparamagnétisme	336
3.2. Interactions entre particules : formation de chaînes	338
3.3. Viscosité	339
3.4. Biréfringence optique.....	340

4. Applications	341
4.1. Joints étanches à grande durée de vie.....	341
4.2. Lubrification - Transfert thermique.....	341
4.3. Imprimante	341
4.4. Accéléromètres et inclinomètres	342
4.5. Polissage.....	342
4.6. Amortisseurs.....	342
4.7. Applications des propriétés optiques des ferrofluides	342
4.8. Applications de caractère biomédical.....	343
4.9. Développements prévisibles	343
5. Instabilités de surface	344
Références.....	347
Chapitre 23 - Imagerie par résonance magnétique.....	349
1. Bases physiques de la résonance magnétique nucléaire.....	349
1.1. Niveaux d'énergie dans un champ magnétique	349
1.2. Une assemblée de noyaux dans un champ magnétique	351
1.3. Impulsions radiofréquence.....	351
1.4. Relaxation spin réseau	352
1.5. Signal de précession libre	353
1.6. Déplacement chimique.....	353
1.7. Échos de spins	354
1.8. L'expérience RMN	356
2. L'imagerie de résonance magnétique	356
2.1. Impulsions sélectives : l'approximation de la réponse linéaire	357
2.2. Gradients de champ.....	360
2.3. Excitation d'un système de spins en présence de gradient : sélection de tranche.....	361
2.4. Imagerie : l'espace réciproque	362
2.5. Contraste.....	364
3. Un exemple d'application de l'IRM : l'imagerie de l'activité cérébrale	364
3.1. Les modifications hémodynamiques et du degré d'oxygénation induites par l'activation neuronale	365
3.2. Le contraste Bold : mécanismes biophysiques	366
3.2.1. Effets de susceptibilité magnétique dans des tissus	368
3.2.2. Effets de susceptibilité et signal RMN : le contraste BOLD	369
3.3. Les séquences IRMf.....	373
3.4. Le déroulement d'un protocole IRMf et le traitement d'images	375
3.5. Exemples d'applications.....	375
3.5.1. Vision.....	376
3.5.2. Cognition	377
3.5.3. Motricité	378
Références.....	379
Chapitre 24 - Magnétisme des matériaux terrestres et géomagnétisme.....	381
1. Introduction.....	381
2. Techniques expérimentales	382
2.1. Généralités.....	382
2.2. Mesures d'aimantation rémanente.....	383

2.3. Mesures de susceptibilité et d'anisotropie	384
2.4. Caractérisation des minéraux magnétiques	385
2.5. Mesures de champ	386
3. Propriétés magnétiques intrinsèques des matériaux terrestres	386
3.1. Introduction	386
3.2. Les différents minéraux magnétiques	388
3.2.1. Les oxydes	388
3.2.2. Les sulfures	390
3.2.3. Autres minéraux ordonnés	390
3.2.4. Les minéraux paramagnétiques	391
3.3. Applications de la minéralogie magnétique en sciences de la Terre	391
4. Anisotropie magnétique : application à la détermination de la fabrique des matériaux	393
5. L'aimantation rémanente naturelle	397
5.1. Principes du paléomagnétisme	397
5.2. Les processus d'acquisition de l'ARN	398
5.2.1. L'aimantation thermorémanente (ATR)	398
5.2.2. L'aimantation rémanente cristalline (ARC)	398
5.2.3. L'aimantation rémanente visqueuse (ARV)	399
5.2.4. L'aimantation rémanente de dépôt (ARD)	399
5.2.5. L'aimantation piézorémanente (APR)	399
5.3. Techniques d'analyse de l'ARN	400
6. Le champ magnétique terrestre actuel	401
6.1. Généralités	401
6.2. Le champ du noyau	402
6.3. Variations spatiales à courte longueur d'onde : aimantation de la croûte	403
6.4. Variations temporelles rapides : champ externe	405
7. Le champ passé vu par le paléomagnétisme	407
8. Origine du champ du noyau : l'effet dynamo	409
9. Applications du paléomagnétisme	411
9.1. Tectonique et dérive des continents	411
9.2. Datation	413
10. Magnétisme extraterrestre	415
Références	417
Chapitre 25 - Magnétisme et Sciences de la Vie	419
1. Propriétés magnétiques de la matière organique	419
1.1. Matériaux organiques inertes	419
1.2. Matériaux organiques vivants	420
1.3. Matériaux organométalliques et biologie	421
1.3.1. L'hémoglobine	421
1.3.2. La ferritine et l'hémosidérine	422
1.3.3. La fibrine	422
1.4. Minéraux magnétiques encapsulés par la matière organique	422
1.4.1. Algues et bactéries magnétiques	422
1.4.2. Magnétisme animal	423
1.4.3. Microsphères encapsulées	424
1.5. La sensibilité de l'homme aux champs magnétiques	424

2. Techniques magnétiques d'exploration du vivant	425
2.1. Les méthodes de résonance.....	425
2.2. La détection des champs magnétiques émis par les tissus vivants.....	425
2.3. Les techniques de marquage magnétique.....	427
2.4. Les capteurs magnétiques	427
3. Techniques magnétiques d'intervention in vivo	428
3.1. Valve cardiaque.....	428
3.2. Guidage magnétique de cathéters.....	429
3.3. Soins dentaires.....	430
3.4. Micro-actionneurs	430
3.5. Utilisation des bactéries magnétiques	431
3.6. Utilisation d'autres matériaux magnétiques	431
3.7. Magnétothérapie.....	431
4. Conclusions.....	432
Références.....	433
Chapitre 26 - Magnétisme pratique et instrumentation.....	435
1. Techniques de mesure de l'aimantation.....	435
1.1. Théorème de réciprocité	435
1.2. Mesure des matériaux doux	436
1.2.1. Mesure d'un échantillon torique	437
1.2.2. Perméamètre d'Epstein	438
1.3. Mesure d'aimantation de matériaux durs ou de matériaux faiblement magnétiques	438
1.3.1. Méthodes de force	438
1.3.2. Méthodes de flux	441
1.3.3. Pont de Hartshorn.....	449
1.3.4. Mesure d'anisotropie.....	450
1.3.5. Étalonnage de l'aimantation	450
2. Production de champs magnétiques.....	450
2.1. Production de champ magnétique sans utiliser des matériaux magnétiques	451
2.1.1. Calcul du champ produit par un solénoïde en n'importe quel point de l'espace.....	451
2.1.2. Le solénoïde.....	452
2.1.3. La bobine supraconductrice	452
2.1.4. La bobine de Bitter.....	454
2.1.5. Techniques hybrides.....	454
2.1.6. Champs pulsés.....	455
2.2. Production de champ magnétique en utilisant des matériaux magnétiques.....	456
2.2.1. Quelques approximations utiles.....	456
2.2.2. Canalisation du flux - Cas d'un circuit fermé	457
2.2.3. Canalisation du flux - Cas d'un circuit avec entrefer : l'électroaimant.....	458
2.2.4. L'aimant	460
2.2.5. Aimant en U presque fermé.....	461
2.2.6. Le cylindre magique.....	462
Référence	465

Annexes	467
1. Symboles utilisés dans le texte.....	467
2. Unités et constantes universelles.....	471
2.1. Conversion des unités MKSA en système CGS et autres systèmes d'unités d'usage courant.....	471
2.2. Quelques valeurs numériques utiles	472
3. Tableau périodique des éléments	473
4. Susceptibilités magnétiques	475
5. Matériaux ferromagnétiques	479
6. Aspects économiques des matériaux magnétiques.....	481
6.1. Introduction	481
6.2. Matériaux durs pour aimants permanents	482
6.3. Matériaux doux	485
6.4. Matériaux pour l'enregistrement magnétique	486
6.5. Autres matériaux magnétiques	486
Bibliographie générale	489
Index des matériaux et des sujets	493
Table des matières	499