

MOTEURS ÉLECTRIQUES POUR LA ROBOTIQUE

Pierre Mayé

MOTEURS ÉLECTRIQUES POUR LA ROBOTIQUE

3^e édition

DUNOD

Tout le catalogue sur
www.dunod.com



Illustration de couverture :
Moteur hybride – © CPN – Fotolia.com

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



Illustrations intérieures : Alain et Ursula Bouteville
© Dunod, Paris, 2000, 2006, 2016
5 rue Laromiguière 75005 Paris
www.dunod.com
ISBN 978-2-10-074257-8

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^o et 3^o a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.



TABLE DES MATIÈRES

Introduction	1
<hr/>	
CHAPITRE 1 - GÉNÉRALITÉS	3
<hr/>	
1.1 Actionneurs de la robotique	3
1.1.1 Particularités des moteurs utilisés en robotique	3
1.1.2 Avantages des actionneurs électriques	4
1.1.3 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 Constitution	36
2.1.2 Topographie du champ magnétique	37
2.1.3 Rôle du collecteur	39
2.1.4 Conception de l'enroulement	42
2.1.5 Machines multipolaires	44
2.1.6 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

CHAPITRE 3 - RÉGIMES DE FONCTIONNEMENT D'UN MOTEUR À COURANT CONTINU 65

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

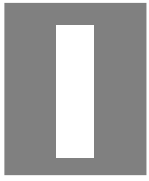
CHAPITRE 4 - ALIMENTATION ÉLECTRONIQUE DES MOTEURS À COURANT CONTINU		92
4.1	Alimentation utilisant des composants actifs en régime linéaire .	92
4.1.1	Principe	92
4.1.2	Améliorations	95
4.1.3	Insuffisance des circuits linéaires	101
4.2	Alimentation utilisant des composants actifs en commutation . .	102
4.2.1	Principe du hacheur	102
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
4.3	Exemples de réalisation	115
4.3.1	Alimentation en courant utilisant un seul circuit intégré	115
4.3.2	Alimentation en courant utilisant deux circuits intégrés	123
CHAPITRE 5 - MOTEURS À COURANT CONTINU SANS BALAIS . .		125
5.1	Généralités	125
5.1.1	Description	125
5.1.2	Principe	126
5.1.3	Avantages	128
5.2	Différentes configurations d'enroulements	129
5.2.1	Moteur à trois phases en étoile à alimentation bidirectionnelle	129
5.2.2	Moteur à trois phases en étoile à alimentation unidirectionnelle	130
5.2.3	Moteur à trois phases en triangle	133
5.2.4	Moteur à quatre phases en étoile à alimentation bidirectionnelle	135
5.2.5	Moteur à quatre phases en étoile à alimentation unidirectionnelle	137
5.2.6	Moteur à quatre phases en carré	138

5.3	Modélisation	139
5.3.1	Schéma électrique d'une phase	139
5.3.2	Modélisation de la machine	139
5.4	Technologie	140
5.4.1	Stator	140
5.4.2	Rotor	142
5.4.3	Moteurs à structure inversée	143
5.4.4	Moteurs à électronique intégrée	144
<hr/>		
CHAPITRE 6 - ALIMENTATION ÉLECTRONIQUE DES MOTEURS À COURANT CONTINU SANS BALAIS		145
<hr/>		
6.1	Généralités	145
6.1.1	Structure globale	145
6.1.2	Alimentation en tension ou en courant	146
6.1.3	Alimentation unidirectionnelle ou bidirectionnelle	146
6.2	Éléments de l'alimentation	146
6.2.1	Commutateur de puissance	146
6.2.2	Capteurs	148
6.2.3	Logique de commande	150
6.2.4	Commande de la tension ou du courant	151
6.3	Exemples de réalisations	152
6.3.1	Alimentation en courant utilisant un seul circuit intégré	152
6.3.2	Alimentation en courant utilisant plusieurs circuits intégrés	153
<hr/>		
CHAPITRE 7 - MOTEURS PAS-À-PAS		157
<hr/>		
7.1	Généralités	157
7.1.1	Définition	157
7.1.2	Historique	158
7.1.3	Avantages	158
7.1.4	Inconvénients	158
7.1.5	Applications	158
7.2	Différents types	159
7.2.1	Moteur à aimant	159
7.2.2	Moteurs à réluctance variable	172
7.2.3	Moteur hybride	176

7.3	Modélisation	178
7.3.1	Moteur à réluctance variable	178
7.3.2	Moteur à aimant	181
7.3.3	Moteur hybride	184
7.4	Comportement mécanique	184
7.4.1	Positions d'équilibre	184
7.4.2	Déplacement d'un pas	185
7.4.3	Enchaînement des commutations	189
7.5	Exemple	192
<hr/>		
CHAPITRE 8 - ALIMENTATION ÉLECTRONIQUE DES MOTEURS PAS-À-PAS		194
<hr/>		
8.1	Généralités	194
8.1.1	Structure globale	194
8.1.2	Alimentation en tension ou en courant	195
8.1.3	Alimentation unidirectionnelle ou bidirectionnelle	196
8.1.4	Accessibilité des enroulements	196
8.2	Alimentation en tension	198
8.2.1	Circuit de base	198
8.2.2	Amélioration de la décroissance du courant	201
8.2.3	Amélioration de la montée du courant	206
8.3	Alimentation en courant	212
8.3.1	Structure de base	212
8.3.2	Fonctionnement avec mesure du maximum et du minimum du courant	214
8.3.3	Fonctionnement avec mesure du maximum du courant et temps de coupure constant	218
8.3.4	Fonctionnement en modulation de largeur d'impulsions	220
8.4	Exemples de réalisations	221
8.4.1	Alimentation unidirectionnelle en tension pour moteur à quatre phases	221
8.4.2	Alimentation bidirectionnelle en courant pour moteur à deux phases	223
8.4.3	Alimentation pour fonctionnement à pas réduit	223
8.4.4	Alimentation pour fonctionnement en micro-pas	226

<hr/>	
CHAPITRE 9 - MÉCANISMES ASSOCIÉS AUX MOTEURS	230
<hr/>	
9.1 Réducteur de vitesse	230
9.1.1 Principe	230
9.1.2 Modèle du réducteur idéal	232
9.1.3 Optimisation d'un réducteur	233
9.1.4 Réalisations industrielles	233
9.1.5 Autre système de conversion entre mouvements de rotation	233
9.2 Mécanismes assurant la conversion d'un mouvement d'une rotation en translation	234
9.2.1 Système poulies et courroies crantées	234
9.2.2 Système vis et écrou	236
<hr/>	
CHAPITRE 10 - ÉCHAUFFEMENT DES MOTEURS	238
<hr/>	
10.1 Généralités	238
10.1.1 Causes	238
10.1.2 Conséquences	239
10.2 Étude générale des échanges thermiques	239
10.2.1 Lois de base	239
10.2.2 Analogie électrique	241
10.3 Modélisation thermique des moteurs	242
10.3.1 Machine pouvant être considérée comme un système à un corps	242
10.3.2 Machine pouvant être considérée comme un système à deux corps	242
10.4 Régimes de fonctionnement thermique	243
10.4.1 Régime continu	243
10.4.2 Régime temporaire	247
10.4.3 Régime intermittent	248
10.5 Couple thermiquement équivalent	251
<hr/>	
CHAPITRE 11 - MESURE DES PARAMÈTRES D'UN MOTEUR	252
<hr/>	
11.1 Matériel de mesure	252
11.1.1 Banc de test	252
11.1.2 Mesures électriques	253
11.1.3 Mesures mécaniques	254

11.2	Mesure de la constante du moteur	254
11.2.1	Cas du moteur à courant continu	254
11.2.2	Cas du moteur à courant continu sans balais	256
11.3	Mesure des paramètres électriques	257
11.3.1	Résistance	257
11.3.2	Inductance	258
11.4	Mesure des paramètres mécaniques	260
11.4.1	Couple de pertes	260
11.4.2	Moment d'inertie	261
<hr/>		
CHAPITRE 12 - ASSERVISSEMENT DE LA VITESSE ET DE LA POSITION		267
<hr/>		
12.1	Asservissement de vitesse	267
12.1.1	Nécessité	267
12.1.2	Description du système	268
12.1.3	Principe de fonctionnement	269
12.1.4	Exemples de réalisations	270
12.2	Asservissement de position	270
12.2.1	Nécessité	270
12.2.2	Description du système	272
12.2.3	Principe de fonctionnement	273
12.3	Servomoteur	273
12.3.1	Description	273
12.3.2	Commande	274
	Annexe	275
	Lexique	283
	Bibliographie	285
	Index	286



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.



ÉNÉRALITÉS

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 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.

1.1.2 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 secteur, 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 . . .).

1.1.3 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.

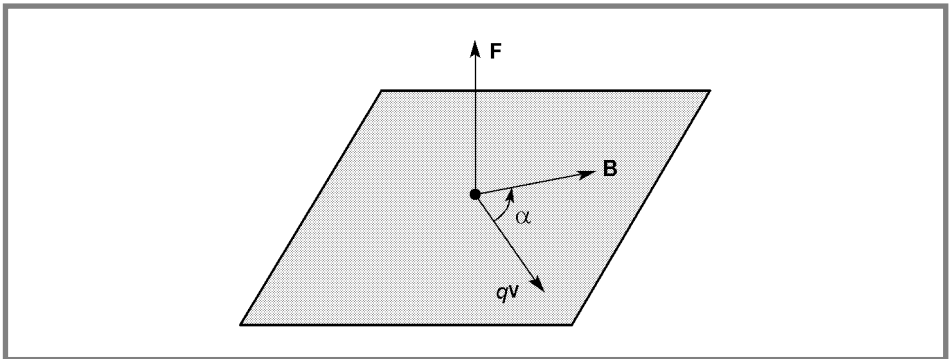


Figure 1.1 – Direction et sens de la force exercée par un champ magnétique sur une particule chargée.

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.

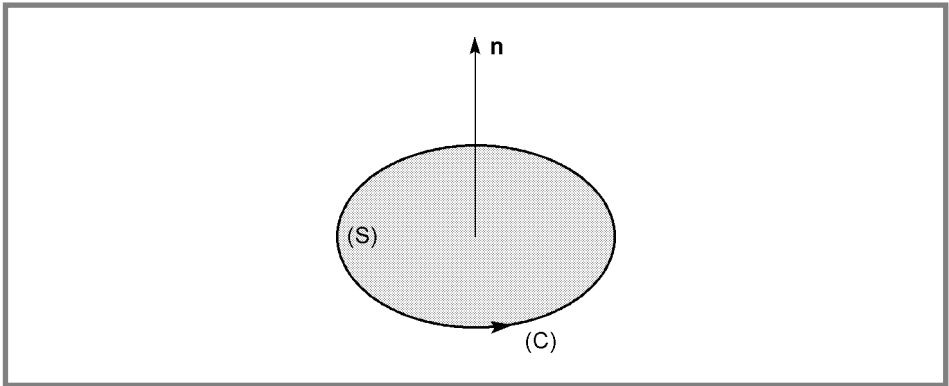


Figure 1.2 – Orientation de la normale.

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 :

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

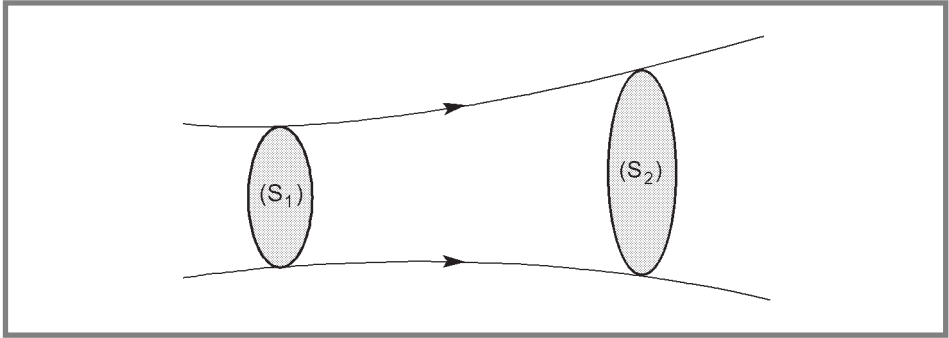


Figure 1.3 – Tube de champ magnétique.

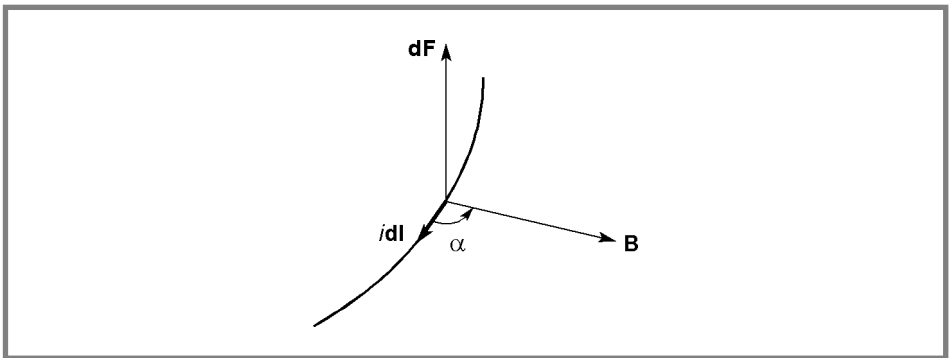


Figure 1.4 – Direction et sens de la force de Laplace.

Travail des forces magnétiques

On considère le déplacement d'un circuit fermé (C) dans un champ magnétique 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 :

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

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

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

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

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

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 :

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

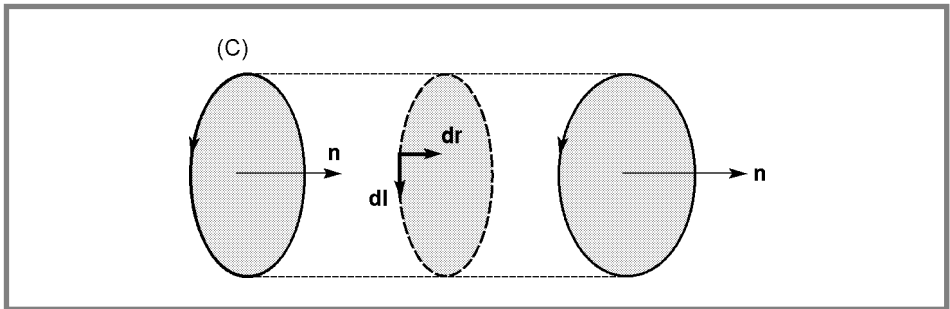


Figure 1.5 – Flux coupé par le déplacement d'un circuit.

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 :

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

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 :

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

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 :

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

On définit alors le flux total dans la bobine :

$$\psi = N\varphi$$

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 :

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

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 (ampériens). 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).

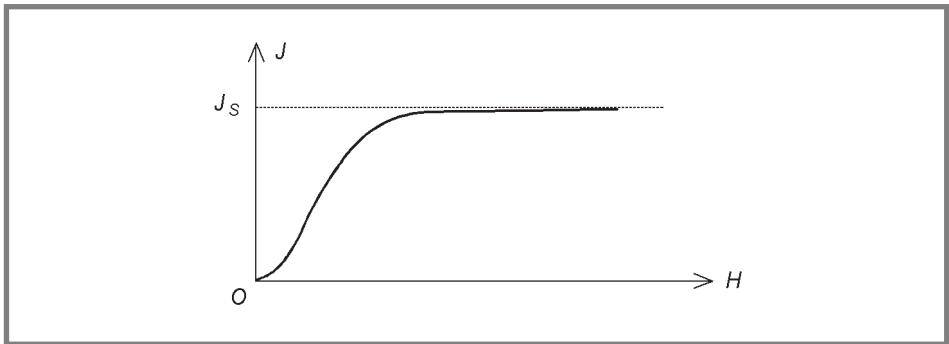


Figure 1.6 – Courbe de première aimantation (coordonnées H, J).

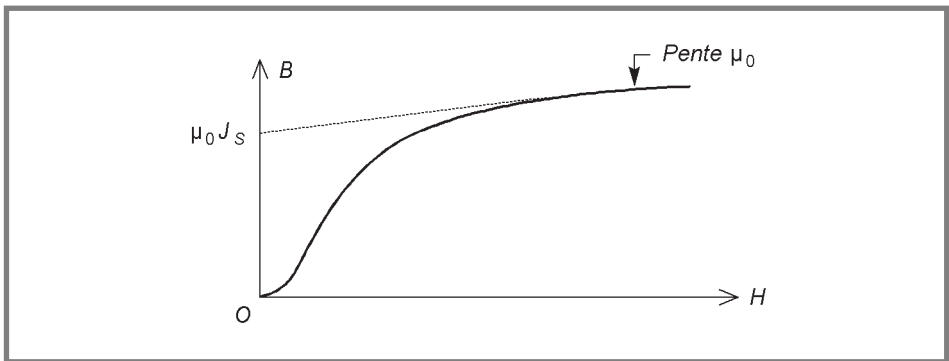


Figure 1.7 – Courbe de première aimantation (coordonnées H, B).

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).