



**HAL**  
open science

# Nouvelles possibilités avec les moteurs à alimentation électronique

Bernard Multon

► **To cite this version:**

Bernard Multon. Nouvelles possibilités avec les moteurs à alimentation électronique. Revue Générale de l'Electricité, 1994, pp.11-19. hal-00673984

**HAL Id: hal-00673984**

**<https://hal.science/hal-00673984>**

Submitted on 24 Feb 2012

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Nouvelles possibilités avec les moteurs à alimentation électronique

Bernard MULTON

*Ecole normale supérieure de Cachan  
LÉSIR*

*Les applications de grande diffusion utilisent de nombreux moteurs ; actuellement ils fonctionnent généralement de façon autonome sur leur source d'alimentation. L'adjonction d'électronique de puissance permettrait de pallier certaines limitations, mais les contraintes de coût limitent le développement des « moteurs électroniques ». L'auteur décrit les principaux types de moteurs potentiellement intéressants ainsi que leur électronique associée. Il évoque les possibilités de nouveaux moteurs.*

Dans les pays industrialisés, les moteurs électriques jouent, aujourd'hui, un rôle important dans la vie de tous les jours. Chaque année, des centaines de millions de moteurs électromagnétiques sont fabriqués pour servir dans des domaines comme ceux de l'électroménager, de la ventilation, de la domotique, de la péri-informatique ou encore des équipements automobiles. Leurs puissances sont généralement inférieures voire très inférieures au kilowatt, ceci autorise une très grande latitude de conception et les structures électromagnétiques sont nombreuses et non encore toutes explorées. La plupart de ces moteurs fonctionnent encore sans électronique. Leur principale contrainte de fonctionnement et de conception reste alors la nature de la source d'énergie. De façon caricaturale, on dispose soit du réseau industriel à tension sinusoïdale et à fréquence fixe (par exemple : 240 V-50 Hz), soit d'une basse tension continue (3 à 24 V environ). La très grande majorité de ces moteurs sont du type asynchrone à cage (sous ses diverses formes économiques) ou à collecteur et induit tournant (à aimants permanents ou à excitation série bobinée). Rappelons que leur principale qualité est justement celle de pouvoir démarrer et fonctionner à partir de leur source d'énergie sans l'aide de semi-conducteurs. Cependant, diverses raisons, telles que la nécessité de régler la vitesse, ou/et l'accroissement de la durée de vie (suppression du collecteur et des balais), conduisent à alimenter ces machines par des convertisseurs électroniques qui doivent, avant tout, être, eux aussi, peu coûteux. Dans de nombreux domaines, l'électronique s'est déjà largement imposée, c'est le cas des ventilateurs « brushless » pour lesquels la durée de vie n'est plus limitée que par les paliers, ou encore, le cas des entraînements d'imprimante ou de disques mémoire.

Nous rappellerons, dans un premier temps, les principes fondamentaux des moteurs électromagnétiques. Ensuite, nous décrirons brièvement les principaux types de machines utilisables dans les domaines qui nous concernent ainsi que les principes de variation électronique de vitesse. Nous parlerons donc des moteurs asynchrones, à collecteur (universel et à aimants permanents), synchrones à aimants à commutation

électronique ainsi que des moteurs pas à pas. Enfin, pour évoquer les évolutions possibles, nous décrirons les possibilités offertes par les structures à réluctance variable et hybrides, alimentées par convertisseur électronique.

## Principe de conversion électromécanique - Convertisseurs statiques

Le choix, l'optimisation et la conception d'un entraînement électrique à vitesse variable, à fortes contraintes économiques, constituent un problème très complexe. En effet, si le choix se porte aujourd'hui encore, le plus souvent, sur les moteurs électromagnétiques, leurs types sont nombreux et la nécessité de les associer à une électronique (de puissance et de commande) très simplifiée leur confère des fonctionnements souvent très difficiles à analyser. Selon les marchés, le problème se pose différemment. Dans l'électroménager, la concurrence extrêmement sévère, pousse les fabricants de moteurs à conserver leurs chaînes de fabrication et donc, à garder des moteurs classiques prévus pour un fonctionnement direct sur le réseau. A l'opposé, pour les fabricants de disques durs, la continuelle miniaturisation les contraint à faire évoluer les structures et la technologie de leurs moteurs associés, d'ailleurs depuis bien longtemps, à l'électronique. Chaque domaine est particulier et il serait dangereux de généraliser et traiter de la même manière, les accessoires automobiles, la péri-informatique ou l'électroménager. Cependant, dans tous les cas, la recherche d'une solution au problème posé nécessite un fort couplage entre l'électromagnétisme et l'électronique (puissance-commande).

Nous allons, tout d'abord, rappeler le principe de la génération d'efforts électromagnétiques en faisant abstraction des différentes technologies. Ensuite nous donnerons quelques éléments de coût concernant les convertisseurs statiques.

■ Moteurs électromagnétiques

Le principe de la génération d'effort électromagnétique [1] le plus utilisé repose sur l'interaction de deux champs magnétiques hétéropolaires, l'un dit inducteur, l'autre dit induit. Ce principe peut être analysé par plusieurs méthodes, cependant celle utilisant la notion des forces de Laplace, bien qu'incomplète, est facilement abordable. Prenons le cas idéal d'un inducteur à aimants et d'un induit sur lequel sont déposés des conducteurs (fig. 1). Sur la portion dessinée, les forces de Laplace se calculent aisément avec la densité linéique de courant  $AI$  (en A/m par rapport à la longueur  $x$  dans le sens du déplacement), et  $B$  l'induction d'entrefer supposée constante sous chaque pôle. La pression tangentielle moyenne  $\sigma_T$  par unité de surface d'entrefer s'exprime :

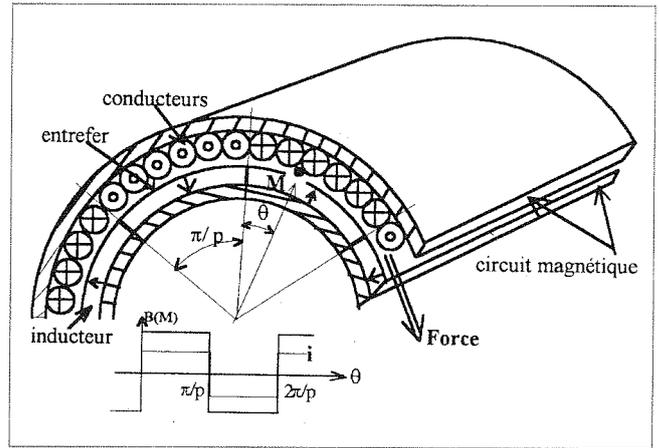
$$\langle \sigma_T \rangle = AI \cdot B \quad \text{en N/m}^2$$

Les valeurs de  $\sigma_T$  que l'on peut obtenir sont donc limitées par l'induction maximale d'entrefer et par la densité linéique de courant. L'induction ne peut dépasser la valeur à saturation des matériaux et doit être réduite à fréquence élevée à cause des pertes fer (surtout avec des matériaux magnétiques bon marché). En outre, l'induction ne peut avoir la forme d'onde idéale rectangulaire de la figure 1, il faut donc appliquer un facteur correctif. Quant au terme  $AI$ , il est limité par les pertes Joule et, comme le rendement est un facteur rarement prépondérant dans les applications bon marché (sauf applications portables sur batteries), par l'échauffement maximal. Certains moteurs sont très fortement ventilés (aspirateurs) et bénéficient d'un refroidissement efficace, d'autres, qui fonctionnent en régime intermittent, ont un échauffement quasi-adiabatique. En pratique, on montre que, lorsque l'extraction des calories s'effectue par la surface du moteur (convection naturelle ou forcée), ce n'est pas la valeur de  $AI$  qui est directement limitée mais le produit  $AI \cdot \delta$  où  $\delta$  est la densité de courant dans les conducteurs (en A/mm<sup>2</sup>). Pratiquement, dans les petits moteurs [2, 3] (puissances fractionnaires : inférieures au cheval), les valeurs de  $B$ ,  $AI$  et  $\delta$  se trouvent approximativement dans les fourchettes suivantes :

$$\begin{aligned} 50 < AI < 200 \text{ A/cm} \\ 5 < \delta < 15 \text{ A/mm}^2 \\ 0,2 < B < 0,8 \text{ T} \end{aligned}$$

ainsi les valeurs de la pression tangentielle  $\sigma_T$  sont comprises entre 0,1 et 1 N/cm<sup>2</sup>. Ceci est faible en comparaison avec ce que l'on obtient dans les très grosses machines électriques (jusqu'à 10 N/cm<sup>2</sup>). Le couple par unité de volume d'entrefer (« cylindrée ») des moteurs cylindriques est proportionnel à  $\sigma_T$  :  $C/V_{rot} = 2 \cdot \sigma_T$  en N.m/m<sup>3</sup>, ce qui permet d'estimer grossièrement le volume nécessaire pour produire un certain couple. On retiendra que le couple est le facteur dimensionnant dans un moteur électrique (couple massique de l'ordre de 0,1 à 1 N.m/kg dans les petits moteurs) et que les puissances élevées s'obtiennent au prix d'un accroissement des vitesses de rotation et de la fréquence. La vitesse est limitée, essentiellement, par les contraintes mécaniques (contraintes dans les matériaux, équilibrage...), par les pertes magnétiques (fréquence) et par le bruit acoustique. Si  $p$  est le nombre de paires de pôles,  $p$  est aussi le rapport entre les fréquences de rotation et d'alimentation.

La structure d'un moteur comprend : un circuit magnétique (souvent des tôles empilées) chargé de conduire le flux dans la zone active (entrefer), des conducteurs (cuivre ou aluminium) créant le champ d'induit et, par exemple (fig. 1), des aimants créant le champ inducteur. Lorsque l'inducteur se déplace par rapport à l'induit, ou vice-versa, il est nécessaire de « déplacer » les courants en synchronisme afin de main-



1 Structure électromagnétique de base ; principe de la génération des efforts.

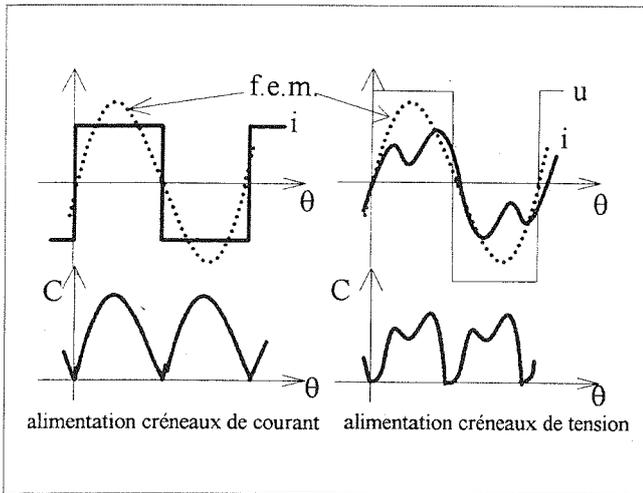
tenir l'effort. C'est le rôle rempli soit par un collecteur mécanique soit par des semi-conducteurs de puissance avec leur autopilotage. Les moteurs alimentés par le réseau alternatif peuvent, quant à eux, produire un déplacement « naturel » du champ d'induit (champ tournant) grâce à un enroulement diphasé ou triphasé ; l'alimentation monophasée requiert des artifices pour approcher le système diphasé idéal. Que le moteur soit dit « à courant alternatif » ou « continu », les forces électromotrices induites dans les conducteurs d'induit sont alternatives (valeur moyenne nulle). Le commutateur des courants d'induit (collecteur mécanique ou électronique) permet de maintenir, en fait, les courants en phase avec les f.e.m., le couple instantané (dans les moteurs tournants) est ainsi égal à :

$$c = \sum_{k=1}^{k=q} \frac{d\phi_k}{d\theta} \cdot i_k$$

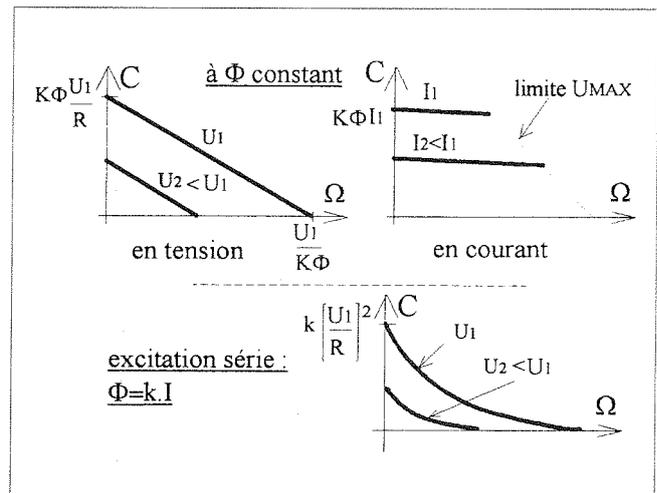
où  $\frac{d\phi_k}{d\theta}$  est la dérivée du flux embrassé par le bobinage de la

phase d'indice  $k$  et, où  $\theta$  est la position angulaire du rotor par rapport au stator. Rappelons que la f.e.m. est égale au produit de la vitesse angulaire de rotation par la dérivée de ce flux. Avec un moteur monophasé à f.e.m. sinusoïdale, alimenté par un courant rectangulaire, le couple instantané a l'allure décrite à la figure 2. Le schéma équivalent électrique des enroulements le plus élémentaire peut être représenté par la résistance du bobinage (sensible à la température : + 0,4 %/°C pour le cuivre) en série avec son inductance et par sa f.e.m. induite dont l'amplitude est proportionnelle à la vitesse et au flux inducteur (sensible aussi à la température : - 0,2 %/°C avec les aimants ferrites). Dans les petits moteurs, la chute de tension ohmique, habituellement négligée en forte puissance, prend des proportions notables et leur confère des caractéristiques spécifiques. Si l'alimentation est en créneaux de tension, le courant prend une forme d'onde dépendante de celle de la f.e.m., de l'inductance, de la résistance et de la vitesse (fig. 2). Dans tous les cas, la valeur moyenne du couple est proportionnelle au flux inducteur et au courant induit. Dans le moteur asynchrone, ces deux grandeurs fondamentales existent mais sont liées et ne sont pas directement accessibles. Pour les découpler, il faut recourir au « contrôle vectoriel ».

On peut remarquer que le couple instantané monophasé s'annule pour certaines positions dans lesquelles le démarrage devient impossible. La solution classique pour y remédier



2 Formes d'onde de la force électromotrice, du courant et du couple instantané.



3 Caractéristiques mécaniques « naturelles des petits moteurs électromagnétiques ».

est d'utiliser plusieurs phases, mais lorsqu'il faut simplifier à l'extrême le moteur et son convertisseur statique, on peut utiliser certains artifices. Par exemple, on peut imposer au rotor de s'arrêter toujours dans une position où le couple sera suffisant pour démarrer (aimant de positionnement...) mais il faut que le couple résistant à l'arrêt soit faible et qu'un seul sens de rotation soit requis.

La plupart du temps, les conducteurs sont logés dans des encoches du circuit magnétique afin d'accroître l'induction d'entrefer et d'assurer le maintien mécanique des bobinages. Cependant, la présence des encoches produit une modulation de la réactance du circuit magnétique qui est source d'un couple pulsatoire supplémentaire. On cherche parfois à l'éliminer. Dans ce cas, on incline ces encoches ou bien, on réalise des induits « sans fer » (par exemple : moteurs de tambour de magnéscope fig. 8...).

Notons que, selon les contraintes d'encombrement, la structure électromagnétique des moteurs peut être cylindrique à champ radial, comme on vient de le voir, ou discoïde (plate) à champ axial [4]. Toujours d'un point de vue structurel, le rotor peut se trouver à l'intérieur ou à l'extérieur du stator (ventilateurs).

Malgré leur diversité de structures, bon nombre de moteurs électromagnétiques alimentés par convertisseur statique ont des caractéristiques mécaniques couple-vitesse semblables. Le moteur qui permet de les mettre en évidence le plus aisément est le moteur à courant continu à collecteur et à excitation par bobinage inducteur. Le flux inducteur peut être maintenu constant (cas des moteurs à aimants permanents) ou encore être sensiblement proportionnel au courant induit (excitation série : moteurs universels). L'alimentation peut être faite par une source de tension (pour les très petits moteurs) ou par une source de courant, elle-même réalisée par un générateur de tension régulé en courant. Dans ce dernier cas, lorsque la vitesse dépasse une certaine valeur, la régulation n'est plus possible et l'on revient progressivement à une alimentation en tension. La figure 3 décrit approximativement les caractéristiques  $C(\Omega)$  en fonctionnement moteur.

### Eléments de coût des convertisseurs statiques

Compte tenu du cadre limité de cet exposé, nous ne pouvons entrer dans le détail des convertisseurs statiques [5] et des composants mis en œuvre [6]. Les structures des conver-

tisseurs sont très dépendantes des moteurs à alimenter et de la source d'énergie. Dans le cas du réseau alternatif domestique, les convertisseurs qui offrent, aujourd'hui, le moindre coût sont réalisés à base de triacs ou thyristors (gradateurs), ils permettent un réglage de la tension d'alimentation mais avec une grande dégradation de la forme d'onde qui décline assez fortement le moteur (mauvais rendement). Ils sont utilisés avec les moteurs universels (lave-linge, perceuses, aspirateurs...) (fig. 4) et quelquefois avec les moteurs asynchrones auxquels ils confèrent un très médiocre réglage de vitesse. On peut aussi redresser et filtrer le réseau (pont de diodes et condensateur), on obtient alors une source de tension continue. Dans ces conditions, on peut alimenter les moteurs à collecteur, avec un hacheur série ou « chopper » (un transistor et une diode) et les moteurs à courant alternatif (synchrones, asynchrones) par un onduleur. Le coût d'un onduleur est très supérieur à celui des convertisseurs précédents parce qu'il requiert des transistors (bipolaires, MOS ou IGBT) qui sont en plus grand nombre (au minimum 2 par phase sauf dans des versions très dégradées) et plus chers que les triacs et thyristors. Le coût de la fonction interrupteur doit prendre en compte, non seulement, les semi-conducteurs de puissance et leurs éventuels dissipateurs, mais aussi, leurs circuits de commande, plus chers encore, si le transistor est à potentiel flottant (lorsqu'il est connecté au potentiel haut de la source continue). On recherchera donc des moteurs qui demandent peu d'interrupteurs, de préférence, reliés au potentiel bas. La première solution sera de réduire le nombre de phases du moteur. Afin de pouvoir comparer les besoins des convertisseurs en silicium de puissance des divers types de moteurs, nous définissons la notion de « puissance apparente silicium » [7] (en V.A Si) :

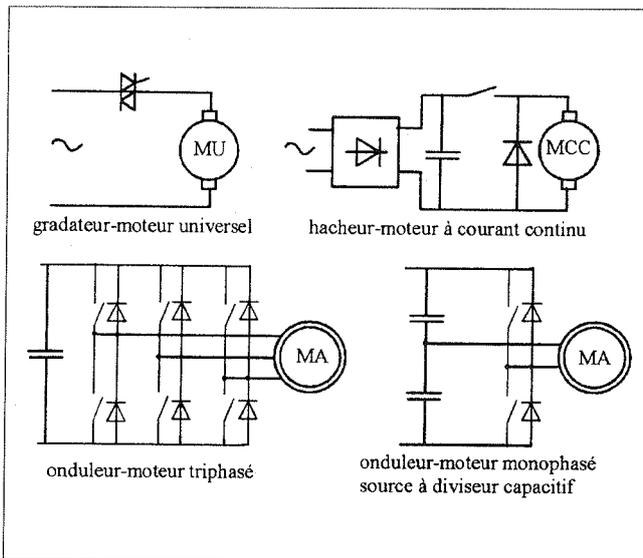
$$\text{Psi} = n \cdot U_{\text{max}} \cdot I_{\text{max}}$$

où  $n$  est le nombre total de semi-conducteurs commandés et où  $U_{\text{max}}$  et  $I_{\text{max}}$  sont leurs contraintes maximales en tension et courant. Même si cette notion est insuffisamment précise, elle permet une première quantification utile. Nous appellerons facteur de dimensionnement  $f_d$  le rapport de la puissance silicium sur la puissance électrique  $P$  absorbée :

$$f_d = \text{Psi}/P$$

Par exemple, le hacheur série (fig. 4) alimentant un moteur à collecteur conduit à la valeur minimale de  $f_d$

égale à 1 (dans le cas idéal où les ondulations de tension d'alimentation et du courant moteur sont négligeables). Le hacheur 4 quadrants donnerait :  $f_d = 4$ , l'onduleur triphasé (fig. 4) avec modulation sinusoïdale du courant :  $f_d = 8/\cos\phi$  où  $\phi$  est l'angle de déphasage du courant par rapport au fondamental de la tension ( $\cos\phi$  est proche de 1 avec les moteurs à aimants et tend plutôt vers 0,6 à 0,7 avec les petits moteurs asynchrones). Il faut ainsi plus de 8 fois la quantité de silicium d'un hacheur série répartie sur 6 composants... Ainsi, on comprend mieux les raisons pour lesquelles les moteurs triphasés à courant alternatif sont encore peu employés dans les applications de grande diffusion. Malgré cela, en faible puissance les possibilités de réalisations de circuits intégrés de puissance (« Smartpower » par exemple [6]) permettent d'avoir des coûts acceptables. Dans une alimentation monophasée, avec un onduleur à 4 transistors (fig. 4),  $f_d$  décroît à des valeurs comprises entre 4 et 8. L'utilisation d'un diviseur capacitif (fig. 4) pour réduire à 2 le nombre de semi-conducteurs ne change pas la valeur de  $f_d$  car, à même tension totale d'alimentation, le nombre de spires du bobinage moteur doit être divisé par deux tandis que le courant à commuter doit être doublé.



4 Convertisseurs statiques pour moteurs.

En ce qui concerne le choix actuel de la technologie des transistors de puissance, pour les applications fonctionnant sur le réseau, le transistor bipolaire (en perte de marché) et l'IGBT (en hausse) sont intéressants. En revanche, en basse tension (accessoires automobiles, péri-informatique...), le transistor MOS est le mieux adapté [6]. Les principaux avantages des IGBT et des MOS sont liés à leur commande de grille économique (simplicité et faible consommation), surtout lorsqu'il s'agit d'interrupteurs « hauts ».

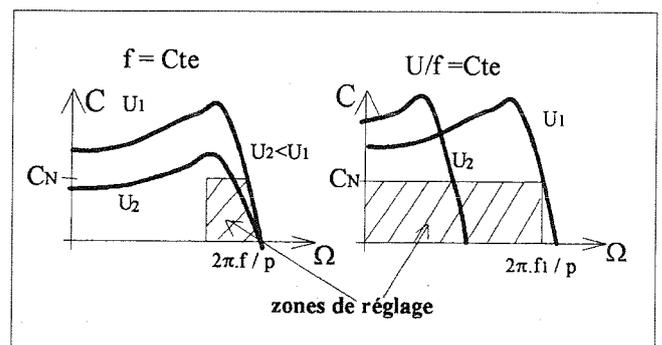
Le coût total du convertisseur statique doit faire intervenir les « composants réactifs », en particulier, les condensateurs. Le coût d'un condensateur est lié à la valeur de sa capacité, de sa tension nominale, du courant efficace qui le traverse ainsi qu'à sa technologie. En ce qui concerne le courant efficace, il dépend beaucoup des caractéristiques du convertisseur et du moteur mais aussi du mode de commande.

## Les moteurs économiques et leur association à l'électronique

Certains moteurs peuvent fonctionner de manière autonome (démarrage et régime permanent sans électronique), c'est ce qui a d'ailleurs fait leur succès ; d'autres nécessitent « de l'électronique » (puissance et commande). Les premiers ont été optimisés pour atteindre des coûts très faibles, il peut donc être souhaitable de chercher à les utiliser tels quels avec l'électronique pour régler, avec un bon rendement, leur caractéristique mécanique. Rappelons que l'une des limitations des moteurs à courant alternatif (asynchrones et synchrones), alimentés en 50 et 60 Hz, est la vitesse maximale de rotation : respectivement 3 000 et 3 600 tr/min. Les moteurs utilisés sont nombreux, aussi nous nous restreindrons aux plus courants.

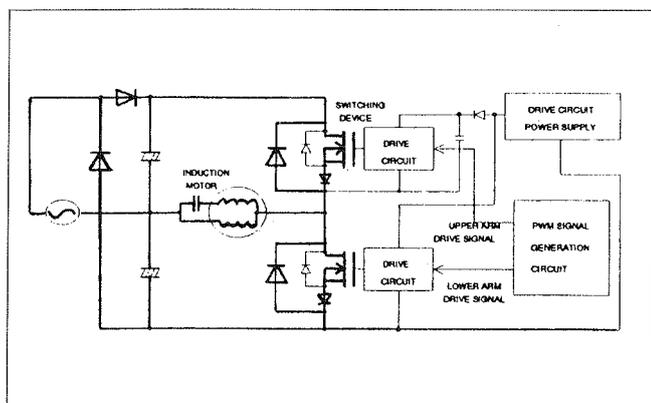
### Moteurs asynchrones à cage (MAS)

Idéalement, ce moteur est à champ tournant triphasé ou diphasé, le stator qui crée le champ est alors encoché régulièrement et muni d'enroulements répartis. Le champ tournant, à la vitesse  $\Omega_s$ , induit des courants dans les conducteurs du rotor. Ceux-ci sont disposés en « cage d'écureuil » intégrée dans le circuit ferromagnétique rotorique (tôles empilées). Dans le MAS, il y a un couple moteur seulement si le rotor tourne à une vitesse inférieure à celle du champ tournant, le « glissement » étant nécessaire. Les caractéristiques mécaniques d'un tel moteur sont données à la figure 5, d'abord, à fréquence fixe et à tension variable (cas du gradateur), puis à tension et fréquence réglables (ici leur rapport est maintenu sensiblement constant pour que l'amplitude du flux soit conservée quelle que soit la fréquence). Le réglage de tension à fréquence fixe ne permet qu'une faible plage de réglage car le point de fonctionnement n'est généralement stable que dans la partie décroissante de la caractéristique mécanique, en outre, la diminution de vitesse s'effectue grâce à un accroissement du glissement, le rendement est alors faible. Contrairement aux moteurs à collecteur et synchrones dans lesquels les courants d'induit (alternatifs) sont parfaitement synchrones avec la rotation, le moteur asynchrone « glisse ». On peut ainsi se passer de capteur de position pour l'alimenter à fréquence variable, ce qui rend la commande économique. En contrepartie, un surchauffement du rotor peut survenir en cas de surcharge, le glissement  $g$  devenant alors anormalement élevé. Les pertes Joule au rotor valent en effet :  $g.C.\Omega_s$  (dans les petits moteurs, le glissement vaut normalement de 20 % à 5 %).



5 Caractéristiques du moteur asynchrone.

Les moteurs considérés ici sont des versions dégradées du moteur à champ tournant idéal mais ils conservent sa cage d'écureuil. Un moteur monophasé n'a aucun couple à l'arrêt et ne peut démarrer ; aussi utilise-t-on des moteurs où une seconde phase est obtenue grâce à des spires de Frager placées sur les pôles [2, 8] (moteurs à bobines écrans ou *Shaded Pole*) du stator, ou encore, grâce à un enroulement auxiliaire dont le courant est déphasé grâce à un condensateur en série (fig. 6). Cette dernière solution est utilisée dès que la puissance dépasse quelques dizaines de watts, mais le condensateur ne peut être optimisé que pour un point de fonctionnement (à tension et à fréquence fixes, pour une vitesse). L'électronique peut ici permettre, grâce à un triac, le réglage continu de la valeur apparente du condensateur [9] mais il ne s'agit pas d'une variation de vitesse. Cela permet simplement d'obtenir, grâce à un seul condensateur et sans commutateur mécanique, un bon couple de démarrage et un rendement optimisé au point de fonctionnement choisi. Récemment, un laboratoire R&D [10] (climatiseur) a proposé une solution d'alimentation d'un moteur asynchrone diphasé avec condensateur, par un onduleur monophasé, à deux transistors seulement, avec source à diviseur capacitif (fig. 6). Afin d'optimiser la forme d'onde de la tension moteur et de régler son amplitude ainsi que sa fréquence fondamentale, l'onduleur est commandé en modulation de largeur d'impulsion (PWM). Si l'on souhaite maximiser le rendement, l'utilisation d'un moteur triphasé avec onduleur triphasé est optimale mais il semble que le surcoût occasionné n'est pas encore accepté en Europe.



6 Onduleur économique monophasé pour moteur asynchrone [10].

### ■ Moteurs à collecteur MCC

Les caractéristiques « naturelles » du moteur à collecteur ont été présentées à la figure 3. Le réglage de vitesse peut être obtenu très simplement par réglage de la tension. Lorsque la puissance devient importante (plus de 100 W), il devient quasiment nécessaire de réguler le courant, donc de le mesurer, ceci afin de protéger l'ensemble. En outre, le contrôle du courant permet celui du couple, il apporte ainsi des fonctions supplémentaires comme la surveillance des balourds dans les lave-linges. Essentiellement, on distingue deux types de moteurs à collecteur très largement utilisés [2, 8] : les moteurs universels (MU) pour l'utilisation en alterna-

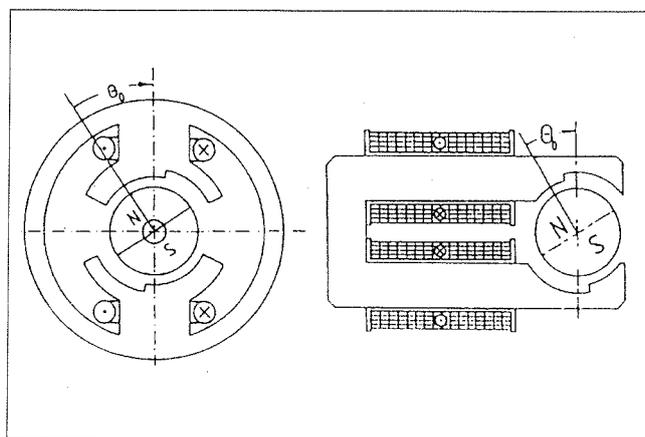
tif qui possèdent un bobinage inducteur connecté en série avec l'induit et, les moteurs à courant continu à aimants permanents (MCCAP) (ferrites le plus souvent) fabriqués, chaque année, par centaines de millions, pour un très grand nombre d'applications basse tension continue.

L'avantage du collecteur mécanique est qu'il remplace une grande quantité de transistors tout en conférant une rotation très régulière au moteur. En contrepartie, la qualité de sa commutation est mauvaise, plus particulièrement en alternatif (MU). En effet, les commutations mécaniques produisent des étincelles (parasites et échauffement) ainsi qu'une usure rapide des balais et du collecteur lui-même. La durée de vie est très limitée, ceci a exclu le moteur universel des applications à longue durée de vie (ventilateurs, climatiseurs). Par ailleurs, sa constitution limite sa vitesse périphérique à environ 30 m/s (coût faible) ou 75 m/s (frettage, coût élevé) ce qui restreint les possibilités de grande puissance volumique. En outre, la structure à induit tournant conduit à un moment d'inertie élevé (sauf induits sans fer trop coûteux et fragiles) et, lorsque l'on recherche de fortes accélérations, on doit recourir à la structure inversée à inducteur tournant (moteurs synchrones « brushless »).

Le moteur universel est aujourd'hui couramment alimenté par gradateur à triac. Selon les versions, le moteur est asservi en vitesse avec génératrice tachymétrique et contrôlé en courant (mesure sur résistance). Des circuits intégrés de commande « grand public », comme les TDA1085 et 2085, sont utilisés ; ils assurent les fonctions de synchronisation au réseau et de commande du triac ainsi que les contrôles en courant et en vitesse.

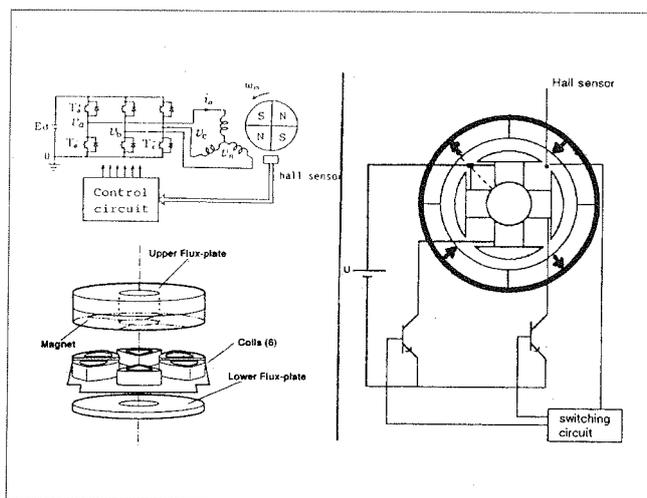
### ■ Moteurs synchrones à aimants permanents MSAP

Par principe, le moteur synchrone à aimants est constitué d'un stator feuilleté, comportant les bobinages d'induit, et d'un rotor inducteur sur lequel sont disposés des aimants permanents agencés en  $p$  paires de pôles. Comme dans le moteur asynchrone, le stator du moteur synchrone « idéal » génère un champ tournant grâce à un enroulement triphasé ou diphasé. Cependant, un petit moteur monophasé (presse-fruits) a été récemment développé [11] pour l'alimentation directe par le réseau alternatif. Il possède un stator asymétrique à pôles saillants (la figure 7 montre 2 exemples de configuration du circuit magnétique) qui permet au rotor de se placer, à l'arrêt, dans une position de couple non nul.



7 Moteurs synchrones monophasés [11].

Ce type de moteur (monophasé ou polyphasé) ne peut normalement pas démarrer directement sur le réseau alternatif sauf si le moment d'inertie est suffisamment faible [12]. Ainsi un moteur monophasé asymétrique est capable de démarrer directement sur le réseau 50 Hz dans des conditions très restrictives, mais il est aussi possible de l'alimenter par un onduleur monophasé du type de celui présenté à la figure 6. Dans ce cas, comme son nom l'indique, le moteur synchrone requiert une alimentation synchronisée par rapport à la position angulaire du rotor, c'est-à-dire un autopilotage [13] [14]. Il est donc nécessaire de disposer d'un capteur de position pour informer le circuit de commande des transistors. Les caractéristiques « naturelles » du moteur synchrone autopiloté sont les mêmes que celles du moteur à collecteur, il peut être, de la même façon, alimenté en tension ou en courant. La figure 8 montre les schémas simplifiés de commande de deux petits moteurs « brushless ». Le premier est triphasé à champ axial et ses bobines sont montées directement sur le circuit imprimé qui supporte les divers circuits de contrôle ainsi que les sondes de Hall [4] (magnétoscope). Le second est un moteur diphasé alimenté en courant unidirectionnel par un onduleur à deux transistors [15] (ventilateur) qui lui confère un fonctionnement dégradé.



8 Moteurs synchrones « brushless » triphasés et biphasés [4, 15].

Pour les petites puissances [16], de nombreux circuits intégrés de puissance existent, ils comprennent les fonctions de commutation et de commande, y compris la gestion des signaux issus des capteurs de position à effet Hall fréquemment utilisés et même, depuis peu, une fonction d'autopilotage sans capteur direct (analyse des f.e.m., point neutre nécessaire). Des moteurs triphasés de plus forte puissance, alimentés par onduleur triphasé à 6 transistors, sont aussi étudiés [17, 18], mais leurs applications restent marginales, toujours en raison de leur coût prohibitif.

### ■ Moteurs pas à pas

Les moteurs pas à pas constituent une famille de structures électromagnétiques très diverses : les unes se rapprochent du moteur synchrone à aimants, les autres des moteurs à réluc-

tance variable et des moteurs hybrides [1, 19]. Toutes exigent une alimentation des bobinages en synchronisme avec la position. Une alimentation électronique est impérative et ces moteurs furent probablement les premiers moteurs à commutation électronique. Les applications vont des montres à aiguilles, (moteur Lavet 1  $\mu$ W, rotor à aimant bipolaire de diamètre 1 mm environ) fabriqués à 500 millions d'exemplaires par an [20], aux entraînements des têtes magnétiques des disques mémoires (moteurs hybrides 200 pas/tour), en passant par ceux de chariots d'imprimante (diphasés, rotor à aimant multipolaire, 48 pas/tour). La fonction des moteurs pas à pas est le positionnement incrémental, généralement de petite puissance et sans capteur de position. Les phases sont alimentées successivement par des impulsions de durée suffisante qui déplacent le rotor d'un pas. La rotation est donc saccadée, on peut toutefois la régulariser en adoptant des formes d'onde optimisées et en choisissant bien la fréquence d'alimentation. Ici encore, de nombreux circuits intégrés de puissance permettent une alimentation économique de ces moteurs.

L'inconvénient majeur du moteur pas à pas réside dans son mode de commande qui conduit à une surconsommation d'énergie eu égard à la puissance mécanique fournie. Le moteur et son alimentation doivent donc être surdimensionnés. Aussi, depuis quelques années, on assiste au développement de l'auto-commutation de ces moteurs, fonction qui n'est autre qu'un autopilotage sans capteur direct de position comme on le pratique dans les moteurs brushless.

### ■ « Nouveaux » moteurs - Evolutions possibles

Nous avons cherché quelles étaient les évolutions souhaitables des moteurs électriques dans les domaines présents. L'une des premières, dont nous avons déjà parlé, est la vitesse variable. Nous avons vu quelques-unes des méthodes employées avec les moteurs « classiques ». Selon les applications, on recherchera un accroissement de la vitesse maximale, un encombrement plus réduit, un niveau de bruit acoustique minimal, des accélérations meilleures, une consommation plus faible, un courant absorbé « propre » ... Et dans tous les cas, le prix total de la fonction doit être minimal. Plusieurs voies peuvent être envisagées. L'une s'oriente vers des moteurs radicalement nouveaux, une autre essaie de mieux exploiter l'électromagnétisme et l'électronique de puissance pour réaliser des « moteurs électroniques » satisfaisant aux nouvelles contraintes.

Enfin, l'utilisation des microcontrôleurs [38] permet de gérer un certain nombre de fonctions de commande du moteur : le séquençage des interrupteurs à partir des informations de position, l'extraction des informations de position des capteurs indirects, les régulations de position, de vitesse et, même celle de courant, si la puissance de calcul est suffisante. On demande souvent au microcontrôleur de gérer à la fois la commande du moteur et celle du processus dans lequel il agit.

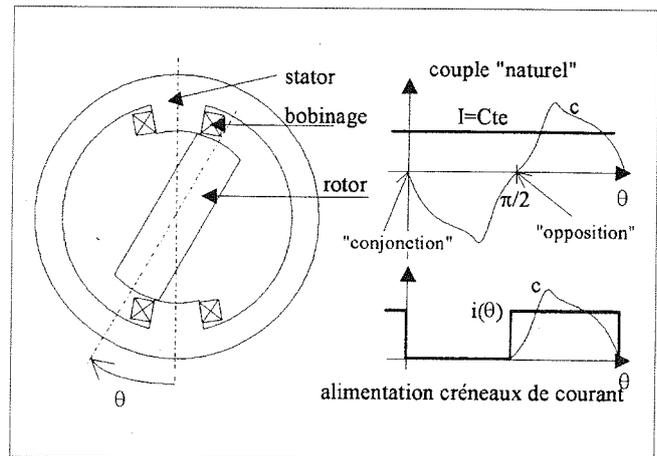
Sous le vocable « nouveaux », nous avons voulu parler de moteurs qui ne sont pas encore couramment utilisés dans les domaines de la grande diffusion ce qui ne signifie pas qu'ils ont été découverts récemment. Le moteur à réluctance variable date du milieu du siècle dernier ! Pour convertir de l'énergie électrique en énergie mécanique, il n'y a pas que l'électromagnétisme. Les principes physiques ne manquent pas, mais, encore faut-il qu'ils soient énergétiquement adaptés aux ordres de grandeur de couple, force ou puissance qui

nous intéressent. On peut ainsi obtenir des mouvements, à partir de l'énergie électrique [20], avec des actionneurs électrostatiques, piézo-électriques, magnéto-strictifs, thermiques (dilatation).

Les actionneurs électrostatiques font, aujourd'hui, l'objet de travaux dans le domaine submillimétrique [20, 21] où des applications médicales sont envisagées. Les techniques d'intégration du silicium sont utilisées et pourraient permettre, à terme, des fabrications économiques en grande série.

Les moteurs piézo-électriques [22], quant à eux, sont sortis des laboratoires depuis plusieurs années pour équiper, en particulier, les objectifs photographiques. Ils fonctionnent sur la base d'un transducteur piézo-électrique (céramique) qui propage une onde mécanique ultrasonore. Celle-ci transmet, par frottement, un mouvement à un rotor (moteurs tournants) sans bruit acoustique. Signalons, qu'en l'absence d'alimentation, une force importante maintient le rotor « collé » au stator. Les performances obtenues en petites dimensions sont particulièrement intéressantes car elles offrent un couple élevé à basse vitesse, par rapport aux moteurs électromagnétiques (MEMs), et peuvent permettre la suppression des réducteurs mécaniques. Les pressions tangentielles atteintes sont de 3 à 10 N/cm<sup>2</sup>, à comparer avec les 0,1 à 1 des MEMs ; en revanche les vitesses de déplacement semblent être limitées à 2 à 3 m/s [22]. L'usure du matériau d'interface rotor/stator est élevée, ce qui limite sévèrement la durée de vie, à l'heure actuelle. Les applications concernent le domaine des basses vitesses pour des puissances maximales d'une centaine de watts. Leur alimentation requiert une ou deux tensions alternatives d'amplitude relativement élevée (> 100 V). Le réglage de vitesse est assez délicat, la fréquence doit rester au voisinage de la fréquence de résonance de la céramique, dépendante de la charge ; on agit sur le glissement, ce qui est peu efficace en terme de rendement. Comme avec les MEMs, ce principe permet la réalisation de moteurs tournants ou linéaires.

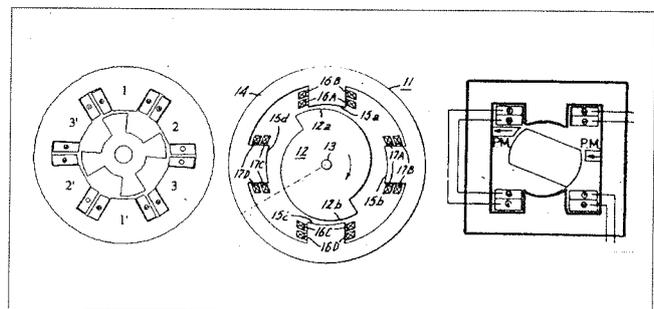
Revenons au principe de génération d'efforts le plus utilisé. La création de forces électromagnétiques laisse une très grande liberté de conception et des progrès restent à faire. La réduction de coût du moteur est liée au prix des matériaux utilisés, à leur quantité, au nombre de pièces constitutives et à leur facilité d'assemblage. Quant à l'alimentation électronique, sa partie puissance devra avoir une puissance silicium réduite et, demander un nombre minimal d'interrupteurs, dans le cas où ils se présentent sous forme de composants discrets. Dans ces conditions, le moteur à réluctance variable à double saillance, MRVDS, (*Switched Reluctance Motor*) offre des perspectives intéressantes parce qu'il est de construction très économique et qu'il se contente d'une alimentation en courant unidirectionnel, sans sacrifice sur les performances. La structure la plus connue [13, 23, 24, 25] est constituée d'un stator à Ns pôles saillants supportant des bobines concentrées et d'un rotor à Nr dents. Le rotor ne comprend donc ni conducteurs ni aimants, il est économique, robuste et ne nécessite normalement pas d'opération d'équilibrage. Une multitude de possibilités Ns/Nr existe mais seulement quelques-unes peuvent être retenues. Les pôles saillants constituent une succession d'électroaimants agencés en un nombre q de phases. Ils attirent successivement les dents rotoriques et les courants de phase doivent donc être, ici aussi, commutés en synchronisme avec la position du rotor. Contrairement aux autres moteurs évoqués précédemment, le stator ne peut qu'« attirer » les dents rotoriques. Il en résulte qu'une seule phase ne peut produire un effort moteur que sur la moitié de la période d'alimentation et que le couple a tendance à être pulsé. La figure 9 montre le principe d'une structure monophasée et l'allure du couple obtenu, d'une



9 Principe du moteur monophasé à réluctance variable à double saillance.

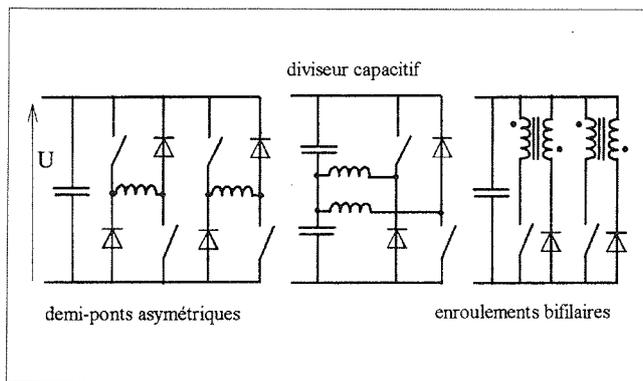
part, si le courant d'alimentation est constant et, d'autre part, s'il est autocommuté pour obtenir un fonctionnement moteur.

Pour avoir un moteur à deux sens de rotation avec un couple de démarrage élevé quelle que soit la position, il faut au moins 3 phases [23], par exemple, une structure 6/4 (fig. 10). Cependant, de nombreuses applications économiques se satisfont d'un moteur à un seul sens de rotation avec un couple de démarrage modeste. Dans ce cas, un moteur à deux phases peut être retenu mais, pour assurer son démarrage, il faut une dissymétrie du stator ou du rotor [26, 27] afin d'étendre la plage angulaire de production de couple de chaque phase à un peu plus d'une demi-période électrique. La figure 10 montre un tel moteur biphasé [26]. Pour des entraînements de type ventilateur où le couple à l'arrêt est négligeable, on peut même choisir une structure monophasée [28, 39], mais compte tenu des zones d'absence de production de couple, il faut « prépositionner » le rotor à l'arrêt dans une zone où le couple est non nul. Une solution consiste à utiliser des petits aimants statoriques [28] créant un couple de détente (fig. 10).



10 Exemples de moteurs à réluctance variable à double saillance triphasé, biphasé et monophasé.

Le convertisseur statique de base du MRVDS est le demi-pont asymétrique, cependant plusieurs autres convertisseurs [24] peuvent être utilisés (fig. 11). Pour les nombres de phases pairs, un onduleur à un seul interrupteur par phase



11 Structures de convertisseur pour moteur à réluctance variable (exemple biphasé).

peut fonctionner à partir d'une source de tension à point milieu. Et si l'on réalise des enroulements bifilaires pour chaque phase, on obtient encore un convertisseur à un seul interrupteur par phase mais au prix d'un doublement des pertes Joule dans le moteur et d'un doublement de tension appliquée aux transistors. Le facteur de dimensionnement est sensiblement le même pour les trois convertisseurs présentés. En outre, l'alimentation peut se faire en pleine onde de tension (sans découpage) sur une large plage de couple et de vitesse, ce qui est un gage de faible pollution électromagnétique. La conséquence est un couple pulsatoire élevé.

Si l'on veut comparer le MRVDS avec les moteurs classiques, on peut dire qu'il peut rivaliser en performances avec le moteur à aimants permanents haute énergie, seulement, si son entrefer est suffisamment faible pour permettre la saturation du circuit magnétique [29]. Aussi au-dessous d'un certain diamètre, ce n'est plus possible [30]. Pour des couples supérieurs à quelques 0,1 N.m, on peut atteindre des performances satisfaisantes, supérieures ou égales à celles des moteurs asynchrones. En ce qui concerne la puissance de dimensionnement de son onduleur, elle est du même ordre de grandeur que celle de ses concurrents [7] à condition que le moteur soit alimenté en pleine onde de tension à la puissance maximale. Précisons que, si l'on recherche des vitesses de rotation élevées, le rotor passif (empilage de tôles) ne pose pas de problèmes de tenue mécanique. D'autres structures de moteurs à réluctance variable, monophasées en particulier, ont été proposées dans le but de simplifier encore leur construction [31] ou d'obtenir des couples plus importants aux basses vitesses grâce à un nombre de pôles accru [31, 32].

Cependant, les moteurs à réluctance variable ont tendance à produire un niveau de bruit acoustique supérieur aux autres, mais le problème peut être surmonté en agissant sur la géométrie de la structure et sur l'alimentation.

Si l'on ne peut pas accepter un entrefer suffisamment petit et que l'on tient à conserver un rotor passif, pour des hautes vitesses par exemple, on peut recourir à des structures hybrides [1, 19] dont certaines sont déjà utilisées dans les moteurs pas à pas. Leur diversité est très grande, cependant on peut dire, pour celles à rotor passif, que leur stator comprend, outre l'habituel circuit magnétique et les bobinages, un ou plusieurs aimants chargés de magnétiser le rotor denté. Les aimants peuvent être disposés de manière à obtenir des inductions d'entrefer élevées (« concentration de flux ») et ceci avec des matériaux économiques comme les ferrites ou les alliages fer-néodyme-bore-plastique. L'alimentation des moteurs hybrides doit être autopilotée et s'apparente plutôt à

celle des machines synchrones mais elle peut être dégradée et utiliser les structures de convertisseur des MRVDS.

Enfin, lorsque la miniaturisation et les performances dynamiques deviennent les principaux objectifs, c'est le cas des actionneurs de déplacement des têtes de lecture/écriture des disques mémoires modernes, le choix se porte vers les dispositifs à bobine mobile de type haut parleur [33].

Comme dans tous les domaines de la technologie, les moteurs attendent beaucoup de l'évolution des matériaux. Dans le cas présent, des aimants à hautes performances et bon marché sont attendus. Pour les moteurs hybrides, des matériaux magnétiques de types poudres agglomérées ou frittées à haute perméabilité et induction à saturation élevée permettraient de réaliser les circuits magnétiques nécessaires avec des pertes fer acceptables. La liste des progrès attendus est bien longue et nous l'arrêterons ici.

## Conclusion

Après avoir rappelé les ordres de grandeur des efforts que l'on pouvait obtenir dans les petits moteurs électriques, nous avons effectué une revue des principaux moteurs alimentés par convertisseur électronique et déjà utilisés actuellement. Nous avons ensuite présenté les évolutions possibles des moteurs économiques vers les technologies piézo-électrique, à réluctance variable et hybride. Lorsque les dimensions doivent être réduites (disques mémoires...) et, surtout si les performances sont élevées, l'emploi d'aimants devient nécessaire (moteurs synchrones ou hybrides), en revanche, au-delà d'une certaine taille (rotor de quelques cm de diamètre), la réluctance variable peut être intéressante car elle offre des structures, à la fois de la machine et de son convertisseur, particulièrement économiques. Pour les petites puissances et lorsque la diffusion est très importante, on peut intégrer toute ou partie de l'électronique au moteur. Ceci permet la réalisation d'un composant « moteur électronique » avec des entrées de commande et des sorties d'état, c'est le concept de « smart motor » [34]. La domotique et l'automobile électrique [35] qui connaîtront probablement une évolution importante dans les années à venir, vont faire encore progresser ce domaine dans lequel d'autres technologies pourraient émerger. Les nouvelles contraintes qui apparaissent progressivement sont l'augmentation des tensions d'alimentation [36] et la nécessité d'absorber des courants « propres », en particulier à bon facteur de puissance et à faible contenu harmonique [37].

## Remerciements

Pour les informations qu'ils m'ont aimablement fournies au sujet de la grande diffusion, je tiens à remercier Messieurs G. Dauge (Moulinex, Caen), P.F. Desesquelles (Valéo, Créteil), Favre (Eaton, Thyez), B. Grehant (Somfy, Cluses), M. Guinet (Crouzet, Valence), J. Herrada (Selni, Nevers), M. Jufer (LEM, EPFL Lausanne), L. Perier (SGS Thomson, Rousset) et J.M. Peter (Consultant, Aix en Provence).

## Bibliographie

- [1] JUFER (M.) ; « Electromécanique », Traité de l'école polytechnique fédérale de Lausanne, Ed. Georgi (1979).
- [2] HENRY-BAUDOT (J.) ; « Petits moteurs électriques », Techniques de l'Ingénieur, Traités de Génie Electrique, D545, 12-1975, 20 p.
- [3] HENRY-BAUDOT (J.), LACROUX (G.) ; « Petits moteurs électriques » (mise à jour), Techniques de l'Ingénieur, Traités de Génie électrique, D545, 9-1980, 11 p.

- [4] MURAI (Y.), KAWASE (Y.), OHASHI (K.), NAGATAKE (K.), OKUYAMA (K.) ; « Torque Ripple Improvement for Brushless DC Miniature Motors », IEEE Trans. on I.A., Vol. 25, n° 3, May/June 1989.
- [5] MOHAN (N.), UNDELAND (T.M.), ROBBINS (W.P.) ; « Power Electronics. Converters, Applications, and design », John Wiley & Sons, 1989.
- [6] PETER (J.M.) ; « Les semi-conducteurs de puissance en 1991. Leur évolution et ses conséquences », L'onde Electrique, Juillet/Août 1992, Vol. 72, n° 4, pp. 7-14.
- [7] MULTON (B.), GLAIZE (C.) ; « Size Power Ratio Optimization for the Converters of Switched Reluctance Motors », IMACS'TCI, Nancy, Sept. 1990, pp. 325-331.
- [8] ARMENSKI (E.), FALK (G.) ; « Micromachines électriques », chapitre 2.13, « Micromoteurs monophasés auxiliaires », Editions MIR, Moscou, 1977, pp. 147-155.
- [9] MULJADI (E.), ZHAO (Y.), LIU (T.H.), LIPO (T.A.) ; « Adjustable AC Capacitor for a Single-Phase Induction Motor », IEEE Trans. on I.A., Vol. 29, n° 3, May/June 1993, pp. 479-485.
- [10] MIYAZAKI (H.), ONO (M.), (Toshiba Corp.) ; « A speed Control System for AC Induction Motor Application to Home Appliances », PCIM'93, Proc. Intelligent Motion, June 1993, pp. 230-236.
- [11] ALTENBERND (G.) ; « Actual Aspects of the Development of Fractional Horse-Power Single-Phase Synchronous Motors with Permanent Magnetic Rotor », SM 100, part III, Zürich, August 1991, pp. 1083-1089.
- [12] ALTENBERND (G.), WÄHNER (L.) ; « Comparison of Fractional Horse-Power Single-Phase and Three-Phase Synchronous Motors with Permanent Magnetic Rotor », SPEEDAM, Positano (Italy), May, 19-21, 1992, pp. 379-384.
- [13] MILLET (T.J.E.) ; « Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives », Oxford Science Publications, 1989.
- [14] NASAR (S.A.), BOLDEA (J.), UNNEWEHR (L.E.) ; « Permanent magnet, Reluctance and Self Synchronous Motors », CRC Press, 1993.
- [15] BERDAI (M.N.), SCHOORENS (H.), HAUTIER (J.P.) ; « Brushless DC Motors Torque Ripple Optimisation », SM 100, Zürich, 27-29 August 1991, pp. 1108-1112.
- [16] JUFER (M.) ; « Small Synchronous Machines », SM 100, Zürich, 27-29 August 1991, 10 p.
- [17] ZHU (Z.Q.), HOWE (D.), ACKERMANN (B.) (Philips GmbH) ; « Analytical Prediction of Dynamic Performance Characteristics of Brushless DC Drives », Electric Machines and Power System, 20, 1992, pp. 661-678.
- [18] HALLOUDA (M.A.), KELLEY (A.W.) ; « Adjustable Speed Drive for Residential Applications », PESC'93, pp. 928-934.
- [19] ABIGNOLI (M.), GOELDEL (C.) ; « Moteurs pas à pas », Techniques de l'ingénieur, Traités de Génie Electrique, D3690, 3-1991, 21 p.
- [20] BALLANDRAS (S.), FROELICHER (M.), GAGNEPAIN (J.J.), LEPAUL (G.), MINOTTI (P.) ; « Recherches en microtechnique : réalités et perspectives », Ch. 6, « microactionneurs », Institut des microtechniques et CETEHOR, Besançon, Collection du livre vert, 1992.
- [21] LANG (J.H.) ; « Electric Micromotors. A Status Report », ICEM'90, Part I, pp. 29-33.
- [22] SCHÜNER (H.P.) ; « Piezoelectric Motors and Their Applications », ETEP Vol. 2, n° 6, Nov./Dec. 1992, pp. 367-371.
- [23] LAWRENSON (P.J.), STEPHENSON (J.M.), BLENKINSOP (P.T.), CORDA (J.), FULTON (N.N.) ; « Variable-Speed Switched Reluctance Motors », Proceedings IEE, Vol. 127, Pt. B, n° 4, July 1980, pp. 253-265.
- [24] LAWRENSON (P.J.) ; « A Brief Status Review of Switched Reluctance Drives », EPE Journal, Vol. 2, n° 3, Oct. 1992, pp. 133-144.
- [25] WELLER (A.), TRAWINSKI (P.) (Braun) ; « Design and Control of Low Power Switched Reluctance Motors (< 1 KW) », EPE Firenze, 1991, pp. 4/001-006.
- [26] BEDFORD (R.D.) ; « Compatible Brushless Reluctance Motors and Controlled Switch Circuits », U.S. Patent n° 3, 679, 953, July 1972, Assignee : G. E. Comp.
- [27] BYRNE (J.V.), LACY (J.G.) ; « Characteristics of Saturable Stepper and Reluctance Motors », IEE Conf. on Small Elect. Mach., n° 136, March 1976, pp. 93-96.
- [28] COMPTER (J.C.) (U.S. Philips Corp., New-York) ; « Microprocessor-Controlled Single-Phase Reluctance Motor », Proc. Drives/Motors/Controls Conf., Brighton, 1984, pp. 64-68.
- [29] MULTON (B.), JACQUES (C.) ; « Comparaison de deux moteurs électriques autopilotés : le moteur synchrone à aimants permanents et le moteur à réluctance variable à double saillance », Véhicules propres, La Rochelle, 15-19 nov. 1993.
- [30] JUFER (M.), CRIVII (M.), HATEFI (K.) ; « Switched Synchronous Motors », SM 100, Part II, Zürich, 27-29 August 1991, pp. 455-459.
- [31] CHATRATANA (S.), BOLTON (H.R.), PEDDER (D.A.G.) ; « Investigations into Small Single-Phase Switched Reluctance Motors », IEE Conf. on Small Special Electric Machines, 1980, 4 p.
- [32] CHAN (C.C.) ; « Low-Cost Electronic Controlled Variable Speed Reluctance Motors », IEEE Trans. IE, Vol. 34, n° 1, Feb. 1987, pp. 95-100.
- [33] JUFER (M.) ; « Actionneurs linéaires et rotatifs à bobine mobile », Journées SEE, 9-10 Nov. 1989, Valence, 13 p.
- [34] JUFER (M.) ; « Electric Drives-Towards the integration », SM 100, Part III, Zürich, 27-29 August 1991, pp. 1135-1143.
- [35] RIEZENMAN (M.J.) ; « Electric Vehicles (sepical report) », IEEE spectrum, Nov. 1992, pp. 18-24, 93-101.
- [36] D'ORSAY (E.), PERRIER (P.) ; « Evolution des puissances électriques et des tensions à bord des véhicules », Rev. des Ingénieurs de l'automobile n° 660, Oct. 1990, pp. 75-79.
- [37] NORME FRANÇAISE NF EN 60 555 ; « Perturbations produites dans les réseaux d'alimentation par les appareils électrodomestiques et les équipements analogues », Oct. 1987.
- [38] NICOLAI (J.), CASTAGNET (T.) ; « A Flexible Micro-Controller Based Chopper Driving a Permanent Magnet DC Motor », EPE'93, 13-16 Sept. 1993, Vol. 5, pp. 200-203.
- [39] TÖRÖK (V.), LORETH (K.) ; « The World's Simplest Motor For Variable Speed Control ? The Cyrano Motor, a PM-Biased SR-Motor of High Torque Density », EPE'93, 16-16 sept. 1993, Vol. 6, pp. 44-48.

