

Moteurs électriques industriels

Moteurs électriques industriels

3^e édition

Pierre Mayé

DUNOD

Illustration de couverture :
Smoczyslaw/shutterstock.com

© Dunod, 2005, 2011, 2021
11, rue Paul Bert – 92240 Malakoff
ISBN 978-2-10-082328-4

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° 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
Chapitre 1 • Généralités	3
1.1 Introduction	3
1.2 Historique	4
1.3 Constitution	7
1.4 Comportement mécanique du moteur	8
1.5 Méthodes d'étude et de modélisation des moteurs	15
Chapitre 2 • Lois physiques régissant le fonctionnement des moteurs	19
2.1 Équations de Maxwell	19
2.2 Effet de peau	25
2.3 Logiciels de calcul des champs	43
Chapitre 3 • Tension magnétique d'entrefer d'un moteur alternatif	45
3.1 Enroulements triphasés	45
3.2 Création de la tension magnétique d'entrefer	52
3.3 Tension magnétique tournante	71
Chapitre 4 • Conversion électromécanique	91
4.1 Étude générale	91
4.2 Origine du couple électromagnétique dans les moteurs	96
4.3 Tenseur des contraintes de Maxwell	106
Chapitre 5 • Pertes et échauffements	113
5.1 Pertes et rendement	113
5.2 Échauffement	134
Chapitre 6 • Transformations utilisées dans l'étude des moteurs alternatifs	149
6.1 Transformation triphasé-diphasé	149
6.2 Transformation de Park	154
6.3 Vecteurs d'espace	162

Chapitre 7 • Principe et modélisation du moteur asynchrone	171
7.1 Généralités	171
7.2 Principe	174
7.3 Modélisation	175
7.4 Application de la transformation de Park	179
7.5 Vecteurs d'espace	191
Chapitre 8 • Moteur asynchrone en régime permanent	201
8.1 Simplification des équations	201
8.2 Modèles équivalents	203
8.3 Puissances et rendement	212
8.4 Couple électromagnétique	214
8.5 Influence des harmoniques	223
8.6 Cage d'écureuil	229
Chapitre 9 • Mise en œuvre des moteurs asynchrones	237
9.1 Moteur asynchrone à cage alimenté à fréquence fixe	237
9.2 Moteur asynchrone à rotor bobiné	259
9.3 Moteur asynchrone à cage alimenté à fréquence variable	265
Chapitre 10 • Principe et modélisation du moteur synchrone	277
10.1 Généralités	277
10.2 Principe	283
10.3 Modélisation	284
10.4 Application de la transformation de Park	295
10.5 Ondulation du couple	304
Chapitre 11 • Moteur synchrone en régime permanent	307
11.1 Simplification des équations	307
11.2 Diagrammes vectoriels	312
11.3 Puissances et rendement	314
11.4 Couple	315
Chapitre 12 • Mise en œuvre des moteurs synchrones	325
12.1 Moteur synchrone alimenté à fréquence fixe	325
12.2 Moteur synchrone alimenté à fréquence variable	335
Chapitre 13 • Moteur à réluctance variable	345
13.1 Généralités	345
13.2 Principe	347

13.3	Modélisation	350
13.4	Alimentation électronique	356
Chapitre 14 • Moteur à courant continu		363
14.1	Généralités	363
14.2	Principe	367
14.3	Modélisation	376
14.4	Étude énergétique	380
14.5	Caractéristiques suivant le mode d'excitation	381
14.6	Alimentation par convertisseur électronique	388
Biographies		392
Bibliographie		399
Index		403

INTRODUCTION

Les moteurs électriques sont aujourd'hui présents dans toutes les branches de l'industrie. Ils constituent la force motrice principale de nombreux processus. Le domaine des transports fait aussi largement appel aux moteurs électriques. La traction ferroviaire est depuis longtemps acquise à cette technique. Dans le domaine des véhicules routiers, le moteur électrique rencontre plus de difficultés pour remplacer le moteur thermique. La prise de conscience croissante des enjeux environnementaux a néanmoins conduit à une percée des voitures électriques et hybrides qui devrait s'amplifier dans les prochaines années.

Cet ouvrage s'intéresse aux moteurs électriques utilisés dans l'industrie et les transports. Nous n'avons pas traité ici des machines employées dans les applications domestiques et des petits actionneurs électriques de la robotique, les dispositifs de faible puissance employés dans ces domaines étant plus particuliers.

L'ouvrage est principalement consacré aux moteurs alternatifs qui occupent aujourd'hui la plus grande partie du marché. La notion de champ tournant est développée car elle est à la base de toutes les réalisations. Les principes généraux de la conversion électromécanique permettent de comprendre le fonctionnement des moteurs utilisés. Nous approfondissons ensuite le cas du moteur asynchrone qui occupe la plus grande place dans les applications. La machine synchrone est également étudiée en détail, en distinguant les machines à rotor bobiné utilisées en forte puissance et les machines à aimants permanents rencontrées aux puissances faibles ou moyennes. La modélisation de ces moteurs fait largement appel à la transformation de Park et aux vecteurs d'espace, outils indispensables à la commande. Le fonctionnement en régime permanent est déduit de cette étude générale. Nous nous intéressons ensuite à la mise en œuvre de ces machines.

Deux autres types de moteurs sont étudiés plus succinctement. Le moteur à réluctance variable, solution intéressante pour certaines applications, a sans doute un avenir prometteur. Le moteur à courant continu, grand classique de la vitesse variable, est, lui, en voie d'extinction progressive, mais il est encore présent dans les installations actuelles.

La bibliographie comporte les traités classiques d'électrotechnique qui présentent les machines électriques sous un aspect plus traditionnel, mais qui restent intéressants pour de nombreuses notions, ainsi que des livres plus récents qui développent la commande électronique des moteurs que nous ne faisons qu'évoquer dans cet ouvrage. Enfin, de courtes notices biographiques tentent de faire connaître un peu mieux quelques scientifiques ou ingénieurs qui ont laissé leur nom à une théorie ou à une réalisation dans le domaine des moteurs électriques.

1.1 INTRODUCTION

1.1.1 Définition

Un **moteur électrique** est une machine qui transforme de l'énergie électrique en énergie mécanique.

1.1.2 Utilisation

Les moteurs électriques sont aujourd'hui présents dans toutes les branches de l'industrie et des transports. Ils consomment environ la moitié de l'énergie électrique générée dans le monde. Beaucoup de moteurs sont branchés directement sur le réseau, mais de plus en plus, ils sont associés à des convertisseurs électroniques permettant une variation de leur vitesse.

1.1.3 Intérêt

Les moteurs électriques effectuent une conversion d'énergie avec de faibles pertes : le rendement des grosses unités atteint 99 %. Le réseau électrique est partout disponible dans les pays développés et l'énergie électrique est ainsi facilement distribuée. Le réglage est commode grâce à l'électronique de puissance. Enfin, les moteurs électriques ne sont pas polluants, ce qui ne doit toutefois pas faire oublier qu'il n'en est pas toujours de même pour la production d'électricité.

1.1.4 Classification

La puissance des moteurs électriques peut aller de quelques fractions de watts à quelques centaines de mégawatts. Les très petites puissances correspondent à des machines où la transmission d'information prime sur la conversion d'énergie. Les petites puissances se rencontrent principalement dans les applications domestiques. Ces deux domaines, qui utilisent des technologies particulières, ne sont pas abordés dans cet ouvrage qui se consacre aux moteurs industriels dont la puissance est au moins de l'ordre du kilowatt. Nous y avons également inclus les moteurs utilisés dans les transports qui font appel aux mêmes technologies.

Les machines électriques industrielles classiques sont :

- le moteur asynchrone ;
- le moteur synchrone ;

– le moteur à courant continu.

Le moteur à réluctance, d'apparition plus récente, occupe un créneau particulier des applications.

1.2 HISTORIQUE

1.2.1 Bases de l'électromagnétisme

Les grandes découvertes dans le domaine de l'électromagnétisme se sont échelonnées dans la première moitié du XIX^e siècle. C'est cette branche de la physique qui est à la base de l'électrotechnique et en particulier de l'avènement des moteurs électriques. Le physicien danois Hans Christian Oersted découvre en 1819 l'effet magnétique du courant électrique. Il observe qu'une aiguille aimantée placée à proximité d'un conducteur dévie quand on branche celui-ci sur une pile. Le physicien britannique Michael Faraday établit les lois qui régissent les phénomènes d'induction en 1831. Les bases d'électromagnétisme nécessaires à l'étude des moteurs électriques sont dès lors connues.

Le physicien écossais James Clerk Maxwell formalise les lois de l'électromagnétisme. Il commence par mathématiser les résultats obtenus plus tôt par Faraday. En 1864, il publie les travaux qui contiennent les équations qui portent aujourd'hui son nom. La parution en 1873 de son ouvrage *Treatise on Electricity and Magnetism* permet de répandre ses méthodes alors novatrices.

1.2.2 Premières réalisations

Les historiens des sciences et techniques ont quelques incertitudes sur les premières réalisations et la paternité des inventions des machines électriques. Nous essaierons néanmoins de citer quelques noms et quelques dates de cette aventure industrielle. Michael Faraday réalise un premier moteur électromagnétique en 1821. Il est suivi de peu par Peter Barlow qui invente en 1822 un dispositif qui porte aujourd'hui son nom, la roue de Barlow. Le physicien et chimiste Moritz Hermann von Jacobi réalise un moteur à inducteur bobiné à commutateur mécanique en 1834. Il fait circuler un canot à hélice équipé de son moteur sur la Neva à Saint-Petersbourg. L'industriel allemand Werner von Siemens construit vers 1856 une magnéto. L'Italien Antonio Pacinotti introduit en 1859 une machine munie d'un rotor en forme d'anneau. Cinq ans plus tard, il publie la description d'une machine pouvant être utilisée en moteur ou en générateur. Ses travaux passent alors inaperçus. L'inventeur belge, installé en France, Zénobe Gramme construit en 1868 sa célèbre dynamo et fonde en 1871 la Société des machines magnéto-électriques Gramme. La réversibilité de la dynamo est découverte en 1873. En 1872, Werner von Siemens prend un brevet pour son induit en tambour. Nikola Tesla, alors étudiant, propose déjà d'utiliser une machine sans commutateur. Devenu employé de la *Continental Edison Company* en France, il construit le premier moteur asynchrone en 1883 alors qu'il séjourne à Strasbourg et dépose un brevet en 1884. Les moteurs classiques utilisés aujourd'hui sont donc déjà tous connus en cette fin de XIX^e siècle. À la même époque, l'Italien Galileo Ferraris établit la théorie du champ tournant.

1.2.3 Apparition et développement de l'électronique de puissance

Paradoxalement, ce ne sont pas les progrès dans la technique des moteurs électriques qui ont donné une nouvelle accélération à leur développement, mais les découvertes dans le domaine des composants électroniques de puissance. Jusque dans les années 1960, les possibilités de variation de vitesse des moteurs électriques étaient assez limitées. L'association de plusieurs machines en groupes tournants était une solution lourde à mettre en œuvre. L'apparition du thyristor puis le développement de ses applications allaient apporter de nouvelles possibilités jusqu'alors insoupçonnées. Les hacheurs à thyristors apparaissent à la fin des années 1960 et commencent à être appliqués à des domaines tels que la traction ferroviaire.

1.2.4 Évolution récente

Les moteurs sont de plus en plus souvent associés à des convertisseurs électroniques de puissance. Leurs caractéristiques doivent donc être adaptées à cet usage. Les évolutions concernent à la fois les machines elles-mêmes, l'électronique de puissance qui les alimente, mais encore plus l'électronique numérique qui réalise les commandes. Du côté des moteurs, les progrès récents sont dus :

- à l'amélioration de la qualité des matériaux ;
- à l'apparition d'aimants performants ;
- à une meilleure maîtrise du refroidissement ;
- à une optimisation des caractéristiques par l'emploi de logiciels de plus en plus sophistiqués.

Dans les trois dernières décennies du ^{xx}e siècle, l'électronique de puissance continue de se perfectionner avec l'apparition et le développement de nouveaux composants : thyristors blocables par la gâchette (GTO), IGBT. Cela permet son utilisation dans tous les domaines d'application des moteurs électriques. Pour la commande, c'est l'apparition de processeurs rapides (DSP : *Digital signal processor*) qui permet enfin de développer l'usage des moteurs alternatifs à vitesse variable. Les moteurs utilisés sont toujours ceux des débuts, mais avec une importance relative qui a beaucoup évolué, la machine à courant continu étant en voie d'extinction, alors que la machine asynchrone ne cesse d'accroître sa prépondérance, concurrencée uniquement dans quelques domaines par le moteur synchrone et le moteur à réluctance variable.

1.2.5 Exemple d'évolution : la traction ferroviaire

Pendant longtemps, la solution classique en France pour l'équipement des locomotives électriques a été le moteur à courant continu à excitation série. Ses caractéristiques sont en effet parfaitement adaptées aux contraintes imposées dans le domaine de la traction ferroviaire. Le TGV sud-est a encore été équipé de moteurs à courant continu alimentés par des hacheurs. Devant les limitations inhérentes à l'emploi de machines à collecteur, les ingénieurs ont cherché à les remplacer par des moteurs à courants alternatifs. C'est d'abord la machine synchrone autopilotée alimentée par un onduleur de courant à thyristors qui a amené une première amélioration des performances. Le TGV atlantique et les locomotives Sybic ont été ainsi

équipés. Cet emploi des moteurs synchrones n'a été que de courte durée, les progrès réalisés dans la technologie des composants de l'électronique de puissance ont conduit à l'étape suivante qui a été l'apparition du moteur asynchrone alimenté par des onduleurs de tension à GTO. Le TGV transmanche et les locomotives Astride utilisent cette solution. Dans cette évolution, les moteurs ont surtout gagné en puissance massique.

1.2.6 Une utilisation récente : la propulsion navale

Le moteur électrique conquiert des domaines d'application où il était traditionnellement absent ou peu répandu : il faut ainsi citer la propulsion de bateaux de toutes tailles et, en particulier celle des grands navires. La propulsion navale a été pendant longtemps l'apanage du moteur diesel, mais les constructeurs font appel de plus en plus à des moteurs électriques alimentés par des alternateurs eux-mêmes entraînés par un moteur diesel. Cette solution, qui semble compliquer les choses inutilement, apporte une souplesse de fonctionnement impossible à obtenir avec un moteur diesel entraînant directement l'arbre d'hélice. Le couple de démarrage est plus élevé et les manœuvres à faible vitesse sont facilitées.

Notons que les sous-marins militaires utilisent fréquemment la propulsion électrique depuis longtemps, mais pour une raison bien particulière : la discrétion acoustique nécessaire à leur tâche. Un premier sous-marin équipé d'un moteur électrique alimenté par des batteries est construit en 1860. Dès le début du XX^e siècle, plusieurs gros sous-marins emploient la propulsion électrique. À partir des années 1920, cette solution est retenue pour plusieurs bâtiments militaires de surface. Quelques réalisations concernent des bateaux civils, mais sans l'électronique de puissance, le moteur électrique ne présente pas suffisamment d'avantages. La solution est toutefois adaptée à des cas particuliers comme les navires brise-glace qui ont besoin d'un couple élevé à faible vitesse.

Depuis les années 1990, les bateaux de croisière utilisent également la propulsion électrique. Cette solution a l'avantage d'employer les mêmes alternateurs pour les moteurs et pour le réseau de bord, ce qui optimise le coût de l'installation. La dissociation des moteurs diesel et des arbres d'hélices laisse une plus grande liberté d'aménagement du bateau. Enfin, la réduction des vibrations transmises à la structure participe au confort des passagers. La propulsion navale fait habituellement usage de moteurs synchrones à pôles saillants alimentés par des convertisseurs de fréquence à thyristors. Par exemple, l'équipement du navire « Star Princess » est de deux moteurs synchrones de 12 MW, un par hélice.

1.2.7 Un domaine en plein développement : la voiture électrique

La voiture électrique a une longue histoire. L'idée d'utiliser un moteur électrique pour entraîner un véhicule est très ancienne et les premières expérimentations datent des années 1830. C'est toutefois l'invention de l'accumulateur au plomb par Gaston Planté en 1859 qui permet de disposer d'une source d'énergie adaptée. Dès lors, les prototypes se multiplient. La commercialisation de la voiture électrique se développe à la fin du XIX^e siècle, alors que la voiture à moteur thermique n'en est qu'à ses balbutiements. Cependant, l'apparition de la *Ford T* en 1908

annonce de profonds changements grâce à son coût raisonnable lié à une production en chaîne. La faible autonomie de la voiture électrique conduit à son déclin progressif et, à partir des années 1920, la suprématie des voitures à moteur thermique est durablement établie. Jusqu'à la fin du XX^e siècle, la voiture électrique ne fait que des apparitions sporadiques, sans grand succès. On peut néanmoins noter quelques réalisations dans le domaine des véhicules utilitaires urbains. Par exemple, en France, les camions *Sovel* sont utilisés dans les années 1940 à 1960 pour le ramassage des ordures ménagères dans de nombreuses agglomérations, mais aussi pour les livraisons (en particulier des brasseries dans le Nord et l'Est), le nettoyage ou les travaux d'entretien routier.

Il faut attendre la fin du XX^e siècle pour que les préoccupations écologiques remettent à l'honneur les véhicules électriques. Les débuts sont difficiles et conduisent à plusieurs échecs commerciaux. L'autonomie reste limitée malgré les progrès réalisés dans le domaine des batteries au lithium. Le coût élevé des voitures électriques constitue un frein à leur développement. Le succès commence à poindre au début du XXI^e siècle grâce aux aides à l'achat lancées par de nombreux gouvernements. Le développement des véhicules électriques se poursuit plus ou moins rapidement en fonction des décisions politiques prises pour les favoriser.

Tous les types classiques de machines électriques sont utilisés pour la motorisation des véhicules électriques. Historiquement, le moteur à courant continu a longtemps été la seule solution possible, en attendant l'avènement de l'électronique de commande. C'est encore lui qui est utilisé pour les réalisations apparues à la fin du XX^e siècle, ce qui peut paraître un peu anachronique à un moment où le moteur à courant alternatif le remplace dans tous les domaines de l'industrie et des transports. Cette solution n'est plus retenue aujourd'hui compte tenu des inconvénients inhérents au principe de cette machine (présence du collecteur et des balais). Le moteur asynchrone équipe quelques modèles de véhicules grâce à son coût raisonnable, mais ses performances moyennes ne sont pas toujours à la hauteur dans ce domaine d'application. Le moteur synchrone à aimants se taille la part du lion du marché des véhicules électriques et hybrides, grâce ses performances élevées. Un problème apparaît néanmoins : l'approvisionnement en terres rares indispensables pour la fabrication des aimants est pratiquement un monopole chinois. Le moteur synchrone à rotor bobiné, qui ne présente pas cet inconvénient, est également une bonne solution technique : *Renault* a par exemple fait ce choix pour sa célèbre ZOE. Enfin, le moteur à réluctance variable équipe également quelques modèles, c'est une solution intéressante pour son coût modéré et son poids limité, mais qui exige un savoir-faire élaboré pour son exploitation.

1.3 CONSTITUTION

1.3.1 Stator et rotor

Sur le plan mécanique, un moteur est constitué d'une partie fixe, le **stator** et d'une partie mobile, le **rotor**, entre lesquelles se trouve un petit intervalle d'air, l'**entrefer** (*figure 1.1*). Dans pratiquement tous les moteurs, le rotor est à l'intérieur du stator, bien que la configuration inverse existe pour des applications particulières.

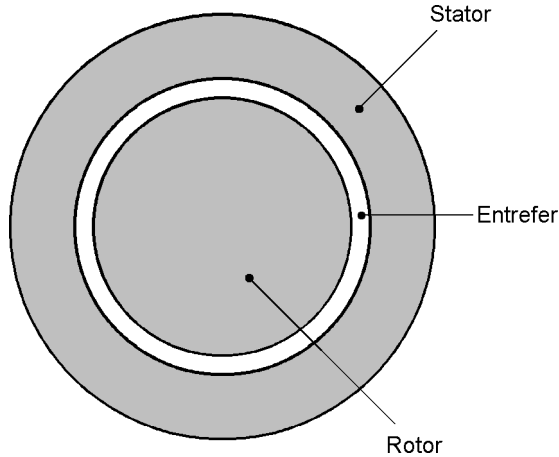


Figure 1.1 – Coupe de la structure simplifiée d'un moteur classique.

1.3.2 Circuit magnétique

Sur le plan électromagnétique, un moteur comporte un **circuit magnétique**, constitué d'un matériau ferromagnétique à forte perméabilité, d'enroulements et éventuellement d'aimants permanents. Le matériau ferromagnétique est nécessaire pour que le flux produit soit assez élevé et pour qu'il soit canalisé afin de pouvoir utiliser correctement ses effets. Les parties ferromagnétiques soumises à un flux constant ou lentement variable peuvent être massives, alors que les parties soumises à un flux à variation rapide sont obligatoirement feuilletées pour limiter les pertes par courants de Foucault.

1.3.3 Enroulements

Suivant le type de moteur, des **enroulements** peuvent être placés sur le stator, sur le rotor ou sur les deux parties à la fois. On rencontre deux types d'enroulements :

- les enroulements concentrés formés de bobines placées sur des pôles saillants (*figure 1.2*) ;
- les enroulements distribués constitués de conducteurs placés dans des encoches du circuit magnétiques et assemblés ensuite par des connexions frontales (*figure 1.3*).

1.4 COMPORTEMENT MÉCANIQUE DU MOTEUR

1.4.1 Principe fondamental de la dynamique

Le rotor et la charge entraînée forment un système de moment d'inertie J tournant à la vitesse de rotation ω autour d'un axe et soumis à un couple moteur de moment γ et à des couples résistants de moment résultant γ_r .

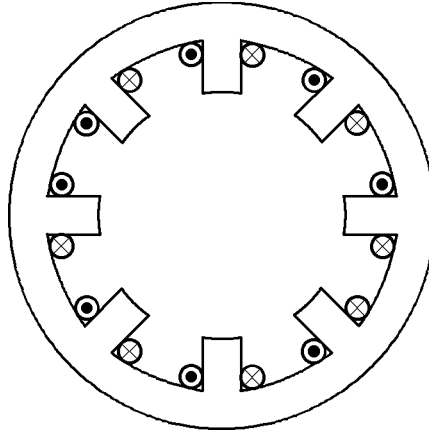


Figure 1.2 – Coupe d'un stator à pôles saillants et enroulement concentré.

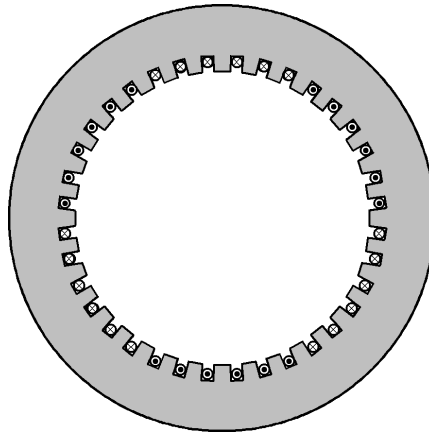


Figure 1.3 – Coupe d'un stator à encoches et enroulement distribué.

Le **principe fondamental de la dynamique** appliqué à ce système s'écrit :

$$J \frac{d\omega}{dt} = \gamma - \gamma_r$$

Le couple moteur est dû à la conversion électromécanique réalisée par la machine. Le couple résistant résulte d'une cause interne (frottements) et d'une cause externe (charge entraînée).

En régime permanent, la vitesse est constante et la relation précédente traduit alors l'égalité du couple moteur et du couple résistant :

$$\gamma = \gamma_r$$

Il est alors souvent commode de retrancher le moment du couple correspondant aux pertes internes afin de faire apparaître le moment γ_u du couple utile du moteur et le moment γ_c du couple résistant de la charge :

$$\gamma_u = \gamma_c$$

1.4.2 Moment d'inertie

Le **moment d'inertie** du rotor chiffre la façon dont le moteur s'oppose aux variations de vitesse. Plus le moment d'inertie est grand, plus il faut un couple élevé pour obtenir une accélération donnée. Comme le couple est une grandeur importante pour le dimensionnement du moteur, on a tout intérêt à avoir un faible moment d'inertie. Ce dernier dépend à la fois de la masse des parties mobiles et de la façon dont elles sont placées par rapport à l'axe de rotation. En effet, le moment d'inertie d'un solide (V) par rapport à un axe (Δ) est défini par :

$$J = \iiint_{(V)} r^2 \rho \, dv$$

r est la distance d'un point M du solide à l'axe, ρ est la masse volumique en ce point, et dv est l'élément de volume. L'intégrale triple est étendue à tous les points du solide. On peut donner une expression simple de J dans des cas particuliers. Par exemple, considérons un cylindre plein et homogène (*figure 1.4*) de masse m , de rayon R et de longueur l . La masse volumique est :

$$\rho = \frac{m}{\pi R^2 l}$$

Le moment d'inertie par rapport à l'axe du cylindre se calcule en considérant des nappes cylindriques de rayon r et d'épaisseur dr :

$$J = \int_0^R r^2 \rho 2\pi r l \, dr$$

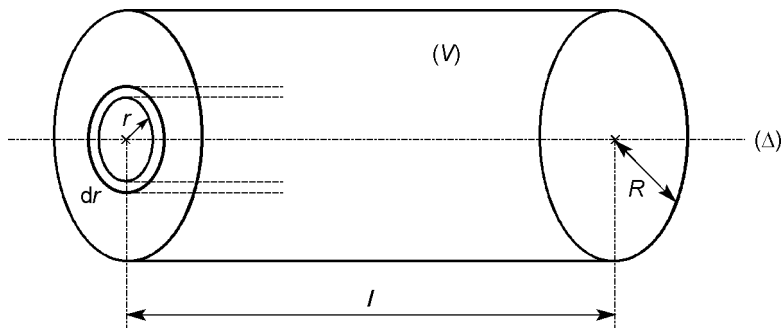


Figure 1.4 – Découpage d'un cylindre en nappes cylindriques pour le calcul de son moment d'inertie.

soit :

$$J = \pi \rho l \frac{R^4}{2}$$

En introduisant la masse, on arrive à :

$$J = \frac{1}{2} m R^2$$

On constate que le moment d'inertie est d'autant plus grand que la masse est importante et que le rayon du cylindre est élevé. On retrouve un résultat analogue dans tous les cas.

1.4.3 Régime permanent

■ Caractéristiques mécaniques

La **caractéristique mécanique** d'un moteur est la courbe qui donne le moment γ_u du couple utile en fonction de la vitesse de rotation ω ou de la fréquence de rotation n . La caractéristique d'un récepteur mécanique (charge) est la courbe qui donne le moment γ_c du couple résistant en fonction de la vitesse de rotation ω ou de la fréquence de rotation n .

Dans une première approche, le couple résistant interne du moteur est négligé et le couple utile s'identifie alors au couple moteur tandis que le couple résistant de la charge s'identifie au couple résistant total.

■ Point de fonctionnement

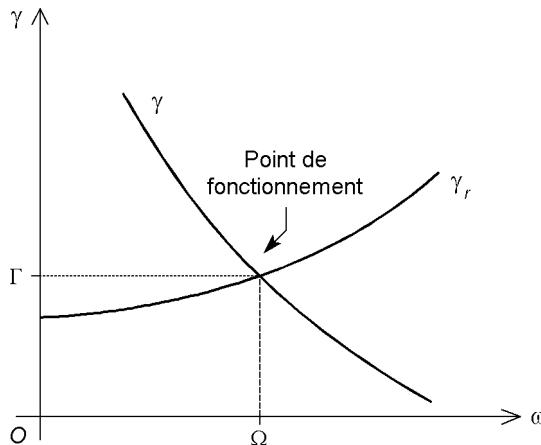


Figure 1.5 – Point de fonctionnement d'un moteur accouplé à un récepteur.

Quand le moteur est accouplé au récepteur, le point de fonctionnement se situe à l'intersection de la caractéristique mécanique du moteur et de la caractéristique du récepteur (*figure 1.5*) :

$$\gamma = \gamma_r$$

L'allure de la caractéristique du récepteur est très variable.

■ Stabilité du fonctionnement

Le fonctionnement d'un moteur en régime permanent est stable si l'action du couple moteur tend à corriger l'effet d'une perturbation qui modifie la vitesse de rotation. Si la machine ralentit, le moment du couple moteur doit devenir supérieur au moment du couple résistant, tandis que si la machine accélère, le moment du couple moteur doit devenir inférieur au moment du couple résistant. Il faut donc que :

$$\frac{d(\gamma - \gamma_r)}{d\omega} < 0$$

soit :

$$\frac{d\gamma}{d\omega} < \frac{d\gamma_r}{d\omega}$$

Graphiquement, le fonctionnement est stable si, au point de fonctionnement, la tangente à la caractéristique mécanique est au-dessous de la tangente à la caractéristique du récepteur (*figure 1.6*) et instable dans le cas contraire (*figure 1.7*).

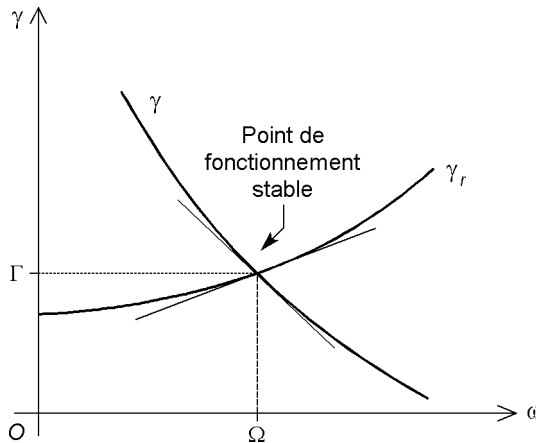


Figure 1.6 – Fonctionnement stable.

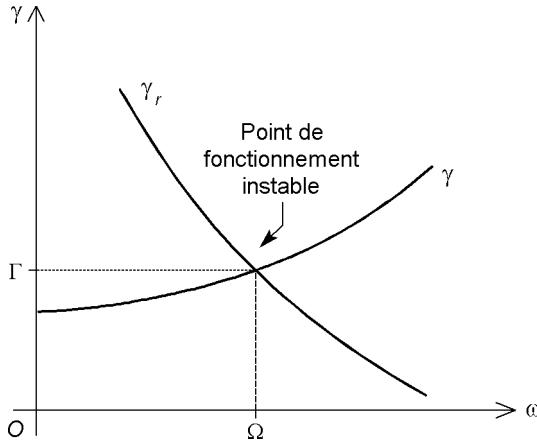


Figure 1.7 – Fonctionnement instable.

1.4.4 Démarrage

■ Condition de démarrage

Pour qu'un moteur puisse démarrer, il faut que le moment γ_d de son couple moteur quand la vitesse de rotation est nulle (appelé couple de démarrage ou de décollage) soit supérieur au moment γ_{rd} du couple résistant correspondant :

$$\gamma_d > \gamma_{rd}$$

La phase de démarrage se déroule normalement si le moment du couple moteur reste supérieur au moment du couple résistant pendant toute sa durée. Le démarrage est d'autant plus rapide que la différence entre ces deux couples est importante.

■ Durée de démarrage

La durée t_d de la phase de démarrage est obtenue en intégrant le principe fondamental de la dynamique entre la vitesse nulle et la vitesse atteinte Ω :

$$t_d = J \int_0^{\Omega} \frac{d\omega}{\gamma - \gamma_r}$$

Il n'est pas possible de donner une formule littérale pour le résultat qui est obtenu par une méthode numérique. Nous pouvons néanmoins constater que la durée du démarrage est d'autant plus longue que le moment d'inertie est élevé.

■ Bilan énergétique

En multipliant la relation fondamentale de la dynamique par ω , nous obtenons un bilan des puissances instantanées :

$$J\omega \frac{d\omega}{dt} = \gamma\omega - \gamma_r\omega$$

Il reste à intégrer entre 0 et t_d pour obtenir le bilan des énergies :

$$\frac{1}{2}J\Omega^2 = \int_0^{t_d} \gamma\omega dt - \int_0^{t_d} \gamma_r\omega dt$$

Le premier membre de cette égalité représente l'énergie cinétique du moteur en régime permanent de vitesse de rotation Ω . Le premier terme de la différence apparaissant au second membre est l'énergie fournie par le couple moteur pendant la phase de démarrage et le deuxième terme est l'énergie nécessaire pour vaincre les couples résistants.

1.4.5 Freinage

■ Types de freinage

Le freinage peut être obtenu en supprimant simplement le couple moteur. C'est alors la charge et les pertes qui font décroître la vitesse jusqu'à l'arrêt. Ce mode de freinage n'est pas très rapide. Pour accélérer le phénomène, il faut imposer un couple résistant en modifiant l'alimentation électrique du moteur.

■ Durée de freinage

La durée t_f de la phase de freinage est obtenue en intégrant le principe fondamental de la dynamique entre la vitesse initiale Ω et la vitesse nulle :

$$t_f = J \int_{\Omega}^0 \frac{d\omega}{\gamma - \gamma_r}$$

■ Bilan énergétique

Reprenons le bilan des puissances instantanées :

$$J\omega \frac{d\omega}{dt} = \gamma\omega - \gamma_r\omega$$

Suivant les cas, le couple moteur peut être nul (par exemple quand on ouvre le circuit d'induit d'un moteur à courant continu à excitation indépendante) ou négatif (par exemple pour un moteur asynchrone lors du freinage par inversion du sens du champ tournant ou par injection de courant continu), ce qui correspond en réalité à un couple résistant.

Il reste à intégrer entre 0 et t_f pour obtenir le bilan des énergies :

$$-\frac{1}{2}J\Omega^2 = \int_0^{t_f} \gamma\omega dt - \int_0^{t_f} \gamma_r\omega dt$$

Le premier membre de cette égalité représente l'opposé de l'énergie cinétique du moteur en régime permanent de vitesse de rotation Ω . Le premier terme de la diffé-

rence apparaissant au second membre est l'énergie fournie par le couple moteur pendant la phase de freinage et le deuxième terme est l'énergie nécessaire pour vaincre les couples résistants.

1.5 MÉTHODES D'ÉTUDE ET DE MODÉLISATION DES MOTEURS

La modélisation de la machine est nécessaire aussi bien pour son concepteur que pour son utilisateur amené à l'intégrer dans un système complet. Suivant le besoin, différents niveaux de modélisations sont possibles.

1.5.1 Difficultés d'une modélisation élémentaire

■ Principe d'un moteur à conducteurs dans l'entrefer

Les explications élémentaires du fonctionnement d'un moteur électrique font en général appel à la loi de Laplace¹. Un conducteur de longueur l parcouru par un courant d'intensité i et placé à la périphérie du rotor d'une machine dans un champ magnétique radial (si la perméabilité des matériaux ferromagnétiques est très élevée) de norme B , est en effet soumis à une force tangentielle de norme $F = |i|Bl$. L'ensemble des forces appliquées à tous les conducteurs du rotor forme un couple qui fait tourner le moteur.

Ce raisonnement est parfaitement valable pour les petits actionneurs électriques utilisés dans le domaine de la robotique quand les conducteurs sont bien placés directement dans l'entrefer. Les moteurs à rotor discoïdal peuvent aussi être étudiés avec la loi de Laplace.

Par ailleurs, les conducteurs sont le siège d'une force électromotrice induite $e = Blv$ à cause de leur déplacement à la vitesse v dans le champ magnétique.

■ Paradoxe des encoches

Dans les moteurs industriels, les conducteurs sont placés dans des encoches, justement pour qu'ils ne soient pas soumis aux forces de Laplace qui entraîneraient des contraintes mécaniques insurmontables. Les dents en matériau ferromagnétique de grande perméabilité qui séparent les encoches canalisent les lignes de champ (*figure 1.8*).

Il en résulte que le champ magnétique auquel sont soumis les conducteurs est très faible. Le champ dans l'encoche est égal au champ dans une dent divisé par la perméabilité relative μ_r du matériau ferromagnétique. Comme μ_r est très élevée, le champ dans l'encoche est bien très petit. Les conducteurs ne sont soumis qu'à des forces de Laplace négligeables. Le raisonnement précédent ne s'applique donc pas à ces machines : ce ne sont pas les forces de Laplace qui font tourner les moteurs industriels.

La même difficulté apparaît pour la force électromotrice induite dans un conducteur. Compte tenu de la faible valeur du champ magnétique B , on pourrait penser que la

1. L'appellation « loi de Laplace » n'est utilisée qu'en France et dans certains pays francophones ; elle est inconnue ailleurs.

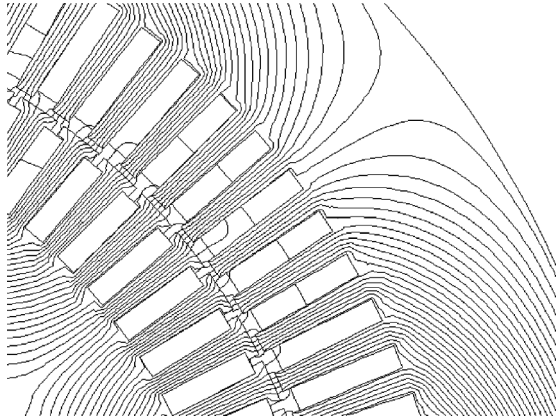


Figure 1.8 – Lignes de champ pour les encoches et les dents.

force électromotrice induite dans un conducteur placé dans une encoche est inférieure à la force électromotrice induite dans un conducteur placé directement dans l'entrefer. Ce n'est pas le cas car la vitesse v de déplacement du conducteur par rapport au champ est très élevée, les lignes de champ sautant brusquement d'une dent à la suivante (figure 1.9).

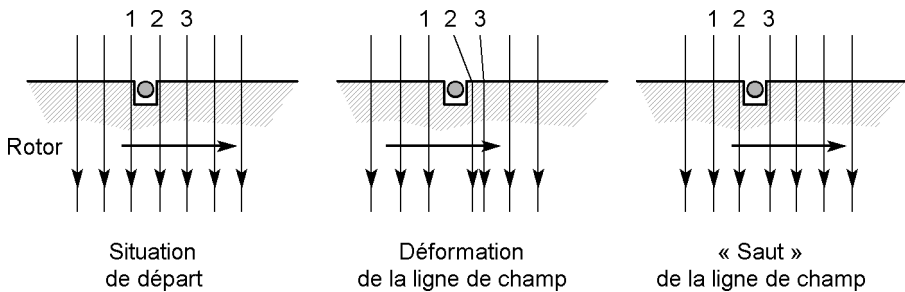


Figure 1.9 – Passage d'une ligne de champ d'une dent à la suivante (sur une représentation développée du rotor).

La forte perméabilité du matériau ferromagnétique entraîne une déformation de la ligne de champ au niveau d'une encoche car la ligne a tendance à suivre la dent qui vient de passer devant elle. Elle saute ensuite vers la dent suivante lorsque celle-ci est assez proche. Ainsi, la force électromotrice $e = Blv$ garde la même valeur que si les encoches n'existaient pas : la faiblesse de B est compensée par la valeur élevée de v . Toutefois, il ne faut pas compter sur cette formule pour calculer la force électromotrice car la détermination de v est impossible. Remarquons enfin que ces explications qualitatives sont assez artificielles : les lignes de champ n'ont pas de réalité physique, elles donnent uniquement une représentation commode de la distribution du champ magnétique.

■ Explication

En réalité, les forces électromagnétiques ne sont pas appliquées aux conducteurs, mais aux parties ferromagnétiques du rotor. Cela permet d'améliorer nettement la solidité mécanique du moteur. Néanmoins, la justification de ce fait ne peut être donnée avec les méthodes élémentaires de l'électromagnétisme.

La détermination du couple par l'application de la loi de Laplace n'est pas possible pour les moteurs industriels. Il faut faire une étude qui considère globalement les interactions électromagnétiques. Les deux méthodes utilisées pour cela sont présentées au chapitre 4 : la dérivée de la coénergie et le tenseur des contraintes de Maxwell.

Cependant, on fait souvent appel à la loi de Laplace pour présenter les principes des convertisseurs électromécaniques, mais avec des dispositifs munis de conducteurs directement placés dans l'entrefer et non dans des encoches, ce qui ne correspond pas à la réalité des moteurs industriels, hormis pour quelques réalisations très spécifiques. Nous utiliserons cette démarche pour expliquer le rôle du collecteur d'un moteur à courant continu au chapitre 14.

1.5.2 Approche interne de la modélisation

L'approche interne de la modélisation d'un moteur repose sur l'application des équations de Maxwell. Cette méthode est indispensable pour l'explication de phénomènes tels que l'effet de peau dans les conducteurs, les courants de Foucault... Compte tenu des structures complexes des machines, les calculs sur le papier deviennent vite irréalisables. Les logiciels de modélisation électromagnétique prennent alors le relais. Ces modèles sont utilisés par les concepteurs des machines.

1.5.3 Approche externe de la modélisation

L'approche externe utilise les relations entre tensions, courants, flux, avec comme paramètres les inductances, les résistances. C'est une vision en termes de circuits. Les modèles obtenus pour un fonctionnement quelconque sont assez lourds. L'application des transformations de Concordia et de Park permet de les rendre plus commodes. Les modèles simplifiés valables pour les régimes permanents sont très simples d'emploi. Les logiciels de simulation prennent le relais pour les études plus complexes comme les régimes transitoires. Ces modèles sont également ceux qui sont utilisés pour la réalisation de la commande des moteurs.

LOIS PHYSIQUES RÉGISSANT LE FONCTION- NEMENT DES MOTEURS

2

L'étude physique des moteurs fait appel aux équations de Maxwell. Dans ce chapitre, nous rappellerons la formulation générale de ces équations, puis nous discuterons des simplifications justifiées dans le domaine de l'électrotechnique. Nous étudierons ensuite un exemple caractéristique d'application : l'effet de peau dans les conducteurs d'une machine électrique. Nous décrirons enfin les logiciels qui permettent d'étudier en détail le fonctionnement d'une machine électrique.

2.1 ÉQUATIONS DE MAXWELL

2.1.1 Forme générale

Les **équations de Maxwell** décrivent les propriétés locales d'un milieu sur le plan électrique et magnétique. Elles concernent le champ électrique \mathbf{E} , le champ magnétique \mathbf{B} , le déplacement électrique \mathbf{D} et l'excitation magnétique \mathbf{H} :

$$\mathbf{rot H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\mathbf{rot E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\mathbf{div B} = 0 \quad (3)$$

$$\mathbf{div D} = \rho_q \quad (4)$$

ρ_q est la densité volumique de charge et \mathbf{J} le vecteur densité de courant.

2.1.2 Relations propres aux matériaux

La description du milieu nécessite la connaissance de relations spécifiques qui s'écrivent pour un **matériau isotrope et linéaire** :

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (5)$$

$$\boxed{\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}} \quad (6)$$

$$\boxed{\mathbf{E} = \rho \mathbf{J}} \quad (7)$$

μ est la perméabilité du matériau, ε sa permittivité et ρ sa résistivité. La dernière relation est appelée loi d'Ohm locale.

2.1.3 Régime sinusoïdal permanent

En régime sinusoïdal permanent, toutes les coordonnées des vecteurs \mathbf{E} , \mathbf{B} , \mathbf{D} , \mathbf{H} et \mathbf{J} sont des fonctions sinusoïdales du temps de même pulsation ω . Par exemple, pour le champ magnétique :

$$\mathbf{B} = B_x \sqrt{2} \mathbf{u}_x \cos(\omega t + \psi_x) + B_y \sqrt{2} \mathbf{u}_y \cos(\omega t + \psi_y) + B_z \sqrt{2} \mathbf{u}_z \cos(\omega t + \psi_z)$$

$(\mathbf{u}_x, \mathbf{u}_y, \mathbf{u}_z)$ est une base de l'espace, B_x, B_y, B_z sont les valeurs efficaces des composantes de \mathbf{B} , ψ_x, ψ_y, ψ_z sont les phases à l'origine des composantes de \mathbf{B} . Les définitions sont analogues pour les autres vecteurs.

2.1.4 Grandeurs complexes

Les calculs se simplifient en utilisant les grandeurs complexes associées aux fonctions sinusoïdales. Par exemple, les grandeurs complexes associées aux composantes du champ magnétique sont définies par :

$$\underline{B}_x = B_x e^{j\psi_x}$$

$$\underline{B}_y = B_y e^{j\psi_y}$$

$$\underline{B}_z = B_z e^{j\psi_z}$$

Il faut remarquer que l'usage est de définir les modules des grandeurs complexes comme étant les valeurs efficaces en électricité alors que dans les autres domaines de la physique, les modules sont des amplitudes. Ces deux conventions ne diffèrent que par un facteur $\sqrt{2}$ dans toutes les grandeurs, ce qui ne modifie en rien les équations, à condition que la convention soit la même partout. En électromagnétisme, nous rencontrons dans les mêmes équations des tensions, des courants, des champs magnétiques. Par commodité, nous choisirons des valeurs efficaces pour les modules de toutes ces grandeurs complexes.

Pour écrire une seule relation vectorielle plutôt que trois relations scalaires, on définit un vecteur champ magnétique complexe par :

$$\underline{\mathbf{B}} = \underline{B}_x \mathbf{u}_x + \underline{B}_y \mathbf{u}_y + \underline{B}_z \mathbf{u}_z$$

La même opération est faite pour les autres grandeurs vectorielles.

2.1.5 Équations de Maxwell pour les vecteurs complexes

Les équations de Maxwell peuvent s'écrire pour les vecteurs complexes en remarquant que dériver une fonction sinusoïdale du temps conduit à multiplier par $j\omega$ la grandeur complexe associée. Ainsi, les quatre équations de Maxwell deviennent :

$$\text{rot } \underline{\underline{\mathbf{H}}} = \underline{\underline{\mathbf{J}}} + j\omega \underline{\underline{\mathbf{D}}} \quad (8)$$

$$\text{rot } \underline{\underline{\mathbf{E}}} = -j\omega \underline{\underline{\mathbf{B}}} \quad (9)$$

$$\text{div } \underline{\underline{\mathbf{B}}} = 0 \quad (10)$$

$$\text{div } \underline{\underline{\mathbf{D}}} = \rho_q \quad (11)$$

Les relations caractéristiques du matériau peuvent également être écrites avec les vecteurs complexes : elles conservent la même forme puisqu'il ne s'agit que de relations de proportionnalité :

$$\underline{\underline{\mathbf{B}}} = \mu \underline{\underline{\mathbf{H}}} \quad (12)$$

$$\underline{\underline{\mathbf{D}}} = \varepsilon \underline{\underline{\mathbf{E}}} \quad (13)$$

$$\underline{\underline{\mathbf{E}}} = \rho \underline{\underline{\mathbf{J}}} \quad (14)$$

2.1.6 Charges dans un conducteur

En régime sinusoïdal permanent, associons l'équation de Maxwell (8) et la relation constitutive (13) :

$$\text{rot } \underline{\underline{\mathbf{H}}} = \underline{\underline{\mathbf{J}}} + j\omega \varepsilon \underline{\underline{\mathbf{E}}}$$

Prenons sa divergence :

$$\text{div}(\text{rot } \underline{\underline{\mathbf{H}}}) = \text{div } \underline{\underline{\mathbf{J}}} + j\omega \varepsilon \text{div } \underline{\underline{\mathbf{E}}}$$

Or, la divergence d'un rotationnel est nulle et la loi d'Ohm locale montre que :

$$\text{div } \underline{\underline{\mathbf{E}}} = \rho \text{div } \underline{\underline{\mathbf{J}}}$$

En remplaçant dans la formule précédente, nous arrivons à :

$$\text{div } \underline{\underline{\mathbf{J}}} + j\omega \varepsilon \rho \text{div } \underline{\underline{\mathbf{J}}} = 0$$

Il en résulte que $\text{div } \underline{\underline{\mathbf{J}}} = 0$ et donc que $\text{div } \underline{\underline{\mathbf{E}}} = 0$. L'équation de Maxwell (11) entraîne que la densité volumique de charges ρ_q est nulle.

En régime sinusoïdal permanent, la densité de charge est nulle à l'intérieur d'un conducteur homogène : l'électrisation est purement superficielle. Ce résultat n'est pas rigoureusement vrai pour un régime variable quelconque. L'étude est beaucoup plus délicate, mais on montre que les charges volumiques disparaissent au bout d'une

durée extrêmement courte. Pratiquement, les charges volumiques sont donc nulles dans les conducteurs pour tous les régimes variables rencontrés en électrotechnique.

2.1.7 Équations de Maxwell pour un milieu conducteur dans le domaine quasi-statique

En électrotechnique, les équations de Maxwell pour un milieu conducteur peuvent être simplifiées car, les fréquences n'étant pas très élevées, la dérivée du vecteur déplacement électrique est négligeable par rapport au vecteur densité de courant. Cette approximation est nommée **régime quasi-statique**. La première équation de Maxwell devient ainsi :

$$\text{rot } \underline{\mathbf{H}} = \underline{\mathbf{J}}$$

En effet, le rapport de la norme du deuxième terme de la somme apparaissant au second membre de l'équation (1) à la norme du premier terme vaut $\epsilon\omega\rho$ pour un milieu linéaire de permittivité ϵ et en régime sinusoïdal permanent de pulsation ω . Par exemple, pour le cuivre, dont la résistivité est $\rho = 1,7 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ et la permittivité, celle du vide, $\epsilon_0 = \frac{1}{36 \pi 10^9} \text{F} \cdot \text{m}^{-1}$, le rapport vaut $4,72 \times 10^{-17}$ à la

fréquence de 50 Hz et $9,44 \times 10^{-15}$ à la fréquence de 10 kHz. L'approximation est donc parfaitement vérifiée. Il en est de même pour tous les matériaux conducteurs à toutes les fréquences pouvant intervenir en électrotechnique. Par ailleurs, les équations concernant le vecteur déplacement électrique ne sont pas utilisées dans ce domaine.

Par contre, pour les matériaux diélectriques, c'est au contraire le vecteur densité de courant qui est négligeable devant la dérivée du vecteur déplacement électrique.

La simplification précédente s'applique aux vecteurs réels tant que les variations ne sont pas trop rapides. En résumé, les équations de Maxwell utilisées pour un milieu conducteur en électrotechnique sont au nombre de trois et elles s'écrivent :

$$\text{rot } \underline{\mathbf{H}} = \underline{\mathbf{J}} \quad (15)$$

$$\text{rot } \underline{\mathbf{E}} = -\frac{\partial \underline{\mathbf{B}}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\text{div } \underline{\mathbf{B}} = 0 \quad (3)$$

2.1.8 Répartition de l'excitation magnétique

Prenons le rotationnel de l'équation (15) :

$$\text{rot}(\text{rot } \underline{\mathbf{H}}) = \text{rot } \underline{\mathbf{J}}$$

Le premier membre de cette égalité peut être transformé en utilisant une propriété des opérateurs vectoriels :