

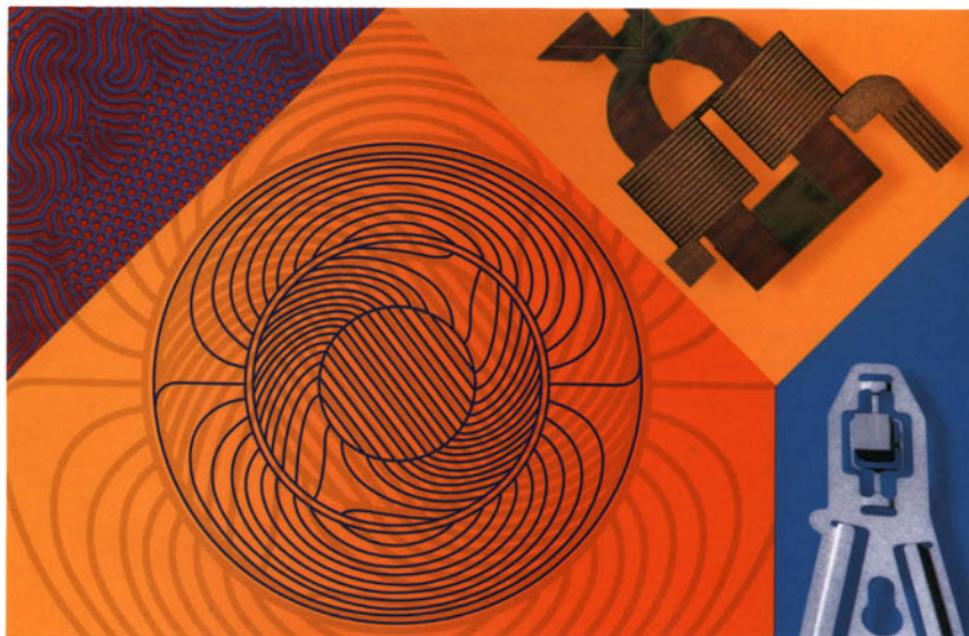
MAGNÉTISME

II - MATÉRIAUX ET APPLICATIONS

OUVRAGE PUBLIÉ AVEC LE CONCOURS DU MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE,
DE LA RECHERCHE ET DE LA TECHNOLOGIE

 Sous la direction d'**Étienne du TRÉMOLET de LACHEISSERIE**
Laboratoire Louis Néel, Grenoble

Préface du Professeur **Louis NÉEL**, Prix Nobel de physique



MAGNÉTISME
II – MATÉRIAUX ET APPLICATIONS

Grenoble Sciences reçoit le soutien :

du **Ministère de l'Éducation nationale, de la Recherche et de la Technologie**
de la **Région Rhône-Alpes**
du **Conseil général de l'Isère**
de la **Ville de Grenoble**

Cet ouvrage a bénéficié de la contribution des entreprises suivantes :

Tél : 33 1 41 25 55 88

Fax : 33 1 41 25 56 88



Tél : 33 4 76 90 50 45

Email : cedrat@cedrat.com



Logiciels de CAO (FLUX2D/3D)

Actionneurs, capteurs

Etudes, mesures, formations en électrotechnique

Illustrations de la page de couverture (de gauche à droite) :
en haut, bulles magnétiques (Laboratoire Louis Néel) ; en bas, source 4 teslas
(Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble) ; en haut, tête inductive pour
l'enregistrement hélicoïdal sur bande (d'après document LETI-ARTECHNIQUE) ;
en bas, picoslider contenant une tête magnétique planaire montée sur une
suspension intégrée (d'après document LETI-ARTECHNIQUE).

Réalisation et mise en pages, Centre technique Grenoble Sciences

ISBN 2.86883.464.7

© EDP Sciences, 2000

MAGNÉTISME

II – MATÉRIAUX ET APPLICATIONS

Michel CYROT - Michel DÉCORPS - Bernard DIENY
Olivier GEOFFROY - Damien GIGNOUX
Claudine LACROIX - Jean LAFOREST
Philippe LETHUILLIER - Pierre MOLHO
Jean-Claude PEUZIN - Jacques PIERRE
Jean-Louis PORTESEIL - Pierre ROCHETTE
Michel-François ROSSIGNOL - Michel SCHLENKER
Christoph SEGEBARTH - Yves SOUCHE
Etienne du TRÉMOLET de LACHEISSERIE
Jean-Paul YONNET



7, avenue du Hoggar
Parc d'Activité de Courtabœuf, BP 112
91944 Les Ulis Cedex A, France

Grenoble Sciences

Grenoble Sciences fut créé avec le triple objectif de :

- réaliser des ouvrages correspondant à un projet clairement défini, sans contrainte de mode ou de programme,
- garantir les qualités scientifique et pédagogique,
- proposer des ouvrages à un prix accessible au public le plus large possible.

Chaque projet est sélectionné au niveau de la direction de Grenoble Sciences, puis par un collège de referees anonymes. Ensuite, les auteurs travaillent pendant une année (en moyenne) avec les membres d'un comité de lecture interactif dont les noms apparaissent au début de l'ouvrage.

Directeur scientifique de Grenoble Sciences

Jean BORNAREL, Professeur à l'Université Joseph Fourier - Grenoble 1

Comité de lecture des ouvrages Magnétisme :

- ◆ **V. Archambault**, Ingénieur à Rhodia-Recherche, Aubervilliers
- ◆ **E. Burzo**, Professeur à l'Université de Cluj, Roumanie
- ◆ **I. Campbell**, Directeur de Recherches au CNRS, Orsay
- ◆ **F. Claeysen**, Ingénieur à CEDRAT, Grenoble
- ◆ **G. Couderchon**, Ingénieur à Imphy Ugine Précision, Imphy
- ◆ **J.M.D. Coey**, Professeur à Trinity College, Dublin, Irlande
- ◆ **A. Fert**, Professeur à l'INSA, Toulouse
- ◆ **D. Givord**, Directeur du Laboratoire Louis Néel au CNRS, Grenoble
- ◆ **L. Néel**, Professeur honoraire des Universités,
Prix Nobel de Physique, Membre de l'Institut
- ◆ **B. Raquet**, Maître de conférences à l'INSA, Toulouse
- ◆ **A. Rudi**, Ingénieur à ECIA, Audincourt
- ◆ **Ph. Tenaud**, Ingénieur à UGIMAG, St. Pierre d'Allevard

AUTEURS

Michel CYROT

Professeur à l'Université Joseph Fourier - Grenoble

Michel DÉCORPS

Directeur de Recherche à l'INSERM, Directeur de l'unité 438 INSERM - Grenoble

Bernard DIENY

Ingénieur au CEA - Grenoble

Olivier GEOFFROY

Maître de Conférences à l'Université Joseph Fourier - Grenoble

Damien GIGNOUX

Professeur à l'Université Joseph Fourier - Grenoble

Claudine LACROIX

Directeur de Recherche au CNRS - Grenoble

Jean LAFOREST

Ingénieur de Recherche au CNRS - Grenoble

Philippe LETHUILLIER

Ingénieur à l'Université Joseph Fourier - Grenoble

Pierre MOLHO

Chargé de Recherche au CNRS - Grenoble

Jean-Claude PEUZIN

Directeur de Recherche au CNRS - Grenoble

Jacques PIERRE

Directeur de Recherche au CNRS - Grenoble

Jean-Louis PORTESEIL

Professeur à l'Université Joseph Fourier - Grenoble

Pierre ROCHETTE

Professeur à l'Université d'Aix-Marseille 3

Michel-François ROSSIGNOL

Professeur à l'Institut National Polytechnique - Grenoble

Michel SCHLENKER

Professeur à l'Institut National Polytechnique - Grenoble

Christoph SEGEBARTH

Directeur de Recherche à l'unité 438 INSERM - Grenoble

Yves SOUCHE

Ingénieur de Recherche au CNRS - Grenoble

Etienne du TRÉMOLET de LACHEISSERIE

Directeur de Recherche au CNRS - Grenoble

Jean-Paul YONNET

Directeur de Recherche au CNRS - Grenoble

Ouvrages Grenoble Sciences édités par EDP Sciences

Collection Grenoble Sciences

- Chimie. Le minimum vital à savoir - J. Le Coarer
Minimum Competence in Scientific English - J. Upjohn, S. Blattes & V. Jans
Introduction à la Mécanique statistique - E. Belorizky & W. Gorecki
Exercices corrigés d'Analyse (tomes 1 et 2) - D. Alibert
Bactéries et environnement. Adaptations physiologiques - J. Pelmont
La plongée sous-marine à l'air. L'adaptation de l'organisme et ses limites - Ph. Foster
Listening Comprehension for Scientific English - J. Upjohn
Electrochimie des solides - C. Déportes *et al.*
La Turbulence - M. Lesieur
Mécanique statistique. Exercices et problèmes corrigés - E. Belorizky & W. Gorecki
La symétrie en mathématiques, physique et chimie - J. Sivardière
La cavitation. Mécanismes physiques et aspects industriels - J.P. Franc *et al.*
L'Asie, source de sciences et de techniques - M. Soutif
Enzymes. Catalyseurs du monde vivant - J. Pelmont
L'ergomotricité. Le corps, le travail et la santé - M. Gendrier
Introduction aux variétés différentielles - J. Lafontaine
Analyse numérique et équations différentielles - J.P. Demailly
Speaking Skills in Scientific English - J. Upjohn, M.H. Fries & D. Amadis
Thermodynamique chimique - M. Oturan & M. Robert
Mathématiques pour les sciences de la vie, de la nature et de la santé - F. & J.P. Bertrandias
Probabilités et incertitudes dans l'analyse des données expérimentales - K. Protassov
Approximation hilbertienne. Splines, ondelettes, fractales - M. Attéia & J. Gaches
Du Soleil à la Terre. Aéronomie et météorologie de l'espace - J. Liliensten & P.L. Blelly
Endocrinologie et communications cellulaires - S. Idelman & J. Verdetti
Chimie organométallique - D. Astruc
Mathématiques pour l'étudiant scientifique (tomes 1 et 2) - Ph.J. Haug

Grenoble Sciences - Rencontres Scientifiques

- Radiopharmaceutiques. Chimie des radiotraceurs et applications biologiques
sous la direction de M. Comet & M. Vidal
Turbulence et déterminisme - sous la direction de M. Lesieur
Méthodes et techniques de la chimie organique - sous la direction de D. Astruc

AVANT-PROPOS

Cet ouvrage a été écrit à l'intention des étudiants et des praticiens du magnétisme. Sa première édition présente la particularité d'être publié en *langue française* (une deuxième édition en langue anglaise est déjà prévue). Les derniers livres écrits en français et faisant autorité en magnétisme sont les ouvrages de A. HERPIN et de E. DURAND datant déjà de 1968, ainsi que l'excellent traité de P. BRISSONNEAU, publié en 1997 : ce dernier est toutefois limité aux seuls aspects de l'électrotechnique.

Dans une approche plus encyclopédique, la majeure partie des aspects fondamentaux et surtout appliqués du magnétisme sont ici traités en deux tomes d'égale importance : c'est ainsi que l'on y trouve des sujets rarement abordés dans les manuels et pourtant essentiels aujourd'hui en raison de leurs applications présentes ou à venir, tels que par exemple la magnéto-optique, les matériaux ferrofluides, ou encore le biomagnétisme.

Un index de mots clés permet au lecteur de retrouver rapidement une introduction aux différents termes introduits et, le cas échéant, quelques références bibliographiques qui lui permettront d'approfondir telle ou telle notion qui ne serait pas développée ici.

Les notations utilisées se conforment à la nomenclature établie par la Norme Française NF X 02-205 et aux recommandations de la Commission Internationale Electrotechnique ; une table de conversion d'unités est fournie en annexe.

Les réactions et suggestions des lecteurs seront les bienvenues, car elles permettront d'améliorer au fil des années cet ouvrage pour le plus grand bénéfice de tous. A cet effet, une page interactive a été créée sur le site Web du Laboratoire Louis Néel :

<http://ln-w3.polycnrs-gre.fr/book.html>

REMERCIEMENTS

Monsieur le Professeur Louis NÉEL, Prix Nobel de Physique, membre de l'Institut, a réservé un excellent accueil à cet ouvrage ; qu'il soit ici remercié d'avoir bien voulu en écrire la préface.

Les auteurs ont apprécié les critiques pertinentes et constructives des membres du Comité de Lecture, et tiennent à leur exprimer toute leur gratitude.

Cet ouvrage représente une œuvre collective, souhaitée et menée à bien principalement par l'ensemble des membres du laboratoire Louis Néel du CNRS-Grenoble, avec l'appui enthousiaste de son directeur, D. GIVORD, et de quelques anciens :

- ◆ à toutes celles et tous ceux qui ont contribué au travail de réflexion et d'illustration de cet ouvrage, Messieurs R. BALLOU, B. CANALS, J. CLEDIERE, O. CUGAT et W. WERNSDORFER,
 - ◆ ou apporté leur concours à la relecture des épreuves des différents chapitres, Mesdames R.M. GALERA, Cl. MEYER et Messieurs A. FONTAINE, P.O. JUBERT, K. MACKAY, P. MOLLARD, J.P. REBOUILLAT, D. SCHMITT, J. VOIRON,
- les auteurs sont heureux d'exprimer leur reconnaissance.

Ils voudraient enfin remercier Mesdames Zhang FENG-YUN pour sa traduction d'un document écrit en chinois et J. TROCCAZ (Institut Albert Bonniot-Grenoble) pour ses conseils en biomagnétisme, Messieurs M. HASSLER (S.I.C.N.-Veurey), D. FRUCHART et P. WOLFERS (Laboratoire de Cristallographie, CNRS-Grenoble) qui ont fourni des illustrations, P. AVERBUCH (CRTBT) pour sa relecture critique et avisée de l'annexe traitant des aspects économiques des matériaux magnétiques et toute l'équipe de GRENOBLE-SCIENCES pour son efficacité, sa compétence et sa bonne humeur.

SOMMAIRE

I - FONDEMENTS

Avant propos

Préface par le professeur *Louis Néel*

Approche phénoménologique du magnétisme

- 1 Le magnétisme, des origines à nos jours - *E. du Trémolet de Lacheisserie*
- 2 Magnétostatique - *D. Gignoux, J.C. Peuzin*
- 3 Phénoménologie du magnétisme à l'échelle macroscopique - *D. Gignoux*
- 4 Phénoménologie du magnétisme à l'échelle microscopique - *D. Gignoux*
- 5 Ferromagnétisme d'un système idéal - *M. Rossignol, M. Schlenker*
- 6 Irréversibilité des processus d'aimantation et hystérésis dans les matériaux ferromagnétiques réels : le rôle des défauts - *M. Rossignol*

Approche théorique du magnétisme

- 7 Magnétisme dans le modèle des électrons localisés - *D. Gignoux*
- 8 Magnétisme dans le modèle des électrons itinérants - *M. Cyrot*
- 9 Les interactions d'échange - *C. Lacroix, M. Cyrot*
- 10 Approche thermodynamique du magnétisme - *M. Schlenker, E. du T. de Lacheisserie*

Phénomènes de couplage

- 11 Couplage magnétocalorique et effets associés - *E. du Trémolet de Lacheisserie, M. Schlenker*
- 12 Les effets magnétoélastiques - *E. du Trémolet de Lacheisserie*
- 13 Les effets magnéto-optiques - *M. Schlenker, Y. Souche*
- 14 Résistivité magnétique, magnéto-résistance, effet Hall - *J. Pierre*

Annexes

- 1 Symboles utilisés dans le texte
- 2 Unités et constantes universelles
- 3 Tableau périodique des éléments
- 4 Susceptibilités magnétiques
- 5 Matériaux ferromagnétiques
- 6 Fonctions spéciales
- 7 Equations de Maxwell

Bibliographie générale

Index des matériaux et des sujets

II - MATÉRIAUX ET APPLICATIONS

Avant propos

Préface par le professeur *Louis Néel*

Les matériaux magnétiques et leurs applications

15 Les aimants permanents - *M. Rossignol, J.P. Yonnet*

16 Les matériaux doux pour l'électrotechnique et l'électronique basse fréquence
O. Geoffroy, J.L. Porteseil

17 Les matériaux doux pour l'électronique haute fréquence - *J.C. Peuzin*

18 Les matériaux magnétostrictifs - *E. du Trémolet de Lacheisserie*

19 La supraconductivité - *M. Cyrot*

20 Couches minces et multicouches magnétiques - *B. Dieny*

21 Les principes de l'enregistrement magnétique - *J.C. Peuzin*

22 Ferrofluides - *P. Molho*

Autres aspects du magnétisme

23 Imagerie par résonance magnétique - *M. Décorps, C. Segebarth*

24 Magnétisme des matériaux terrestres et géomagnétisme - *P. Rochette*

25 Magnétisme et sciences de la vie - *E. du Trémolet de Lacheisserie, P. Rochette*

26 Magnétisme pratique et instrumentation - *Ph. Lethuillier*

Annexes

1 Symboles utilisés dans le texte

2 Unités et constantes universelles

3 Tableau périodique des éléments

4 Susceptibilités magnétiques

5 Matériaux ferromagnétiques

6 Aspects économiques des matériaux magnétiques - *J. Laforest*

Bibliographie générale

Index des matériaux et des sujets

PRÉFACE

Depuis des millénaires avant notre ère, où nos ancêtres avaient déjà reconnu les singulières propriétés de la magnétite, ou pierre d'aimant, les phénomènes magnétiques ont toujours retenu l'attention, notamment en raison de leur action à distance. Qu'il s'agisse de notre existence quotidienne, on les retrouve partout depuis la fermeture des portes d'armoire ou de réfrigérateurs, dans les voitures et les téléphones portables jusqu'aux suspensions des trains à grande vitesse. Qu'il s'agisse aussi de science pure, ils sont présents à toutes les échelles de dimension, depuis les particules élémentaires jusqu'aux amas de galaxies, en passant par la structure et l'histoire de notre Terre.

Dans la plupart de ces domaines, fondamentaux ou technologiques, des progrès considérables ont été enregistrés depuis une trentaine d'années. L'ouvrage présenté ici se propose de les exposer. C'est l'oeuvre collective d'enseignants et de chercheurs qualifiés travaillant essentiellement dans les laboratoires de Grenoble (Universités, C.N.R.S, C.E.A.) souvent en étroite collaboration avec l'industrie locale et les grands organismes internationaux implantés dans la région, Institut Laue-Langevin, E. S. R. F. (grand synchrotron européen), etc. : cela n'a rien d'étonnant, d'ailleurs, car les activités concernant le Magnétisme ont toujours été soutenues à Grenoble depuis le commencement de ce siècle.

Cet ouvrage est accessible au niveau Bac scientifique + 4, à l'exception de quelques développements qui exigent un peu plus de maturité mais dont la maîtrise n'est pas nécessaire pour la compréhension de la suite. Ce traité me paraît indispensable à tous ceux qui se proposent de travailler dans le magnétisme, domaine encore très ouvert et riche de grands progrès potentiels.

On trouvera certainement de nouveaux aimants, plus performants et meilleur marché. Les propriétés magnétiques des matériaux contenant des éléments à couches électroniques incomplètes ne sont pas encore très bien comprises. L'hystérésis magnétique joue un rôle clé dans les phénomènes irréversibles, et, si on comprend assez bien ce qui se passe dans les champs magnétiques faibles vis-à-vis du champ coercitif, ou dans les champs très forts, au voisinage de la saturation, on ne sait pas très bien décrire ce qui se passe à l'intérieur du cycle limite. *A fortiori*, lorsque l'hystérésis dépend de l'action combinée de deux variables, comme celle du champ magnétique et de très hautes pressions, nous ne savons rien. Comment, par exemple, prédire l'état magnétique d'un sous-marin à grande profondeur, en fonction du processus de plongée ?

Avec Pierre Curie, Paul Langevin et Pierre Weiss, les français ont joué un rôle de pionnier dans le magnétisme : ils trouveront certainement de dignes successeurs, notamment dans le biomagnétisme au sens large.

Cet ouvrage présente aussi des caractéristiques intéressantes : exercices avec leur corrigé, bibliographie heureusement limitée aux meilleurs articles et ouvrages, et annexes diverses, listes de symboles, fonctions spéciales, propriétés des différents matériaux, aspect économique des problèmes, sans compter le rappel indispensable des unités employées, que la double présentation coulombienne et ampérienne du magnétisme a compliqué à plaisir et rendu indigeste dans le passé.

Toutes les conditions me paraissent ainsi réunies pour satisfaire un large public, documenter les étudiants, les chercheurs et les ingénieurs, et remporter le grand succès que je souhaite à cet ouvrage.

A Meudon, le 27 Février 1999

Louis NÉEL

Prix Nobel de Physique, Membre de l'Institut

CHAPITRE 15

LES AIMANTS PERMANENTS

Les familles de matériaux à aimant ayant débouché sur une production industrielle notable ne sont pas nombreuses. Ce sont, par ordre chronologique d'apparition : les AlNiCo (fin des années 1930), les ferrites durs (dans les années 1950), la famille des aimants samarium-cobalt qui a donné naissance à deux groupes d'aimants différents, les SmCo₅ (fin des années 1960) et les Sm(CoFeCuZr)₇₋₈ souvent désignés comme "2-17" (fin des années 1970), et la famille des néodyme-fer-bore ou NdFeB (milieu des années 1980).

Pour les deux premières familles, seul est en cause le magnétisme d'éléments 3d (Fe et Co pour les AlNiCo, Fe³⁺ pour les ferrites durs), tandis que dans les dernières familles, le magnétisme 4f des éléments de terre rare Sm et Nd s'ajoute au magnétisme du fer et du cobalt.

A partir de la plupart de ces matériaux, deux types principaux d'aimants peuvent être produits : les aimants frittés (denses et orientés) qui sont les plus performants, et les aimants liés (poudre d'aimant injectée dans une matrice non magnétique, souvent polymère) de fabrication plus simple et de prix de revient plus faible, mais dont les performances magnétiques sont inférieures.

Dans la première partie de ce chapitre, nous traitons de l'utilisation des aimants, et des critères pouvant guider le choix de tel ou tel matériau ou type d'aimant - en fonction d'une utilisation particulière. Les principes de base de la mise en service d'un aimant et la paramétrisation de ses performances sont abordés au § 1 ; la différenciation entre aimant orienté et aimant isotrope fait l'objet du § 2 ; le § 3 fait le point sur les matériaux disponibles, tandis que le § 4 présente leurs différents domaines d'utilisation et passe en revue les principaux systèmes électromagnétiques et électromécaniques mettant en œuvre des aimants.

La seconde partie du chapitre est consacrée à la fabrication des aimants : principe des microstructures et procédés d'élaboration (§ 5), choix des composés et alliages de base (§ 6). Au § 7, nous ferons le point des connaissances sur les mécanismes de la coercitivité.

1. LA MISE EN ŒUVRE D'UN AIMANT

1.1. LES DEUX CYCLES D'HYSTÉRÉSIS DU MATÉRIAU : CYCLES EN AIMANTATION $M(H)$ ET EN INDUCTION $B(H)$

Un cycle en aimantation $M(H)$ typique d'un *matériau dur* (synonyme de matériau à aimant permanent) a été présenté à la figure 6.2-b. Il se caractérise par sa largeur qui traduit l'importance du champ coercitif. Sous condition de champ coercitif suffisant, un matériau dur emmagasine une certaine quantité d'énergie magnétique, fonction à la fois de la valeur de son aimantation rémanente et de la *rectangularité* de son cycle ; cette dernière propriété indique que l'aimantation soumise à un champ inverse varie peu avant de se renverser. Un autre type de cycle d'hystérésis peut être tracé, où le champ d'induction B régnant dans le matériau est porté en ordonnée à la place de l'aimantation M . Ce type de cycle, $B(H)$, se prête parfois mieux à la description des propriétés d'utilisation du matériau. Nous l'appelons *cycle en induction* ou *cycle B*. Il se déduit du *cycle en aimantation* par la relation classique (2.36) : $B = \mu_0 (H + M)$. Pour $H = 0$, on a : $B = \pm B_r$ (induction rémanente), et pour $B = 0$, $H = \pm H_C^B$ (champ coercitif de l'induction).

Au facteur μ_0 près, les cycles $M(H)$ et $B(H)$ diffèrent de la grandeur $\mu_0 H$. Leurs valeurs rémanentes coïncident, c'est-à-dire que : $\pm B_r = \pm \mu_0 M_r$. Au contraire, dès que le matériau considéré est suffisamment performant, la valeur du champ coercitif de l'induction, H_C^B , diffère de celle du champ coercitif de l'aimantation, notée H_C^M .

Remarque : Plutôt que $M(H)$ et $B(H)$, l'équation (2.36) incite à tracer $\mu_0 M$ ($\mu_0 H$) pour le cycle en aimantation et B ($\mu_0 H$) (cycle en induction). La même unité (le tesla) est alors utilisée sur les deux axes pour les deux types de cycle.

1.2. PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT D'UN AIMANT PERMANENT IDÉAL INSÉRÉ DANS UN SYSTÈME D'EXPLOITATION TYPE

Envisageons un matériau dur, d'aimantation rémanente M_r et de champ coercitif intrinsèque $H_C = H_C^M$, dont le cycle $M(H)$ ou mieux $\mu_0 M$ ($\mu_0 H$) aurait la forme idéale présentée sur la figure 15.1-a. Le cycle en induction qui s'en déduit, a la forme d'un parallélogramme incliné à 45° , coupant les axes aux points $\pm B_r$ et $\pm H_C^B$ (figure 15.1-b). Si le matériau idéal envisagé est suffisamment coercitif ($\mu_0 H_C^M > B_r$), on a : $|H_C^M| > |H_C^B|$, et la partie du cycle B située dans le second quadrant (entre les points B_r et H_C^B) se réduit à un segment de droite de pente égale à 1, dont l'équation est :

$$B = B_r + \mu_0 H \quad (15.1)$$

Cette portion du cycle – nommée *courbe de désaimantation* – est à la base des propriétés d'usage de l'aimant, et permet de définir son fonctionnement.

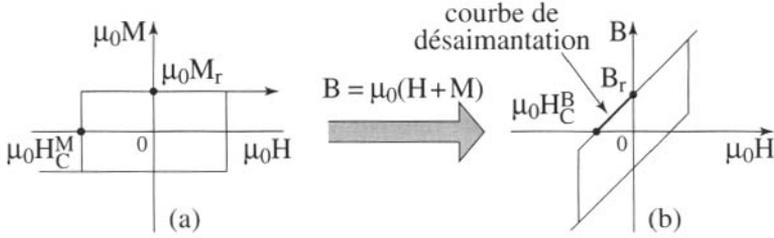


Figure 15.1 - Les deux cycles d'hystérésis d'un matériau dur idéal :
 (a) cycle en aimantation - (b) cycle en induction

1.2.1. Droite de charge et point de fonctionnement d'un aimant

La mise en service d'un aimant permanent se fait le plus souvent par l'intermédiaire d'un circuit magnétique (déjà envisagé dans un précédent chapitre : figure 2.22-b). Schématiquement un tel circuit est composé de deux parties :

- ♦ une partie, faite d'un matériau ferromagnétique doux (en général à base de fer), qui canalise le flux et que l'on nomme les *pièces polaires*,
- ♦ et une partie logée entre les pièces polaires, faite de vide, d'air, d'eau ou de toute autre substance non magnétique, qui constitue les *entrefers*.

L'entrefer principal est l'espace où est généré le flux utile. Les conditions dans lesquelles fonctionne l'aimant, placé au sein du circuit magnétique, sont définies par la géométrie et les dimensions du circuit, ainsi que par la géométrie et les dimensions de l'aimant lui-même.

Considérons un aimant idéal, placé dans un circuit magnétique simplifié tel que celui de la figure 15.2. La ligne de champ moyenne (notée Γ) se divise en trois parties. Sa longueur totale ℓ est : $\ell = \ell_a + \ell_f + \ell_e$, où ℓ_a est la longueur de l'aimant, ℓ_f , la longueur totale des pièces polaires et ℓ_e , la longueur de l'entrefer.

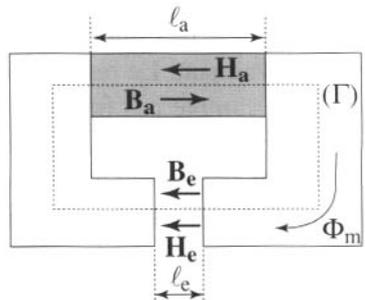


Figure 15.2
Circuit magnétique simplifié

En fonctionnement normal, l'aimant génère une induction magnétique, dont le flux Φ_m est canalisé par le circuit. L'intensité de Φ_m est constante le long de la boucle formée (loi de conservation du flux). Dans chacun des éléments du circuit, on peut écrire :

$$\begin{aligned} \Phi_m &= B_a S_a \text{ (dans l'aimant de section } S_a) \\ \Phi_m &= B_f S_f \text{ (dans les pièces polaires de section } S_f, \text{ supposée constante)} \\ \Phi_m &= B_e S_e \text{ (au sein de l'entrefer, de section } S_e). \end{aligned}$$

Par ailleurs, conformément au théorème d'Ampère, la circulation du champ \mathbf{H} est nulle le long de Γ , soit : $\oint_{(\Gamma)} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum (\text{ampères-tours}) = 0$, car la force magnéto-motrice ne provient que de l'aimant. En supposant que \mathbf{H} est constant au sein d'un élément donné, cela se traduit par : $H_a \ell_a + H_f \ell_f + H_e \ell_e = 0$.

Si le circuit magnétique est bien conçu, les pièces polaires ne sont pas saturées par le flux Φ_m (sinon il n'y aurait plus de canalisation du flux). B_f est donc inférieur à la valeur de saturation du matériau doux utilisé. Dans ces conditions, le matériau doux possède une très grande perméabilité relative μ_r (voir équation 2.52), qui permet de négliger le champ H_f , au sein des pièces polaires. On en déduit $H_a \ell_a + H_e \ell_e \approx 0$, où : $H_e \ell_e \approx -H_a \ell_a$.

Le signe $-$ révèle que le champ d'excitation est négatif dans l'aimant : c'est un champ démagnétisant (seule la partie $H \leq 0$ du cycle du matériau dur est utile).

Dans le cadre de ce circuit modèle, les équations de fonctionnement s'écrivent donc :

$B_a S_a = B_e S_e$ et $H_e \ell_e = -H_a \ell_a$. De plus, B et H dans l'entrefer sont reliés par : $B_e = \mu_0 H_e$. On en tire une relation linéaire entre l'induction et le champ dans l'aimant, qui s'écrit :

$$B_a = -\mu_0 H_a (S_e \ell_a / S_a \ell_e) \quad (15.2)$$

C'est l'équation de la *droite de charge*, dont la pente :

$$\text{tg} \alpha = B_a / \mu_0 H_a = -(S_e \ell_a / S_a \ell_e) \quad (15.3)$$

est fonction des dimensions relatives de l'aimant et de l'entrefer.

Le point d'intersection de cette droite avec la courbe de désaimantation du matériau à aimant définit le *point de fonctionnement* dans les conditions considérées (point P sur la figure 15.3).

En pratique, le flux utile dans l'entrefer principal ne représente qu'une fraction du flux créé par l'aimant. Le reste passe entre les pièces polaires, sous forme de fuites. On prend en compte ces fuites en écrivant l'équation de conservation du flux sous la forme : $B_a S_a = \sigma B_e S_e$, où σ est le *coefficient de fuite du circuit magnétique*. Ce coefficient est souvent de l'ordre de 2 à 5, ce qui signifie que le flux réellement utilisé n'est que la moitié ou le cinquième du flux créé par l'aimant.

D'autre part, pour tenir compte des défauts du circuit magnétique (entrefers résiduels, perméabilité non infinie du fer des pièces polaires, etc.), on introduit encore le coefficient r , *coefficient de pertes de force magnétomotrice*, tel que : $H_a \ell_a = -r H_e \ell_e$. Les valeurs de r sont en général de l'ordre de 1,05 à 1,2.

Avec ces deux coefficients correctifs, la relation (15.2), qui permet de relier l'induction et le champ magnétique dans l'aimant, devient :

$$B_a = \mu_0 H_a \frac{\sigma S_e \ell_a}{r S_a \ell_e} \quad (15.4)$$

Et la pente de la droite de charge est alors donnée par :

$$\text{tg} \alpha = \frac{B_a}{\mu_0 H_a} = -\frac{\sigma S_e \ell_a}{r S_a \ell_e} \quad (15.5)$$

Le coefficient de fuite du circuit magnétique σ joue un rôle important pour le dimensionnement de l'aimant. Estimé autrefois à partir de l'expérience, il peut maintenant être déterminé avec une beaucoup plus grande précision grâce aux logiciels de calcul électromagnétique.

1.2.2. Fonctionnements statique et dynamique d'un aimant permanent

Comme le montrent les équations (15.2) et (15.3), ou (15.4) et (15.5), la position du point de fonctionnement P le long de la courbe de désaimantation du matériau est définie par le choix des dimensions de l'aimant et de l'entrefer.

Dans les systèmes sans partie mobile, le point P, fixe, définit un fonctionnement statique de l'aimant permanent (figure 15.3).

Dans les moteurs, les actionneurs, et autres systèmes où la géométrie et/ou les dimensions d'entrefer évoluent, la droite de charge tourne autour de l'origine O (figure 15.4-a), ou – éventuellement (sous l'effet de bobines auxiliaires par exemple) – se décale le long de l'axe des champs (voir figure 15.4-b) : le fonctionnement de l'aimant est alors appelé dynamique.

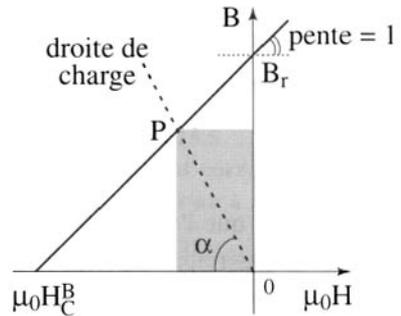


Figure 15.3 - Courbe de désaimantation d'un matériau idéal et droite de charge, de pente α , définissant le point de fonctionnement P

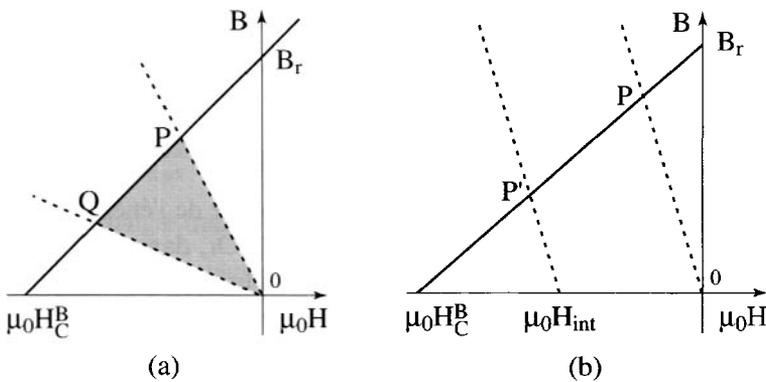


Figure 15.4 - Fonctionnements dynamiques possibles d'un aimant

Déplacement de la droite de charge :

(a) dans le cas d'un circuit à géométrie variable - (b) sous l'effet d'un champ intermittent H_{int} .

1.2.3. Le produit énergétique maximum (fonctionnement statique)

Au sein d'un aimant de géométrie donnée, inséré dans un circuit magnétique particulier, règne une densité de flux B et un champ démagnétisant H . Le produit

(\mathbf{BH}) est proportionnel à l'énergie potentielle du champ d'induction généré par l'aimant dans l'entrefer. A ce titre, il constitue une bonne mesure de la performance réalisée par cet aimant dans ce circuit.

Pour démontrer cette correspondance, on repart des équations de Maxwell, appliquées à une situation où il n'y a aucun courant électrique.

\mathbf{H} et \mathbf{B} satisfont aux équations (2.66) et (2.67) : $\mathbf{rot} \mathbf{H} = 0$, qui est une écriture du théorème d'Ampère rappelé plus haut, et $\mathbf{div} \mathbf{B} = 0$, qui stipule la conservation du flux. Pour un aimant permanent de dimensions finies, on en déduit [1] que le produit (\mathbf{BH}) intégré sur tout l'espace est nul :

$$\int_{\text{tout l'espace}} (\mathbf{B} \cdot \mathbf{H}) dV = 0.$$

Ecritte comme la somme d'une intégrale sur le volume de l'aimant permanent et d'une intégrale sur le reste de l'espace, l'expression ci-dessus devient :

$$\int_{\text{aimant}} (\mathbf{B} \cdot \mathbf{H}) dV = - \int_{\text{espace restant}} (\mathbf{B} \cdot \mathbf{H}) dV.$$

En supposant que l'espace hors aimant est vide de substances magnétiques, c'est-à-dire que \mathbf{B} y est égal à $\mu_0 \mathbf{H}$, le second membre est nécessairement négatif. Cela implique que le premier le soit aussi. On retrouve le fait que \mathbf{B} et \mathbf{H} à l'intérieur de l'aimant sont de sens opposés ou, du moins, font l'un avec l'autre un angle obtus : le champ \mathbf{H} dans l'aimant est un champ démagnétisant. Ce résultat reste vrai si l'espace hors aimant contient des matériaux magnétiques doux, car dans ceux-ci \mathbf{B} et \mathbf{H} ont la même direction.

Supposons, comme plus haut, que les champs magnétiques \mathbf{H} dans les matériaux doux sont négligeables, on peut écrire :

$$\int_{\text{aimant}} (\mathbf{B} \cdot \mathbf{H}) dV = -\mu_0 \int_{\substack{\text{espace} \\ \text{hors aimant}}} H^2 dV \quad (15.6)$$

Le second membre de cette équation représente le double de l'énergie potentielle du champ à l'extérieur de l'aimant, voir équation (2.68). Or, dans le système idéalisé considéré ici, le champ \mathbf{H} à l'extérieur de l'aimant n'a une valeur non nulle que dans l'entrefer : l'énergie potentielle du champ dans l'entrefer est donc proportionnelle au produit (\mathbf{BH}) dans l'aimant.

Remarque : L'approche ci-dessus, fondée sur les équations locales de Maxwell, est rigoureuse. Elle démontre le caractère général du résultat énoncé en préambule. Avec beaucoup moins de rigueur, ce résultat peut être obtenu dans le cas d'école d'un circuit idéal par le simple produit membre à membre des équations données plus haut : $B_a S_a = B_e S_e$ et $H_a l_a = -H_e l_e$ d'où : $B_a H_a V_a = -B_e H_e V_e = -\mu_0 H_e^2 V_e$, où V_a et V_e sont respectivement le volume de l'aimant et celui de l'entrefer.

Le produit (\mathbf{BH}) des modules des champs \mathbf{B} et \mathbf{H} dans l'aimant est appelé *produit énergétique*. Selon la position du point de fonctionnement P, sa valeur varie.

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