

Magnétisme et matériaux magnétiques

pour l'électrotechnique

Pierre Brissonneau

HERMES

Table des matières

Avant-propos	15
Préface	17
Chapitre 1. Rôle et place des matériaux magnétiques en technologie électrique	19
1.1. Introduction.....	19
1.2. Les fondements de l'utilisation des matériaux magnétiques en génie électrique.....	20
1.2.1. Importance de la loi de l'induction de Faraday.....	20
1.2.2. Efficacités comparées des sources de champ magnétique.....	21
1.2.3. Conclusion.....	23
1.3. Première classification sommaire des matériaux magnétiques pour le génie électrique.....	24
1.3.1. Une grandeur physique privilégiée : l'aimantation.....	24
1.3.2. Origine de la classification en matériaux doux et durs : l'hystérésis.....	24
1.3.3. Evolution.....	25
1.4. Importance économique des matériaux magnétiques.....	26
Chapitre 2. Magnétostatique du vide	29
2.1. Principe de base et définition du champ électromagnétique.....	29
2.1.1. Formule de Lorentz.....	29
2.1.2. Le champ magnétique des courants dans le vide.....	30
2.1.3. Application de la formule de Biot et Savart.....	31
2.2. Première propriété remarquable du champ magnétique.....	33
2.2.1. Enoncé.....	33
2.2.2. Démonstration simplifiée.....	34
2.2.3. Conséquence directe : le théorème d'Ampère.....	35
2.2.4. Unité d'intensité du champ magnétique d'excitation.....	37
2.3. Deuxième propriété remarquable du champ d'induction magnétique B	37
2.3.1. Enoncé.....	37
2.3.2. Démonstration.....	37
2.3.3. Conséquence importante.....	38

2.4. Champ créé en un point éloigné par une distribution localisée de courants	39
2.4.1. Etude du champ créé en un point éloigné par une petite spire circulaire (méthode du potentiel scalaire)	39
2.4.2. Discussion du résultat.....	40
2.4.3. Reprise de l'étude en utilisant le potentiel-vecteur.....	43
2.4.4. Cas d'une distribution de courants localisée quelconque.....	44
2.5. Forces magnétiques exercées sur une distribution de courants localisée	45
2.5.1. Expression de la résultante des forces.....	45
2.5.2. Expression du couple exercé sur la distribution.....	46
2.5.3. L'énergie potentielle magnétostatique.....	47
2.6. Conclusions	48
Chapitre 3. Magnétostatique des milieux matériels.....	49
3.1. Aimantation et polarisation magnétique.....	49
3.2. Etude du champ magnétique dans le vide, à l'extérieur et au voisinage de la matière aimantée	50
3.2.1. Calcul de \mathbf{B}' en utilisant la méthode du potentiel scalaire.....	51
3.2.2. Calcul de \mathbf{B}' en utilisant la méthode du potentiel-vecteur.....	52
3.2.3. Application à un cylindre de révolution d'axe OZ, uniformément aimanté dans une direction parallèle à l'axe.	53
3.3. Le champ magnétique à l'intérieur de la matière aimantée	55
3.3.1. Problèmes soulevés.....	55
3.3.2. Définition de \mathbf{B} et \mathbf{H} dans la matière	56
3.3.3. Relation entre \mathbf{B} et \mathbf{H} dans la matière.....	57
3.4. Propriétés générales des champs \mathbf{B} et \mathbf{H}	59
3.4.1. Equations locales.....	59
3.4.2. Conditions aux limites	59
3.5. Forces et couples exercés sur un milieu aimanté.....	60
3.5.1. Energie potentielle magnétique d'un aimant "rigide" et forces associées.....	60
3.5.2. Cas d'un matériau dont l'aimantation dépend du champ extérieur	61
3.5.3. Importance des forces et des couples magnétiques en construction électrique	62
3.5.4. Sur la formulation des forces magnétiques en fonction des champs \mathbf{B} et \mathbf{H}	63
3.6. Cas particulier : champ magnétique d'un ellipsoïde uniformément aimanté.....	65
3.6.1. Généralités	65
3.6.2. Principe de calcul du champ \mathbf{H}'	65
3.6.3. Cas d'une sphère de rayon R, uniformément aimantée	66
3.6.4. Résultats généraux.....	67
3.6.5. Importance pratique des effets de forme sur l'aimantation des matériaux magnétiques doux.....	69
3.7. Conclusions.....	71

Chapitre 4 . Physique du magnétisme à l'échelle atomique.....	73
4.1. Un modèle historique : l'atome de Bohr	73
4.2. Une autre source de moment magnétique : le "spin"	75
4.3. Le moment magnétique d'un atome ou d'un ion isolé	75
4.3.1. L'édifice atomique.....	75
4.3.2. Le moment magnétique d'une couche pleine.....	77
4.3.3. Couche électronique incomplète.....	77
4.3.4. Résultat pratique.....	78
4.4. Le paramagnétisme ou les effets d'un champ magnétique appliqué à une population de moments indépendants.....	79
4.5. L'échange	82
4.5.1. Introduction.....	82
4.5.2. Exemples simples de structures ordonnées	82
4.5.3. La nature de l'énergie d'échange.....	83
4.5.4. Etude du comportement ferromagnétique d'un système de moments, dans l'approximation du champ moléculaire	84
4.5.5. Comparaison avec l'expérience	86
4.5.6. Comportements antiferro et ferrimagnétiques dans l'approximation du champ moléculaire.....	89
4.6. Les métaux magnétiques.....	90
4.6.1. Structure électronique des métaux.....	90
4.6.2. Origine du moment magnétique dans la théorie des bandes	91
4.6.3. Courbe de Slater-Pauling. Résultats expérimentaux	93
4.6.4. Cas particulier des métaux de terres rares	95
4.6.5. Synthèse des résultats établis précédemment.....	95
4.7. L'énergie d'anisotropie magnétocristalline	96
4.7.1. Un fait d'expérience.....	96
4.7.2. Expression phénoménologique de l'énergie d'anisotropie	97
4.7.2.1. Cas d'un cristal cubique	97
4.7.2.2. Cristaux de basse symétrie	98
4.7.3. Mesure des constantes d'anisotropie.....	98
4.7.4. Intérêt technologique et ordre de grandeur de l'anisotropie.....	101
4.7.5. Origine physique et variations thermiques de l'anisotropie.....	102
4.8. La magnétostriction et l'énergie magnétoélastique.....	102
4.8.1. De quoi s'agit-il ?	102
4.8.2. Magnétostriction linéaire spontanée des cristaux "cubiques"	103
4.8.3. Magnétostriction spontanée des cristaux de basse symétrie.....	106
4.8.4. Effet d'une contrainte sur l'aimantation d'un ferromagnétique cubique.....	106
4.9. Conclusions.....	107
Chapitre 5. Physique du magnétisme à une échelle mésoscopique : domaines de Weiss et parois de Bloch.....	109
5.1. Les domaines élémentaires de Weiss	109
5.1.1. En quoi consistent-ils ?.....	109
5.1.2. Rappel : l'énergie magnétostatique d'un système de moments	110

5.1.3. Modèles pour l'arrangement des moments en domaines de Weiss dans un monocristal ferromagnétique	113
5.2. Quelques caractères particuliers de la structure en domaines.....	114
5.2.1. Orientations de l'aimantation dans les domaines.....	114
5.2.2. Orientations privilégiées des parois entre les domaines.....	114
5.2.3. Importance des conditions aux limites.....	115
5.2.4. Domaines principaux et domaines de fermeture.....	116
5.3. Les parois de Bloch.....	118
5.3.1. Pourquoi existe-t-il des régions de transition, qu'on appelle des parois ?	118
5.3.2. Structure d'équilibre et énergie d'une paroi de Bloch	119
5.3.3. Application à une paroi à 180° dans un cristal uniaxe.....	121
5.3.4. Paroi plane à 180° dans un cristal cubique (cas du fer)	122
5.3.5. Autres types de parois.....	124
5.4. Généralités sur les techniques d'observation des domaines.....	124
5.4.1. La méthode des poudres de Bitter.....	125
5.4.2. Les méthodes magnéto-optiques.....	125
5.4.3. Les autres méthodes	126
5.5. Mobilité des parois.....	126
5.5.1. Déplacement d'une paroi de Bloch rigide.....	126
5.5.2. Qu'est-ce qui limite les déplacements de parois ?.....	128
5.5.3. Couplage entre parois et défauts du cristal.....	129
5.6. Conclusions.....	130
Chapitre 6. Magnétisme à l'échelle macroscopique, processus et lois d'aimantation.....	131
6.1. L'aimantation technique à l'échelle macroscopique	131
6.1.1. Rappel concernant la définition de la polarisation magnétique.....	131
6.1.2. L'état désaimanté	132
6.1.3. La courbe de première aimantation	133
6.1.3.1. Le domaine de l'aimantation initiale ou des champs faibles ($J/J_s < 0,1$, $H \ll H_c$).....	134
6.1.3.2. Les champs forts ($J/J_s > 0,9$).....	134
6.1.3.3. Les champs intermédiaires.....	135
6.2. L'hystérésis.....	135
6.2.1. Quelques définitions	135
6.2.2. Exemples de modèles pour rendre compte de l'hystérésis.....	137
6.2.3. Cas des matériaux magnétiques usuels	139
6.3. Aimantation en présence de contraintes.....	140
6.3.1. Rappel de résultats expérimentaux.....	140
6.3.2. Un modèle historique particulièrement simple	144
6.3.3. Aspects microscopiques	145
6.3.4. Recommandations pratiques.....	146
6.4. Aimantation en présence d'inclusions non magnétiques (ou faiblement magnétiques).....	146
6.4.1. Généralités	146
6.4.2. Modèle historique simple de Kersten.....	148
6.4.3. Contribution de Néel et conclusion	151

6.5. Aimantation en champs faibles. Lois de Rayleigh et modèle de Preisach	152
6.5.1. Énoncé des lois de Rayleigh (1887).....	152
6.5.2. Le modèle historique de Preisach (1935).....	153
6.5.3. Interprétation de Néel (1942).....	155
6.5.4. Les extensions récentes du modèle de Preisach.....	157
6.6. L'approche à la saturation	157
6.6.1. Point de vue du physicien.....	157
6.6.2. Point de vue du technicien en génie électrique.....	159
6.7. L'aimantation anhystérétique	161
6.7.1. Retour sur les mécanismes d'aimantation réversible et irréversible.	161
6.7.2. A quoi ressemble la courbe d'aimantation anhystérétique ?	162
6.7.3. Détermination directe de la courbe d'aimantation anhystérétique.....	163
6.8. Conclusions.....	164
Chapitre 7. Aimantation des matériaux doux en régime dynamique.....	165
7.1. Comportement d'un matériau linéaire, en forme de tôle, soumis à un champ d'excitation sinusoïdal.....	165
7.1.1. Mise en équation et solution du problème.....	166
7.1.2. Discussion	167
7.2. Les pertes totales dans les tôles.....	169
7.2.1. Expression générale des pertes d'énergie.....	169
7.2.2. Les pertes "classiques" par courants induits dans une tôle.....	173
7.2.3. Discussion	173
7.3. Variation des pertes totales avec la fréquence.....	174
7.3.1. Résultats expérimentaux	174
7.3.2. Une subdivision classique : la séparation des pertes	175
7.4. L'accroissement des pertes par courants induits, consécutif à l'existence des domaines	178
7.4.1. Principe.....	178
7.4.1.1. Modèle "classique" et \mathbf{B} uniforme.....	178
7.4.1.2. Modèle comportant deux domaines.....	179
7.4.2. Dynamique d'une paroi isolée.....	180
7.4.3. Le modèle de Pry et Bean (1958).....	183
7.4.4. Les critiques adressées au modèle de Pry et Bean et les modèles suivants.....	185
7.5. La théorie unifiée de G. Bertotti (1984)	186
7.6. Comportement dynamique d'un circuit bi-dimensionnel	187
7.6.1. Nécessité d'une représentation bidimensionnelle	187
7.6.2. Exemple : aimantation statique d'une tôle G.O.	188
7.6.3. Expression des pertes volumiques en milieu bidimensionnel	189
7.6.4. Caractères spécifiques aux pertes en champs tournants.....	190
7.7. Conclusions.....	192

Chapitre 8. La mesure des caractéristiques magnétiques des matériaux

doux	193
8.1. Circuit magnétique fermé.....	193
8.1.1. Exemple de champ démagnétisant	193
8.1.2. Le tore : un circuit fermé privilégié.....	194
8.1.3. Le cadre Epstein	196
8.1.4. Le cadre à bande unique.....	198
8.1.5. Cadre à bande unique pour mesures bi-dimensionnelles.....	199
8.2. Contrôle de la forme d'onde B(t) ou H(t)	200
8.2.1. Généralités	200
8.2.2. Technique simple permettant d'exciter un circuit en régime sinusoïdal.....	200
8.2.3. Utilisation d'une alimentation électronique asservie	202
8.3. Techniques particulières de mesure.....	203
8.3.1. Mesure du flux d'induction embrassé par un bobinage	203
8.3.2. Mutuelle-inductance de compensation du flux dans l'air	203
8.3.3. Mesure de \bar{B} (T) dans une tôle, par la technique des pointes.....	204
8.3.4. Détermination du champ magnétique d'excitation superficielle $H_s(t)$..	205
8.3.5. Mesure d'une valeur crête en fonctionnement dynamique.....	205
8.3.6. Mesure directe des pertes spécifiques par la méthode du Wattmètre.	206
8.3.7. Détermination de la puissance apparente spécifique.....	207
8.4. Conclusions.....	209
 Chapitre 9. Le fer et les aciers peu alliés	 211
9.1. Le fer pur : un élément exceptionnel.....	211
9.2. Fer pur technique ou acier extra-doux pour applications statiques.....	212
9.2.1. Le fer pur n'existe pas.....	212
9.2.2. L'acier doux pour les applications statiques.....	213
9.3. Les aciers forgés utilisés pour fabriquer les rotors des grosses machines synchrones.....	214
9.4. Le rôle des éléments d'alliage dans les aciers.....	215
9.4.1. Historique	215
9.4.2. Un modèle particulièrement simple : les moments localisés.....	215
9.4.3. Avantages et inconvénients des alliages fer-silicium, aluminium.....	217
9.5. Les tôles en fer et fer-silicium à grains non orientés.....	218
9.5.1. Utilisations	218
9.5.2. Les différentes catégories de tôles non orientées	218
9.5.3. Principes de fabrication.....	220
9.5.4. Caractéristiques magnétiques obtenues	220
9.6. Les tôles destinées à la construction des moteurs et des petits circuits.....	223
9.6.1. Moteurs et circuits de petite taille	223
9.6.2. Les machines électriques de taille moyenne.....	224
9.6.3. Les très grosses machines.....	225
9.7. Les tôles fer-silicium à grains orientés	226

9.7.1. Caractères généraux.....	226
9.7.2. Historique	226
9.7.3. Méthodes de fabrication.....	227
9.7.4. L'isolation des tôles à grains orientés.....	230
9.7.5. Un autre perfectionnement récent : le "scratching"	230
9.7.6. Caractéristiques des tôles commercialisées	232
9.8. Généralités sur la construction des noyaux de transformateurs en tôles à grains orientés.....	234
9.8.1. Circuits enroulés et circuits empilés.....	234
9.8.2. Intérêt des joints à recouvrements.....	235
9.8.3. Le facteur de construction (<i>Building factor</i>)	236
9.8.4. Le bruit des transformateurs triphasés en fonctionnement.....	239
9.9. Les tôles fer-silicium minces pour applications à moyenne fréquence	240
9.9.1. Utilisations	240
9.9.2. Les tôles minces en fer-silicium 3 % à grains orientés	241
9.9.3. Les tôles en fer-silicium non orientées.....	242
Chapitre 10. Les aciers magnétiques fer-nickel et fer-cobalt.....	243
10.1. Propriétés fondamentales des alliages fer-nickel	243
10.1.1. Composition des aciers magnétiques.....	243
10.1.2. Propriétés électromagnétiques.....	244
10.2. Les alliages fer-nickel 20-80 à très hautes perméabilités	245
10.2.1. Principes de la fabrication	246
10.2.2. Propriétés magnétiques et utilisation.....	247
10.3. Les autres alliages fer-nickel.....	247
10.3.1. Alliages à cycle d'hystérésis rectangulaire.....	247
10.3.2. Alliages à cycle d'hystérésis couché	248
10.3.3. Alliages FeNi 50-50 isotropes	249
10.3.4. Les alliages à 30 % de nickel pour compensation thermique	249
10.4. Les alliages fer-cobalt.....	250
10.4.1. Caractères généraux	250
10.4.2. L'alliage fer-cobalt 50-50.....	251
10.4.3. Les autres alliages doux FeCo	251
Chapitre 11. Les alliages amorphes pour l'électrotechnique	253
11.1. Fabrication des alliages magnétiques amorphes.....	253
11.1.1. Principe de la fabrication	253
11.1.2. Réalisation pratique.....	254
11.2. Structure et stabilité de l'état amorphe	255
11.2.1. Composition et aptitude à la vitrification.....	255
11.2.2. Structure atomique et densité.....	255
11.2.3. Recristallisation et traitements thermiques	256
11.2.4. Stabilité	256
11.3. Propriétés mécaniques et propriétés de surface	256
11.3.1. Propriétés mécaniques	256
11.3.2. Résistance à la corrosion	257

11.4. Propriétés électromagnétiques	257
11.4.1. Conductibilité électrique	257
11.4.2. Ferromagnétisme	257
11.4.3. Anisotropie, magnétostriction	258
11.4.4. Domaines et processus d'aimantation	259
11.5. Les applications des amorphes en construction électrique.....	260
11.5.1. La construction de machines fonctionnant aux fréquences industrielles	260
11.5.2. Utilisations aux moyennes fréquences	261
11.5.3. Utilisations spéciales	262
11.6. Sur la compétition Metglas 2605 S2 - fer silicium G.O. pour la construction des transformateurs de puissance.....	262
11.7. Les alliages nanocristallins.....	264
Chapitre 12. Les ferrites spinelles.....	267
12.1. Structure cristallographique et magnétique.....	267
12.2. Propriétés électromagnétiques	268
12.2.1. Aimantation à saturation et température de Curie.....	268
12.2.2. Anisotropie magnétocristalline et magnétostriction.....	269
12.2.3. Résistivité électrique.....	270
12.3. Principes de la fabrication des ferrites.....	270
12.3.1. La fabrication du ferrite spinelle proprement dit.....	270
12.3.2. Le broyage.....	271
12.3.3. Le pressage	271
12.3.4. Le frittage.....	271
12.3.5. En complément	271
12.4. Caractéristiques magnétiques et applications des ferrites aux basses fréquences.....	272
12.4.1. Comportement linéarisé en champs faibles.....	272
12.4.2. Fonctionnement non linéaire à flux important	273
Chapitre 13. Les aimants : circuits magnétiques et matériaux.....	277
13.1. Notion de circuit magnétique à aimant.....	277
13.1.1. Principe de fonctionnement.....	277
13.1.2. Cycles d'hystérésis	278
13.1.3. Circuit magnétique.....	279
13.2. Analogie entre circuit électrique et circuit magnétique	280
13.2.1. Principe et bases de l'analogie.....	280
13.2.2. Exemple d'application à un circuit magnétique élémentaire.....	281
13.2.3. Les limites de cette analogie.....	283
13.3. Energie maximale stockée en dehors de l'aimant	283
13.4. Etude sommaire d'un circuit fonctionnant en régime statique.....	285
13.4.1. Configuration générale et notations	285
13.4.2. Evaluation du champ magnétique dans l'entrefer	286
13.5. Conditions d'optimisation d'un circuit lentement déformable	287
13.5.1. Conditions de fonctionnement de l'aimant.....	287

13.5.2. Force exercée sur l'armature mobile	288
13.5.3. Energie potentielle du système.....	289
13.6. Circuit à aimants soumis à une excitation variable.....	290
13.6.1. Détermination du point de fonctionnement de l'aimant.....	291
13.6.2. Champ démagnétisant exceptionnel. Notion de champ de rigidité limite	293
13.7. Mécanismes de la coercivité dans les aimants	294
13.7.1. Les impuretés, précipités et défauts de réseau.....	294
13.7.2. Coercivité de grains fins monodomains.....	294
13.7.3. Nucléation et accrochage des parois.....	295
13.7.4. Conclusion : quelles conditions faut-il réunir pour obtenir un bon aimant ?	297
13.8. Les aimants métalliques de type alnico	297
13.8.1. Historique.....	297
13.8.2. Compositions et origine de la coercivité.....	298
13.8.3. Fabrication et propriétés des aimants alnico coulés	399
13.8.4. Les aimants alnico frittés.....	300
13.9. Les aimants en ferrites durs	300
13.9.1. Historique.....	300
13.9.2. Composition chimique et propriétés magnétiques.....	300
13.9.3. Fabrication des aimants ferrites.....	302
13.9.4. Caractéristiques mécaniques et magnétiques.....	302
13.9.5. Les aimants ferrites flexibles ou moulés.....	303
13.10. Les aimants à base de terres rares	304
13.10.1. Quelques rappels sur la chimie des terres rares.....	304
13.10.2. Les aimants SmCo ₅ , ou la première génération des aimants terres rares	305
13.10.3. Les aimants de type Sm ₂ Co ₁₇	307
13.10.4. Les aimants à base de néodyme	309
13.10.5. L'autre filière de fabrication d'aimants au néodyme	310
13.10.6. L'évolution des aimants à base de terres rares	311
13.11. Aimantation, désaimantation et vieillissement des aimants	311
13.11.1. Aimantation.....	311
13.11.2. Désaimantation.....	312
13.11.3. Vieillissement	312
13.12. Détermination de la courbe de désaimantation d'un matériau pour aimants.....	312
13.12.1. Mesures en circuit magnétique fermé.....	313
13.12.2. Mesures en circuit magnétique ouvert.....	314
13.13. Conclusions	314
Bibliographie	315