

Pierre Mayé

MOTEURS ÉLECTRIQUES POUR LA ROBOTIQUE

4^e ÉDITION

DUNOD

NOUS NOUS ENGAGEONS EN FAVEUR DE L'ENVIRONNEMENT :



Nos livres sont imprimés sur des papiers certifiés pour réduire notre impact sur l'environnement.



Le format de nos ouvrages est pensé afin d'optimiser l'utilisation du papier.



Depuis plus de 30 ans, nous imprimons 70 % de nos livres en France et 25 % en Europe et nous mettons tout en œuvre pour augmenter cet engagement auprès des imprimeurs français.



Nous limitons l'utilisation du plastique sur nos ouvrages (film sur les couvertures et les livres).

Illustrations intérieures : Alain et Ursula Bouteville

© Dunod, Paris, 2000, 2006, 2016, 2023
11, rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com
ISBN 978-2-10-084786-0



TABLE DES MATIÈRES

Introduction	1
<hr/>	
CHAPITRE 1 - GÉNÉRALITÉS	3
<hr/>	
1.1 Actionneurs de la robotique	3
1.1.1 Moteur électrique	3
1.1.2 Particularités des moteurs utilisés en robotique	3
1.1.3 Avantages des actionneurs électriques	4
1.1.4 Types de moteurs utilisés	4
1.2 Lois de base de l'électromagnétisme	4
1.2.1 Champ magnétique	4
1.2.2 Forces magnétiques	6
1.2.3 Induction électromagnétique	9
1.3 Circuits magnétiques et aimants	10
1.3.1 Milieux ferromagnétiques	10
1.3.2 Circuits magnétiques	16
1.3.3 Aimants permanents	19
1.4 Conversion électromécanique	26
1.4.1 Étude générale	26
1.4.2 Cas particulier des circuits magnétiques linéaires	30
<hr/>	
CHAPITRE 2 - PRINCIPE ET TECHNOLOGIE DES MOTEURS À COURANT CONTINU	36
<hr/>	
2.1 Description	36
2.1.1 Définition	36
2.1.2 Symbole	36
2.1.3 Constitution	37
2.1.4 Topographie du champ magnétique	37
2.1.5 Rôle du collecteur	39

2.1.6	Conception de l'enroulement	41
2.1.7	Machines multipolaires	45
2.1.8	Réaction d'induit	45
2.2	Étude mécanique	50
2.2.1	Couple électromagnétique	50
2.2.2	Principe fondamental de la dynamique	51
2.2.3	Moment d'inertie	51
2.2.4	Couple de pertes	52
2.3	Étude électrique	54
2.3.1	Force contre-électromotrice	54
2.3.2	Loi des mailles	55
2.3.3	Résistance	56
2.3.4	Inductance	57
2.4	Étude énergétique	58
2.4.1	Puissance électromagnétique	58
2.4.2	Bilan des puissances en régime permanent	58
2.4.3	Bilan des énergies en régime variable	59
2.5	Technologie	60
2.5.1	Moteurs de structure classique	60
2.5.2	Moteurs à rotor plat	62
2.5.3	Moteurs à rotor en cloche	63
<hr/>		
CHAPITRE 3 - RÉGIMES DE FONCTIONNEMENT D'UN MOTEUR À COURANT CONTINU		65
<hr/>		
3.1	Régime permanent	65
3.1.1	Équations de base	65
3.1.2	Bilan des puissances	65
3.1.3	Caractéristiques	66
3.1.4	Influence de la température	70
3.2	Régimes transitoires pour un moteur pouvant être considéré comme un système du premier ordre	71
3.2.1	Démarrage sous tension constante	71
3.2.2	Démarrage à courant constant	76
3.2.3	Ralentissement	78
3.2.4	Changement de charge	79
3.2.5	Transmittances	81

3.3	Régimes transitoires pour un moteur pouvant être considéré comme un système du deuxième ordre	83
3.3.1	Mise sous tension à rotor bloqué	83
3.3.2	Démarrage sous tension constante	84
3.3.3	Transmittances	89
3.3.4	Justification de l'étude approchée	90
<hr/>		
CHAPITRE 4 - ALIMENTATION ÉLECTRONIQUE DES MOTEURS À COURANT CONTINU		92
<hr/>		
4.1	Alimentation utilisant des composants actifs en régime linéaire	92
4.1.1	Principe	92
4.1.2	Améliorations	95
4.1.3	Insuffisance des circuits linéaires	102
4.2	Alimentation utilisant des composants actifs en commutation	102
4.2.1	Principe du hacheur	103
4.2.2	Choix de la fréquence de découpage	106
4.2.3	Réalisation du commutateur	108
4.2.4	Commande en modulation de largeur d'impulsion	110
4.2.5	Inversion du sens de rotation	112
4.2.6	Asservissement du courant	114
4.2.7	Circuits intégrés	114
4.3	Exemples de réalisation	118
4.3.1	Alimentation en courant utilisant un amplificateur opérationnel de puissance en régime linéaire	118
4.3.2	Alimentation en courant utilisant deux circuits intégrés	118
4.3.3	Commande d'un moteur à courant continu par une carte à microcontrôleur Arduino	120
<hr/>		
CHAPITRE 5 - MOTEURS À COURANT CONTINU SANS BALAIS		121
<hr/>		
5.1	Généralités	121
5.1.1	Définition	121
5.1.2	Différences entre moteur à courant continu sans balais et machine synchrone autopilotée	121
5.1.3	Description	122
5.1.4	Principe	123
5.1.5	Avantages	125
5.2	Différentes configurations d'enroulements	126

5.2.1	Moteur à trois phases en étoile à alimentation bidirectionnelle	126
5.2.2	Moteur à trois phases en étoile à alimentation unidirectionnelle	127
5.2.3	Moteur à trois phases en triangle	130
5.2.4	Moteur à quatre phases en étoile à alimentation bidirectionnelle	132
5.2.5	Moteur à quatre phases en étoile à alimentation unidirectionnelle	134
5.2.6	Moteur à quatre phases en carré	135
5.3	Modélisation	136
5.3.1	Schéma électrique d'une phase	136
5.3.2	Modélisation de la machine	136
5.4	Technologie	137
5.4.1	Stator	137
5.4.2	Rotor	139
5.4.3	Moteurs à structure inversée	140
5.4.4	Moteurs à électronique intégrée	141
5.5	Moteur à courant continu sans balais sans capteur	141

CHAPITRE 6 - ALIMENTATION ÉLECTRONIQUE DES MOTEURS À COURANT CONTINU SANS BALAIS

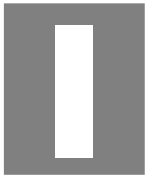
6.1	Généralités	143
6.1.1	Structure globale	143
6.1.2	Alimentation en tension ou en courant	144
6.1.3	Alimentation unidirectionnelle ou bidirectionnelle ...	144
6.2	Éléments de l'alimentation	144
6.2.1	Commutateur de puissance	144
6.2.2	Capteurs	146
6.2.3	Logique de commande	148
6.2.4	Commande de la tension ou du courant	149
6.3	Exemples de réalisations	150
6.3.1	Alimentation en courant utilisant un seul circuit intégré	150
6.3.2	Alimentation en courant utilisant plusieurs circuits intégrés	151

<hr/>	
CHAPITRE 7 - MOTEURS PAS-À-PAS	155
<hr/>	
7.1 Généralités	155
7.1.1 Définition	155
7.1.2 Symbole	155
7.1.3 Pas	156
7.1.4 Commande de position	157
7.1.5 Commande de vitesse	157
7.1.6 Fréquence de rotation et vitesse de rotation	157
7.1.7 Tailles NEMA	158
7.1.8 Historique	158
7.1.9 Avantages	159
7.1.10 Inconvénients	159
7.1.11 Applications	159
7.2 Différents types	159
7.2.1 Moteur à aimant	160
7.2.2 Moteurs à réluctance variable	173
7.2.3 Moteur hybride	177
7.3 Modélisation	179
7.3.1 Moteur à réluctance variable	179
7.3.2 Moteur à aimant	182
7.3.3 Moteur hybride	185
7.4 Comportement mécanique	185
7.4.1 Positions d'équilibre	185
7.4.2 Déplacement d'un pas	186
7.4.3 Enchaînement des commutations	190
7.5 Exemple	193
<hr/>	
CHAPITRE 8 - ALIMENTATION ÉLECTRONIQUE DES MOTEURS PAS-À-PAS	195
<hr/>	
8.1 Généralités	195
8.1.1 Structure globale	195
8.1.2 Alimentation en tension ou en courant	196
8.1.3 Alimentation unidirectionnelle ou bidirectionnelle ...	197
8.1.4 Accessibilité des enroulements	197
8.2 Alimentation en tension	199

8.2.1	Circuit de base	199
8.2.2	Amélioration de la décroissance du courant	202
8.2.3	Amélioration de la montée du courant	207
8.3	Alimentation en courant	213
8.3.1	Structure de base	213
8.3.2	Fonctionnement avec mesure du maximum et du minimum du courant	215
8.3.3	Fonctionnement avec mesure du maximum du courant et temps de coupure constant	219
8.3.4	Fonctionnement en modulation de largeur d'impulsions	221
8.4	Exemples de réalisations	222
8.4.1	Alimentation bidirectionnelle en courant pour moteur à deux phases	222
8.4.2	Alimentation pour fonctionnement à pas réduit	224
8.4.3	Commande d'un moteur pas-à-pas par une carte à microcontrôleur Arduino	226
<hr/>		
CHAPITRE 9 - MÉCANISMES ASSOCIÉS AUX MOTEURS		227
<hr/>		
9.1	Réducteur de vitesse	227
9.1.1	Principe	227
9.1.2	Modèle du réducteur idéal	229
9.1.3	Optimisation d'un réducteur	230
9.1.4	Réalisations industrielles	230
9.1.5	Autre système de conversion entre mouvements de rotation	230
9.2	Mécanismes assurant la conversion d'un mouvement d'une rotation en translation	231
9.2.1	Système poulies et courroies crantées	231
9.2.2	Système vis et écrou	233
<hr/>		
CHAPITRE 10 - ÉCHAUFFEMENT DES MOTEURS		235
<hr/>		
10.1	Généralités	235
10.1.1	Causes	235
10.1.2	Conséquences	236
10.2	Étude générale des échanges thermiques	236

10.2.1	Lois de base	236
10.2.2	Analogie électrique	238
10.3	Modélisation thermique des moteurs	239
10.3.1	Machine pouvant être considérée comme un système à un corps	239
10.3.2	Machine pouvant être considérée comme un système à deux corps	239
10.4	Régimes de fonctionnement thermique	240
10.4.1	Régime continu	240
10.4.2	Régime temporaire	244
10.4.3	Régime intermittent	245
10.5	Couple thermiquement équivalent	248
<hr/>		
CHAPITRE 11 - MESURE DES PARAMÈTRES D'UN MOTEUR		249
<hr/>		
11.1	Matériel de mesure	249
11.1.1	Banc de test	249
11.1.2	Mesures électriques	250
11.1.3	Mesures mécaniques	251
11.2	Mesure de la constante du moteur	251
11.2.1	Cas du moteur à courant continu	251
11.2.2	Cas du moteur à courant continu sans balais	253
11.3	Mesure des paramètres électriques	254
11.3.1	Résistance	254
11.3.2	Inductance	255
11.4	Mesure des paramètres mécaniques	257
11.4.1	Couple de pertes	257
11.4.2	Moment d'inertie	258
<hr/>		
CHAPITRE 12 - ASSERVISSEMENT DE LA VITESSE ET DE LA POSITION		264
<hr/>		
12.1	Asservissement de vitesse	264
12.1.1	Nécessité	264
12.1.2	Description du système	265
12.1.3	Principe de fonctionnement	266
12.1.4	Exemple de réalisation	267

12.2	Asservissement de position	267
12.2.1	Nécessité	267
12.2.2	Description du système	268
12.2.3	Principe de fonctionnement	269
12.3	Circuits intégrés spécialisés	269
12.3.1	But	269
12.3.2	Description	269
12.3.3	Types de sortie	269
12.4	Servomoteur	271
12.4.1	Description	271
12.4.2	Commande	271
<hr/>		
CHAPITRE 13 - Capteurs		273
<hr/>		
13.1	Généralités	273
13.1.1	Définitions	273
13.1.2	Principales caractéristiques	273
13.2	Capteurs de position	274
13.2.1	Potentiomètre	274
13.2.2	Codeur	277
13.3	Capteurs de vitesse	289
13.3.1	Génératrice tachymétrique	289
13.3.2	Alternateur tachymétrique	292
13.3.3	Codeur incrémental	293
Annexe		295
Lexique		303
Bibliographie		305
Index		307



INTRODUCTION

La robotique est une technique qui s'est beaucoup développée dans les dernières décennies. Le moteur électrique a pris une place prépondérante parmi les actionneurs utilisés dans ce domaine. L'étude de ces dispositifs suppose des connaissances variées : électrotechnique, électronique, mécanique et automatique.

Cet ouvrage se propose d'aborder de façon simple les différents problèmes liés à l'utilisation des moteurs électriques en robotique : les propriétés de la machine elle-même, mais aussi son alimentation électronique et les mécanismes associés. Nous étudierons les trois principaux types d'actionneurs électriques employés : le moteur à courant continu, le moteur à courant continu sans balais et le moteur pas-à-pas. Certains points sont spécifiques à un type de machine tandis que d'autres peuvent être traités en commun.

Le lecteur trouvera en annexe les notices techniques d'un moteur de chaque catégorie et un petit lexique des termes techniques rencontrés qui facilitera la lecture des documents des constructeurs souvent rédigés en langue anglaise. L'auteur tient à remercier les fabricants qui lui ont fourni des renseignements sur leurs matériels et en particulier ceux qui ont autorisé la reproduction de leurs notices ou de leurs photographies.

GÉNÉRALITÉS

Ce chapitre a pour but de préciser le cadre de notre étude et de rappeler quelques notions d'électromagnétisme utiles pour la suite.

1.1 Actionneurs de la robotique

1.1.1 Moteur électrique

Un moteur électrique est une machine qui reçoit un travail électrique et fournit un travail mécanique.

1.1.2 Particularités des moteurs utilisés en robotique

Un robot réalise des fonctions mécaniques telles qu'un déplacement ou un positionnement. Pour cela, il a besoin d'un actionneur qui va réaliser à la fois une transmission d'information et une conversion d'énergie. Plusieurs technologies existent : on rencontre des actionneurs électriques, pneumatiques et hydrauliques. Les premiers sont le plus souvent des moteurs en rotation, un mécanisme permettant éventuellement de modifier la nature du mouvement. Ce sont ces machines qui nous intéressent ici.

Les moteurs employés font appel aux mêmes principes que ceux qu'on utilise en électrotechnique classique, mais leurs caractéristiques et leurs technologies sont différentes. Tout d'abord, la puissance en général modeste des machines fait qu'on fait souvent appel à des aimants permanents plutôt qu'à des inducteurs bobinés, ce qui simplifie la réalisation et élimine les pertes par effet Joule correspondantes. Ensuite, on ne cherche pas à optimiser les mêmes paramètres. Les grandeurs liées à la conversion d'énergie (puissance, rendement) sont certes importantes, mais les grandeurs liées à l'information (précision, rapidité de réponse) sont primordiales. Ainsi, on minimise l'inertie des parties tournantes en adoptant des structures particulières ou une géométrie adaptée pour réaliser des moteurs à réponse rapide.

Les performances d'un actionneur électrique sont intimement liées à celles de son environnement : le convertisseur d'énergie et sa commande électronique, l'éventuel asservissement avec ses capteurs et les mécanismes associés à la charge. Il est important d'en tenir compte lors d'une comparaison de coût entre plusieurs solutions.

1.1.3 Avantages des actionneurs électriques

Par rapport à leurs concurrents hydrauliques et pneumatiques, les actionneurs électriques présentent un certain nombre d'avantages parmi lesquels :

- une énergie facilement disponible, soit à partir du réseau de distribution, soit à partir de batteries pour les engins autonomes ;
- une adaptation aisée de l'actionneur et de sa commande du fait de la nature électrique de l'ensemble des grandeurs.

Les progrès récents ont permis un élargissement du domaine d'emploi des actionneurs électriques. On peut citer :

- l'amélioration des performances des moteurs grâce en particulier à la disponibilité d'aimants plus efficaces et à l'optimisation obtenue par l'utilisation de logiciels de simulation ;
- la simplification de l'électronique associée grâce aux avancées dans le domaine des composants (circuits intégrés, transistors de puissance ...).

1.1.4 Types de moteurs utilisés

Les machines rencontrées dans le domaine de la robotique sont essentiellement de trois types :

- le moteur à courant continu représente la solution traditionnelle lorsqu'on a besoin de commander une vitesse ou une position, mais nécessite un asservissement ;
- le moteur à courant continu sans balais est en fait une machine alternative associée à un commutateur électronique qui peut remplacer le moteur à courant continu classique avec des caractéristiques similaires ;
- le moteur pas-à-pas est à la base un actionneur de positionnement ne nécessitant pas d'asservissement, mais peut être aussi utilisé pour une commande de déplacement.

1.2 Lois de base de l'électromagnétisme

On rappelle ici brièvement quelques formules fondamentales qui seront utilisées dans les chapitres suivants. On trouvera plus de détails ainsi que les démonstrations dans tous les ouvrages classiques d'électromagnétisme.

1.2.1 Champ magnétique

Définition

Le champ magnétique est caractérisé par ses effets. En chaque point de l'espace, on définit un vecteur champ magnétique, noté \mathbf{B} . Sa direction et son sens sont repérés

en plaçant une petite aiguille aimantée au point considéré. Sa norme est exprimée à partir de l'action exercée sur une particule chargée en mouvement. La force F exercée par un champ magnétique B sur une particule de charge q se déplaçant à la vitesse v a les caractéristiques suivantes :

- sa direction est orthogonale au plan défini par v et B ;
- son sens est tel que la base (qv, B, F) soit directe (*figure 1.1*) ;
- sa norme est proportionnelle à $|q|$, $\|v\|$ et $|\sin \alpha|$, α étant l'angle entre v et B .

Par définition, le coefficient de proportionnalité est $\|B\|$, norme du vecteur champ magnétique :

$$\|F\| = |q| \cdot \|v\| \cdot \|B\| \cdot |\sin \alpha|$$

L'unité de $\|B\|$ est le tesla (T). L'ensemble des propriétés précédentes montre que le résultat peut s'écrire sous forme d'un produit vectoriel :

$$F = qv \wedge B$$

F est appelée force de Lorentz.

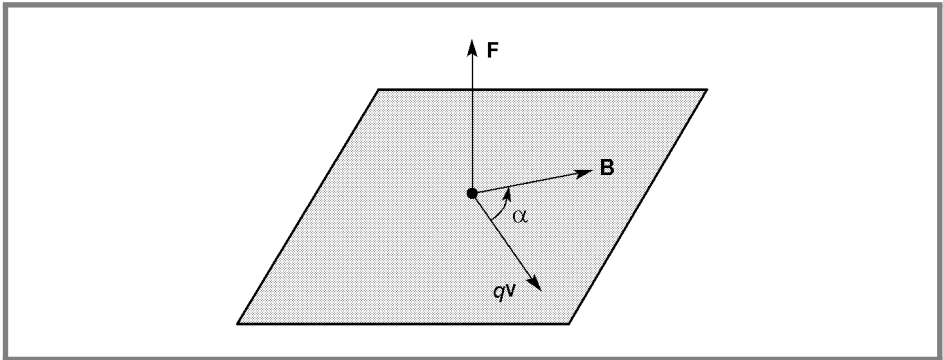


Figure 1.1 – Direction et sens de la force exercée par un champ magnétique sur une particule chargée.

Lignes de champ

On appelle ligne de champ magnétique une courbe tangente au vecteur B en chacun de ses points. Il y a une infinité de lignes de champ pour un dispositif donné, mais on se contente d'en tracer quelques-unes pour avoir une idée de la topographie du champ magnétique.

REMARQUE

Le tracé des lignes de champ est nécessaire pour une étude détaillée du fonctionnement interne des machines. Hormis dans des dispositifs très simples, leur détermination est difficile. Heureusement, il existe des logiciels permettant d'effectuer cette tâche.

Flux magnétique

Le flux magnétique φ à travers une surface (S) est défini par :

$$\varphi = \iint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$$

$d\mathbf{S}$ est le vecteur surface élémentaire. Sa norme est égale à la surface élémentaire dS . Sa direction et son sens sont ceux de la normale orientée au point considéré. Si la surface est fermée, la normale est orientée par convention vers l'extérieur. Si la surface est limitée par un contour fermé (C), on fixe le sens du vecteur unitaire normal \mathbf{n} en concordance avec l'orientation de (C) (*figure 1.2*). Pratiquement, on utilise la règle de Maxwell : un tire-bouchon tournant comme le montre la flèche placée sur le contour progresse dans le sens de la normale orientée.

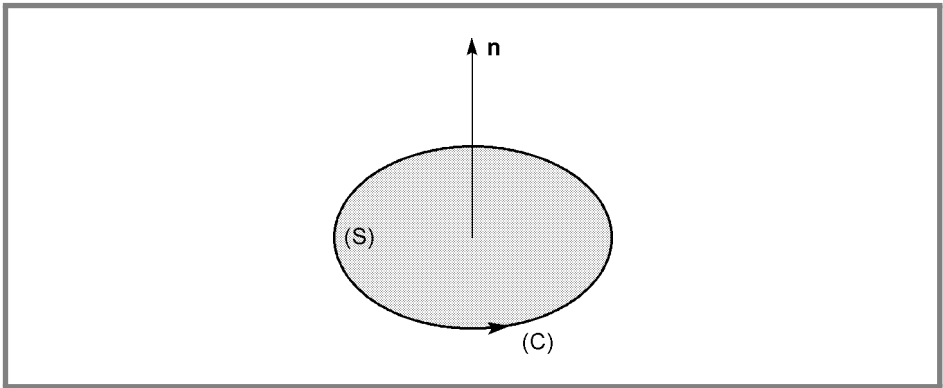


Figure 1.2 – Orientation de la normale.

L'unité de flux magnétique est le weber (Wb). Une propriété importante de \mathbf{B} est d'être un champ à flux conservatif, c'est-à-dire que le flux magnétique à travers une surface fermée quelconque est nul. Un cas particulier important est celui où la surface considérée est un tube de champ, c'est-à-dire un ensemble de lignes de champ s'appuyant sur un contour fermé (*figure 1.3*). Le flux sortant du tube de champ est nul puisque \mathbf{B} est toujours tangent aux lignes de champ. Il en résulte que les flux magnétiques à travers deux sections (S_1) et (S_2) d'un même tube de champ sont égaux.

1.2.2 Forces magnétiques

Loi de Laplace

Un circuit parcouru par un courant est soumis à une force quand il est placé dans un champ magnétique : c'est la force de Laplace. Un élément $d\mathbf{l}$ d'un circuit filiforme parcouru par un courant d'intensité i et placé dans un champ magnétique \mathbf{B} (*figure 1.4*) est soumis à une force :

$$d\mathbf{F} = i d\mathbf{l} \wedge \mathbf{B}$$

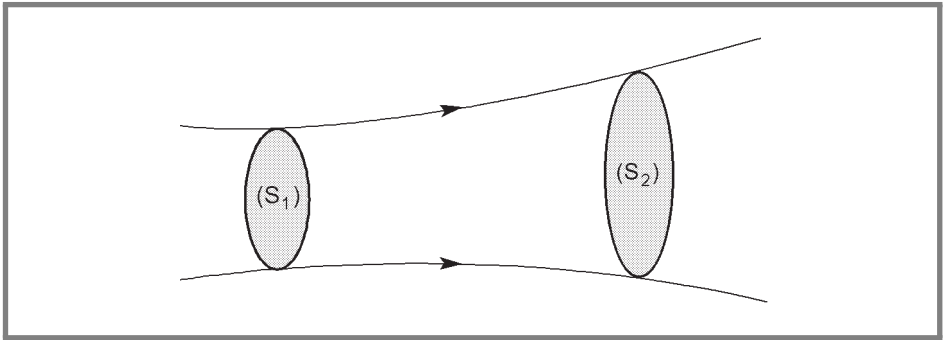


Figure 1.3 – Tube de champ magnétique.

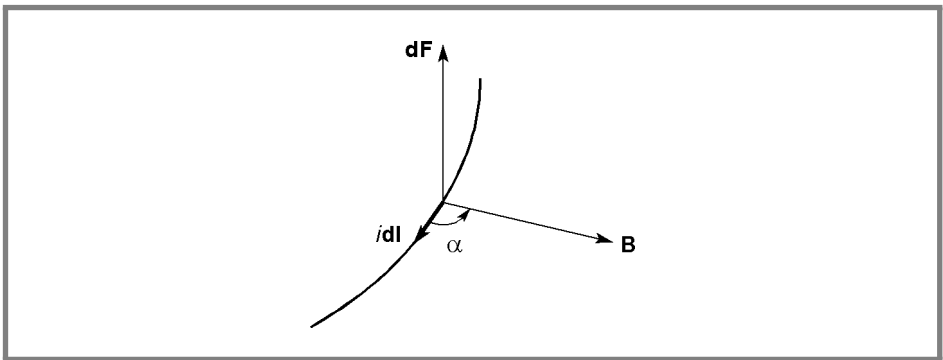


Figure 1.4 – Direction et sens de la force de Laplace.

Travail des forces magnétiques

On considère le déplacement d'un circuit fermé (C) dans un champ magnétique \mathbf{B} . Si le conducteur est parcouru par un courant d'intensité i , un de ses éléments $d\mathbf{l}$ est soumis à une force de Laplace $d\mathbf{F}$. Le travail de cette force au cours d'un déplacement élémentaire $d\mathbf{r}$ est :

$$\delta^2 \mathcal{E} = d\mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = i(d\mathbf{l} \wedge \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{r}$$

Soit, en modifiant l'ordre des termes de ce produit mixte :

$$\delta^2 \mathcal{E} = i \mathbf{B} \cdot (d\mathbf{r} \wedge d\mathbf{l})$$

Le travail des forces de Laplace sur l'ensemble du circuit est obtenu en intégrant :

$$\delta \mathcal{E} = \int_{(C)} i \mathbf{B} \cdot (d\mathbf{r} \wedge d\mathbf{l})$$

Le vecteur $d\mathbf{r} \wedge d\mathbf{l}$ a pour norme l'aire balayée par l'élément $d\mathbf{l}$ au cours de son déplacement. Par définition, on appelle flux coupé par le circuit (C) la quantité :

$$\delta \varphi_C = \int_{(C)} \mathbf{B} \cdot (d\mathbf{r} \wedge d\mathbf{l})$$

On a alors :

$$\delta \mathcal{T} = i \delta \varphi_c$$

Si le champ magnétique est permanent, on peut modifier l'expression précédente. On considère pour cela le tube engendré par le déplacement du circuit (*figure 1.5*). Soit φ le flux à travers une surface s'appuyant sur le contour (C) dans sa position initiale. Après le déplacement, ce flux est devenu $\varphi + d\varphi$ pour la position finale. $\delta\varphi_c$ est le flux à travers la surface latérale du tube, orientée vers l'intérieur (à cause du produit vectoriel). Le flux magnétique étant conservatif, on peut écrire :

$$-\varphi - \delta\varphi_c + \varphi + d\varphi = 0$$

On en déduit :

$$\delta\varphi_c = d\varphi$$

et donc :

$$\delta \mathcal{T} = i d\varphi$$

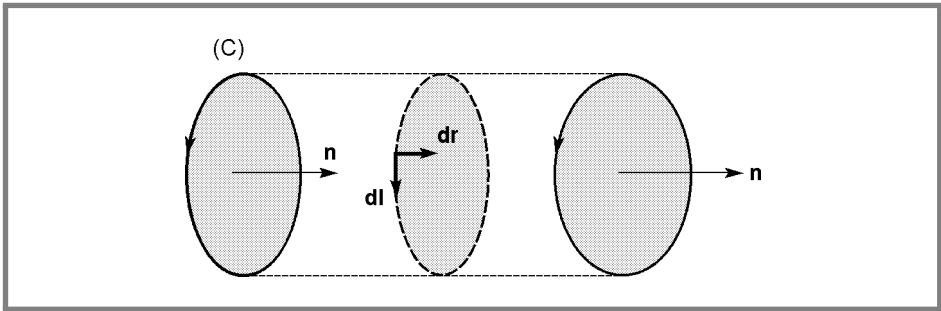


Figure 1.5 – Flux coupé par le déplacement d'un circuit.

REMARQUE

On a noté le travail élémentaire et le flux coupé élémentaire avec le symbole δ alors que pour la force ou le flux, on utilise la lettre d . Cette distinction est due au fait que $\delta \mathcal{T}$ et $\delta \varphi_c$ ne sont pas en général les différentielles d'une fonction.

Si le courant est constant, on peut exprimer le travail pour un déplacement fini :

$$\mathcal{T} = i (\varphi_2 - \varphi_1)$$

Ce travail ne dépend pas du chemin suivi. On peut donc définir une énergie potentielle (ou énergie mutuelle du circuit et du champ magnétique) :

$$E_p = -i \varphi$$

Un équilibre stable correspond à une énergie potentielle minimale, et donc à un flux maximal puisque le courant est constant. On en déduit la règle suivante : un circuit abandonné à lui-même dans un champ magnétique se déplace sous l'effet des forces de Laplace jusqu'à ce que le flux qui le traverse soit maximal.

1.2.3 Induction électromagnétique

Phénomènes observés

Quand on approche ou qu'on éloigne un aimant d'une bobine, on constate qu'il apparaît un courant si le circuit est fermé, une tension entre les deux bornes si le circuit est ouvert. La même chose se produit si c'est la bobine qu'on déplace. Par ailleurs, quand on met une bobine dans un champ magnétique variable (obtenu par exemple en modifiant le courant dans un solénoïde inducteur), on observe également l'apparition du courant ou de la tension.

Loi de Faraday

Les expériences précédentes recouvrent deux aspects du phénomène d'induction électromagnétique. Celui-ci consiste en l'apparition d'une force électromotrice lors d'une variation de flux :

$$e = -\frac{d\phi}{dt}$$

La variation de flux peut être due à une modification du champ magnétique pour un circuit fixe (cas de Neumann) ou à un déplacement relatif du circuit par rapport à un champ magnétique permanent (cas de Lorentz). Les deux causes peuvent se combiner (déplacement d'un circuit dans un champ magnétique variable). La formule s'applique également en cas de déformation du circuit. Il faut toutefois s'assurer que les variations des paramètres du circuit ne sont pas discontinues. Cela exclut le cas où il existe des commutations dans le dispositif.

Quand on considère une bobine de N spires, on peut définir la force électromotrice par spire :

$$e_1 = -\frac{d\phi}{dt}$$

Dans cette formule, ϕ est le flux à travers la spire considérée. En admettant que ce flux est identique pour toutes les spires (pas de fuites), et comme ces éléments sont en série, la force électromotrice induite dans la bobine est :

$$e = -N \frac{d\phi}{dt}$$

On définit alors le flux total dans la bobine :

$$\psi = N\phi$$

ce qui conduit à :

$$e = -\frac{d\psi}{dt}$$

Dans les moteurs, ou plus généralement les récepteurs, la force électromotrice induite s'oppose à la force électromotrice du générateur. Pour éviter des signes – dans les formules, il est souvent intéressant de définir la notion de force contre-électromotrice :

$$e' = \frac{d\phi}{dt}$$

Une force électromotrice positive tend à faire circuler un courant positif (c'est-à-dire dans le sens de parcours de (C)) tandis qu'une force contre-électromotrice positive tend à faire circuler un courant négatif.

Dans un certain nombre de cas pratiques, on ne connaît pas précisément les variations du flux en fonction du temps et il n'est donc pas possible de calculer la force électromotrice à chaque instant. Par contre, on peut le plus souvent déterminer la variation de flux $\Delta\Phi$ obtenue pendant une durée finie Δt . On calcule alors une force électromotrice moyenne :

$$E_{\text{moy}} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Dans le cas particulier du circuit qui se déplace dans un champ magnétique permanent, il est en général plus commode d'évaluer le flux Φ_c coupé pendant la durée Δt et d'exprimer la force électromotrice moyenne par :

$$E_{\text{moy}} = -\frac{\Phi_c}{\Delta t}$$

Pour les moteurs, on utilisera aussi la force contre-électromotrice moyenne :

$$E'_{\text{moy}} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Ainsi, dans le cas du déplacement d'un circuit dans un champ magnétique permanent :

$$E'_{\text{moy}} = \frac{\Phi_c}{\Delta t}$$

Cette dernière formule sera par exemple employée dans l'étude du moteur à courant continu.

1.3 Circuits magnétiques et aimants

1.3.1 Milieux ferromagnétiques

Vecteur aimantation

Les propriétés magnétiques des milieux matériels proviennent de dipôles magnétiques élémentaires à l'échelle atomique. Ampère avait déjà eu l'intuition de décrire ces phénomènes par de petites boucles de courant (ampèriens). Les théories modernes sur la structure de l'atome ont permis de préciser les choses. Du point de vue macroscopique, on peut se contenter de considérer que le milieu comporte une distribution de boucles élémentaires de surface S et parcourues par un courant i dont on définit le moment magnétique par :

$$\mathcal{M} = iS$$

Sa norme s'exprime en $A \cdot m^2$. On caractérise la matière par la densité volumique de moments magnétiques, c'est par définition le vecteur aimantation :

$$\mathbf{J} = \frac{d\mathcal{M}}{dV}$$

L'unité d'aimantation est l'ampère par mètre ($A \cdot m^{-1}$).

Vecteur excitation magnétique

Pour simplifier l'étude des champs magnétiques dans les milieux matériels, on définit un vecteur auxiliaire, l'excitation magnétique, par :

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{J}$$

μ_0 est une constante appelée perméabilité magnétique du vide. Sa valeur est :

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$$

L'intérêt du vecteur excitation magnétique est d'être lié directement aux causes du champ magnétique. Le théorème d'Ampère affirme en effet que la circulation de \mathbf{H} sur un contour fermé (C) est égale à la somme des intensités des courants qui traversent ce contour :

$$\oint_{(C)} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum_{k=1}^N i_k$$

Cette relation montre que l'unité d'excitation magnétique est l'ampère par mètre.

REMARQUE

Autrefois, c'est le vecteur \mathbf{H} qu'on appelait champ magnétique tandis que \mathbf{B} était nommé induction magnétique. Cela s'explique par le fait qu'on attribuait à \mathbf{H} le rôle fondamental qui en faisait l'analogue du champ \mathbf{E} en électrostatique. Le vecteur \mathbf{B} n'avait alors qu'un rôle auxiliaire comme le vecteur \mathbf{D} en électrostatique. Cependant, cette façon de voir est erronée et la véritable analogie physique est bien celle des vecteurs \mathbf{B} et \mathbf{E} . Malheureusement, on rencontre encore parfois les anciennes dénominations.

Caractéristiques magnétiques

La grande difficulté de l'étude des dispositifs électromagnétiques vient du fait que la relation entre \mathbf{B} et \mathbf{H} dans la matière n'est pas simple. Dans le cas des matériaux ferromagnétiques — les seuls qui ont un intérêt pratique en électrotechnique — le champ magnétique n'est pas lié seulement à l'excitation magnétique, mais dépend également de l'utilisation antérieure du matériau. On peut cependant tracer une courbe qui relie B et H indépendamment du passé en démagnétisant complètement la matière. On parle alors de courbe de première aimantation. Pour le relevé, on utilise un tore de matériau ferromagnétique sur lequel on a bobiné un enroulement. Les vecteurs \mathbf{B} et \mathbf{H} restent colinéaires et il suffit de s'intéresser à

leurs mesures algébriques B et H sur la ligne de champ moyenne. On peut mesurer (indirectement) B et H et en déduire par calcul l'aimantation J . On trace la courbe de J en fonction de H (figure 1.6). La croissance est d'abord lente, devient plus rapide puis se ralentit de nouveau quand la courbe se dirige vers une asymptote horizontale dont l'ordonnée J_S est l'aimantation à saturation. Il est également possible de tracer B en fonction de H . La courbe présente alors une asymptote oblique de pente μ_0 (figure 1.7).

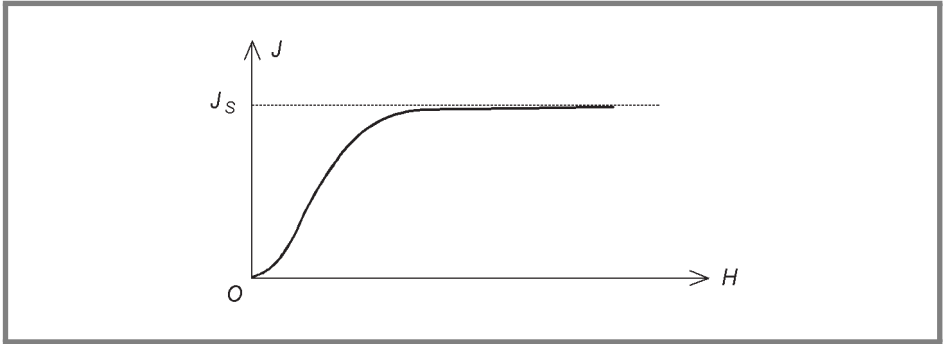


Figure 1.6 – Courbe de première aimantation (coordonnées H, J).

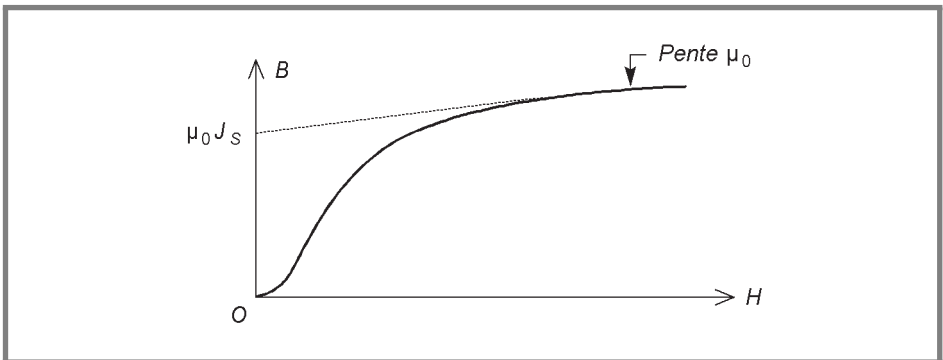


Figure 1.7 – Courbe de première aimantation (coordonnées H, B).

Lorsque le matériau est à saturation, on fait décroître le courant dans la bobine, donc la valeur de H . On constate que les points obtenus ne sont pas sur la courbe de première aimantation, mais au-dessus. Quand H s'annule, J conserve une valeur J_r appelée aimantation rémanente. On inverse ensuite le sens du courant dans le bobinage pour donner à H des valeurs négatives : J s'annule pour une valeur $-H_c$ de H . H_c est appelée excitation coercitive pour l'aimantation. On continue à diminuer H jusqu'à une valeur opposée à celle qui a permis d'atteindre la saturation au départ. Ensuite, lorsqu'on augmente de nouveau H , le point de fonctionnement décrit une nouvelle courbe passant en dessous de la première. Après quelques allers et retours entre les valeurs extrêmes de l'excitation, le point représentatif parcourt une courbe fermée invariable appelée cycle d'hystérésis (figure 1.8).

On peut aussi utiliser une représentation avec les coordonnées H et B (figure 1.9). On définit ainsi un champ magnétique rémanent B_r et une excitation coercitive pour le champ H'_c . La valeur de H qui annule B est inférieure à celle qui annule J : H_c et H'_c sont donc différents.

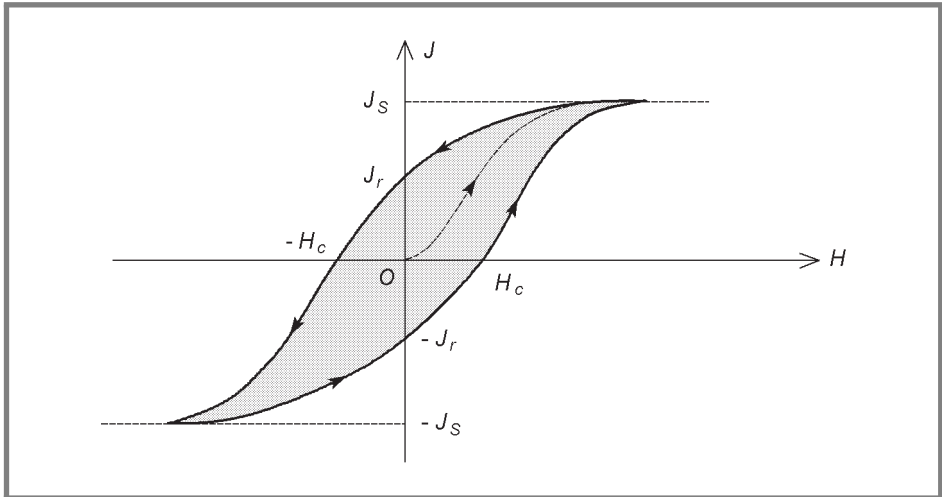


Figure 1.8 – Cycle d'hystérésis (coordonnées H, J).

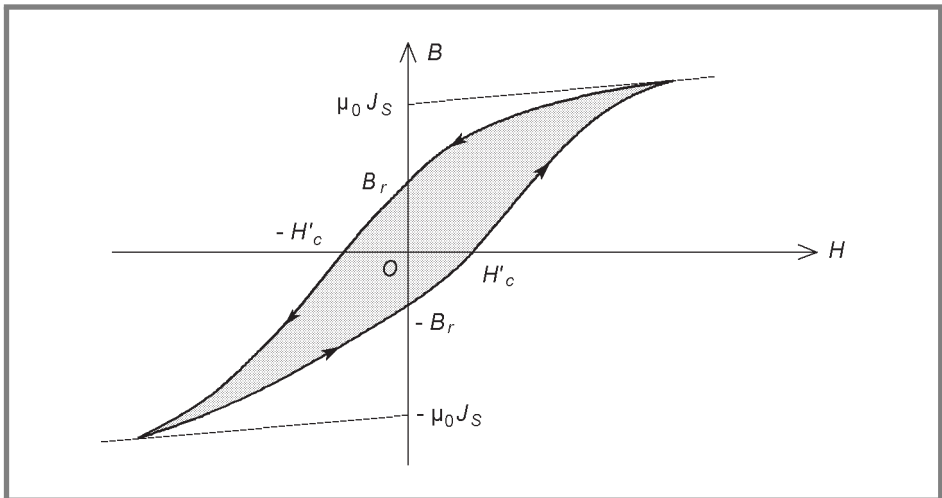


Figure 1.9 – Cycle d'hystérésis (coordonnées H, B).

On distingue les matériaux ferromagnétiques doux et durs. Les premiers ont une faible excitation coercitive, leur cycle est étroit : ils sont destinés à canaliser les flux. Au contraire, les seconds ont une forte excitation coercitive : ils servent à fabriquer les aimants.

Perméabilité magnétique

Pour les matériaux non ferromagnétiques, les vecteurs \mathbf{B} et \mathbf{H} sont proportionnels :

$$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}$$

μ est la perméabilité du milieu et s'exprime en henry par mètre ($\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$). On emploie surtout la perméabilité relative μ_r en rapportant μ à μ_0 , perméabilité du vide :

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

Pour les matériaux ferromagnétiques, on généralise ces définitions en considérant la courbe de première aimantation. Toutefois, la perméabilité dépend dans ce cas du point de fonctionnement. On peut par exemple tracer la courbe de μ_r en fonction de H (*figure 1.10*). Tant que le matériau n'est pas saturé, la perméabilité relative est très grande devant 1. Par contre, elle diminue lorsqu'apparaît la saturation et tend vers 1 aux très fortes excitations.

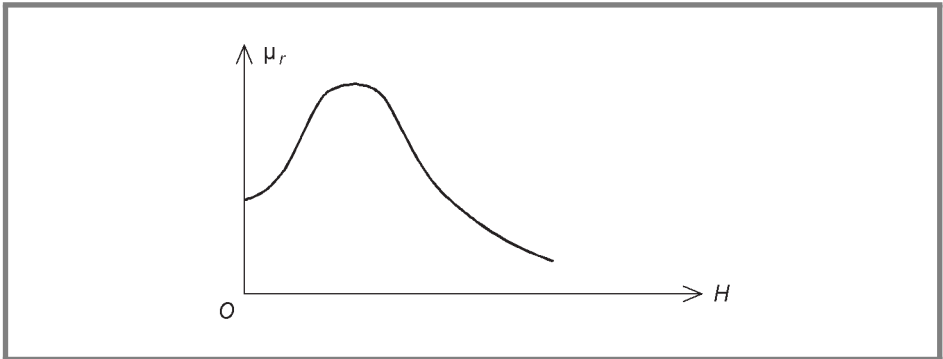


Figure 1.10 – Variations de la perméabilité relative d'un matériau ferromagnétique.

Réfraction des lignes de champ

On considère la surface de séparation entre deux milieux différents, par exemple un matériau ferromagnétique doux et l'air (*figure 1.11*). La conservation du flux entraîne la continuité de la composante normale du champ magnétique :

$$B_{N1} = B_{N2}$$

Par ailleurs, le théorème d'Ampère implique, en l'absence de courants surfaciques, la continuité de la composante tangentielle de l'excitation magnétique :

$$H_{T1} = H_{T2}$$

En introduisant les perméabilités des deux milieux, on peut écrire :

$$\frac{B_{T1}}{\mu_1} = \frac{B_{T2}}{\mu_2}$$

Si α_1 et α_2 sont les angles entre les lignes de champ dans chaque milieu et la normale au point de passage, on a :

$$\tan \alpha_1 = \frac{B_{T1}}{B_{N1}}$$

$$\tan \alpha_2 = \frac{B_{T2}}{B_{N2}}$$

On en déduit :

$$\frac{\tan \alpha_2}{\tan \alpha_1} = \frac{\mu_2}{\mu_1}$$

Si le milieu 2 est l'air, on peut introduire la perméabilité relative :

$$\tan \alpha_2 = \frac{1}{\mu_r} \tan \alpha_1$$

Comme μ_r est très élevé pour un matériau ferromagnétique, $\tan \alpha_2$ est très faible et donc α_2 est presque nul. On en déduit une propriété très importante : dans l'air, les lignes de champ sont presque orthogonales à la surface des matériaux ferromagnétiques doux.

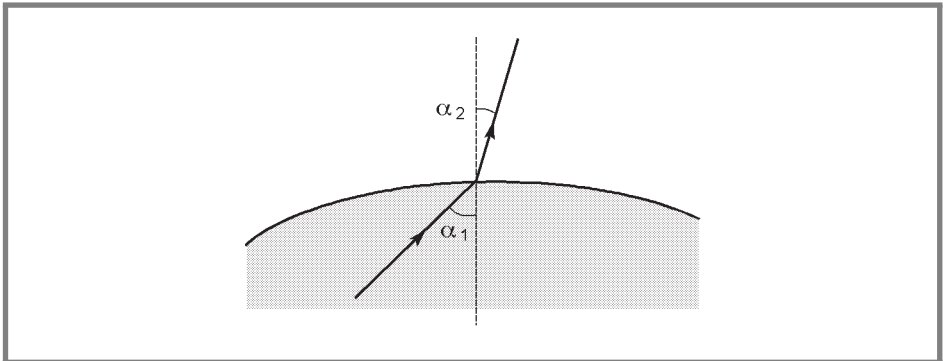


Figure 1.11 – Réfraction des lignes de champ.

Énergie magnétique

Une certaine énergie est emmagasinée dans une bobine parcourue par un courant. On peut considérer que cette énergie est localisée dans le volume où règne le champ magnétique avec une densité volumique w . L'énergie totale est calculée en intégrant dans le volume considéré :

$$W = \iiint_{(V)} w \, dv$$

La densité volumique élémentaire d'énergie magnétique est :

$$dw = \mathbf{H} \cdot d\mathbf{B}$$

On obtient w par intégration. Compte tenu de la complexité de la relation entre H et B dans les milieux ferromagnétiques, le calcul est difficile, mais on peut donner