

# LES MOTEURS ÉLECTRIQUES POUR APPLICATIONS DE GRANDE SÉRIE

Bernard MULTON, Hamid BEN AHMED, Nicolas BERNARD, Pierre-Emmanuel CAVAREC  
Antenne de Bretagne de l'École Normale Supérieure de Cachan

## 1- Introduction

L'objectif que nous nous sommes fixé, dans cet article, est de dresser un panorama aussi étendu que possible des convertisseurs électromécanique (moteurs ou générateurs) de grande diffusion dont les principes sont fondés sur l'électromagnétisme. Compte tenu de l'espace limité, nous n'aborderons pas leurs principes de fonctionnement. Dans beaucoup de ces machines spéciales, voire ésotériques, on est souvent très loin de pouvoir exploiter les notions de forces de Laplace et de champs tournants, aussi, nous conseillons à nos lecteurs d'utiliser la méthode des travaux virtuels [Jufer\_79] pour analyser leur fonctionnement et calculer leur couple électromagnétique.

### 1.1- Diversité

Qu'est-ce que la grande série ? On peut considérer qu'il s'agit d'une production supérieure à plusieurs dizaines de milliers de dispositifs par an. En ce qui concerne les actionneurs électriques, on peut inclure les domaines des moteurs industriels (les asynchrones triphasés à cage d'écureuil coulé en aluminium sont les seuls à être produits réellement en série) et ceux correspondant aux accessoires de petite puissance qui nous assistent au quotidien.

Dans cet article, nous ne traiterons pas les machines asynchrones triphasées à cage qui sont largement traitées dans la littérature scientifique et technologique. En revanche, nous essaierons, grâce à de nombreux exemples, de montrer la grande diversité de la deuxième catégorie de moteurs précédemment évoquée.

La figure 1.1 (échelles logarithmiques) montre les ordres de grandeurs du couple obtenu en dimensions caractéristiques (ici le diamètre), la puissance à 3000 tr/mn est donnée à titre indicatif. Le domaine des moteurs de grande diffusion (hors asynchrones triphasés) couvre les dimensions comprises entre le millimètre (horlogerie) et la dizaine de centimètres (électroménager, alternateurs automobiles). Si, un jour, les véhicules électriques se développent, des moteurs de plus grande puissance (quelques dizaines de kW) viendront s'y ajouter [Mult\_00].

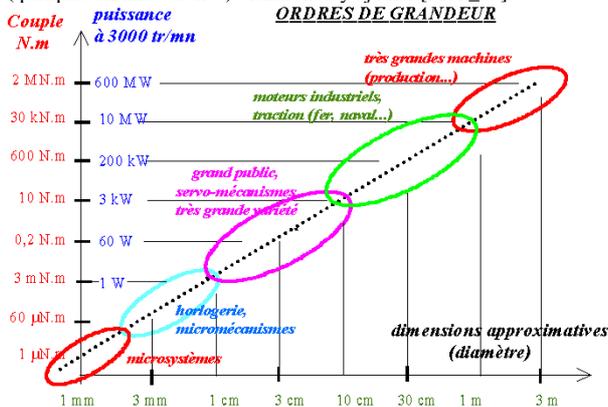


Figure 1.1  
La très grande étendue, dans le domaine des puissances, des machines électromagnétiques

Les moteurs, généralement discrets, sont partout. Une famille française moyenne en possède, souvent sans le savoir, plus de 100 de l'actionneur d'une montre analogique à ceux cachés au cœur des appareils électroménager, du micro-ordinateur familial ou encore de la chaîne HiFi.

Ce qui caractérise le plus les moteurs de grande diffusion, c'est probablement la très grande variété de structures électromagnétiques, considérées le plus souvent comme ésotériques. Elles font, en effet, rarement l'objet d'un enseignement dans les cours d'électrotechnique quel que soit leur niveau.

## 1.2- Domaines d'application et marchés

En Europe le marché de renouvellement des équipements électroménager et automobile est d'environ 10 à 15 millions d'unités par an selon leur durée de vie. Le tableau suivant donne, en millions d'unités, la demande annuelle européenne et mondiale de quelques appareils dans le domaine de l'électroménager (données L. Perier SGS Thomson 1993) :

type	Lave linge	Lave vaisselle	µ-ondes	Aspirateurs	Robot ménagers
Europe	12	6	8	12	12
Monde	36	14	42	61	41

type	ventilateurs	Réfrig.	Climatiseurs	Rasoirs	Outils portatifs
Europe	5	14	0,1	15	12
Monde	70	49	20	50	37

On peut considérer que ces données évoluent à la hausse surtout au niveau mondial compte tenu de la croissance du taux d'équipement dans les pays en voie de développement. Les marchés européen et américain des moteurs fractionnaires sont d'environ respectivement 4 et 8 G\$.

Dans l'électroménager où l'alimentation se fait la plupart du temps en courant alternatif, les moteurs utilisés sont de types asynchrones, universels et synchrones (démarrage direct).

La domotique, domaine qui représente les automatismes dans l'habitat, perçoit lentement. Somfy détiendrait 55% d'un marché annuel mondial de 2,2 M de moteurs de volets roulants.

Dans le secteur des **accessoires automobiles**, avec plus de 40 millions d'automobiles fabriquées annuellement, la production mondiale de moteurs électriques dépasse le milliard (quasiment tous à collecteur) pour un marché d'environ 4 G\$ (environ 15 millions pour l'Europe de l'Ouest). Des constructeurs comme Nippondenso ou Delphi fabriquent entre 300 et 500 000 moteurs par jour ! Le niveau d'équipement des véhicules évoluant rapidement, la production croît également en conséquence. Une automobile ordinaire exploite d'une dizaine de machines électriques (démarrateur, ventilateurs thermique et habitacle, essuie-glace AV et AR, lève-vitres, alternateur...) et une voiture haut de gamme en a près de 100 [Berg\_94]. La tension d'alimentation de ces moteurs est actuellement de 14 V et passera progressivement à 42 V dans une dizaine d'années, ce qui nécessitera plus de lames au collecteur (pour des raisons de commutation).

### Horlogerie

Le moteur Lavet présent dans la majorité des montres et pendules électriques à aiguilles est produit à plus de 600 millions d'exemplaires par an [Minot\_98].

### Informatique

Il s'agit d'un marché en pleine explosion (population encore en phase d'équipement et renouvellement très rapide « grâce » à une durée de vie de 4 à 5 ans). En 1999, environ 200 M de disques durs par an et autant de lecteurs de disquettes ont été produits, c'est un marché en très forte expansion, en particulier vers les applications vidéo et photographie numérique.

Le marché des lecteurs et graveurs de CDROM et autres DVD est également en très forte croissance. En 1995, 40 M de lecteurs de CDROM ont été commercialisés.

### Autres marchés

Par manque d'informations, nous ne pourrions qu'évoquer les gros marchés suivants : appareils photos et autres caméras vidéo, appareils audio, magnétoscopes, jouets, modélisme, ventilateurs d'équipements, ...

**Les fabricants des moteurs** de grande série sont soit des producteurs d'équipement qui considèrent que les moteurs font partie des composants « stratégiques ». C'est le cas de la plupart des équipementiers automobiles (DelcoRemy, NipponDenso, Bosch, Ford, TRW, Valeo, MagnetiMarelli, Lucas, pour n'en citer que quelques uns), des fabricants de produits électroménagers (Whirlpool, Moulinex, Seb...). Mais, il existe aussi des spécialistes des moteurs de grande diffusion, ils alimentent tous les marchés précédemment évoqués. Par exemple, Ametek produit 23 millions de moteurs universels pour aspirateurs entre 600 et 1400 W, Mabuchi expulse de ses chaînes plus d'un milliard et demi de moteurs par an (principalement des petits moteurs à collecteur) soit environ 50 moteurs chaque seconde !

En somme, c'est par milliards que sont annuellement fabriqués les petits moteurs électriques dans des usines de productions très automatisées et, de plus en plus, déplacées en Asie du Sud-Est ou en Amériques Centrale et du Sud.

### 1.3- Aspects système : l'intégration du moteur à la fonction

Dans nombres d'applications, les moteurs sont intégrés à des systèmes complexes, ils doivent être conçus dans un souci d'intégration (au sens de la compacité et de la compatibilité) à la fonction générale. Leur forme, leur température de fonctionnement, leur pollution électromagnétique (etc...) doivent être déterminés ou limités en fonction d'un grand nombre de contraintes technologiques et économique. C'est le cas des exemples suivants de systèmes mécatroniques dans lesquels, on notera une forte intégration des actionneurs ou générateurs à leur environnement électronique.

#### Disques durs magnétiques pour le stockage de l'information.

C'est un domaine tout à fait remarquable dans le sens, où contrairement à beaucoup d'autres secteurs à très fortes contraintes économiques, la technologie progresse très vite pour accroître sans cesse les performances : compacité, capacité de stockage (actuellement plus de 30 Go par plateau 3,5"), rapidité d'accès, en somme, le coût de l'octet stocké décroît vertigineusement. Dans un disque dur, il faut deux actionneurs : un pour l'entraînement du plateau de disques, le second pour le déplacement des têtes de lecture-écriture. Les têtes se trouvent à moins d'un 1/10<sup>ème</sup> de µm des plateaux ce qui donne une idée des précisions requises aussi bien en positionnement qu'en rotation.

Pour des raisons d'encombrement, les moteurs d'entraînement du disque, après avoir été placés en dessous (structures très plates) sont maintenant intégrés à l'intérieur de l'empilement de disques (cylindriques à rotor extérieur), ce sont exclusivement des moteurs à aimants autopilotés par capteurs à effet Hall ou sans capteurs. La vitesse de rotation doit être très précise et la rotation très régulière avec une grande répétitivité (les paliers à billes doivent être assistés ou remplacés par des dispositifs hydrodynamiques).

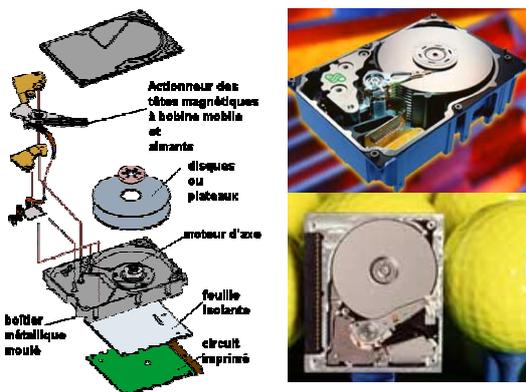


Figure 1.2

Disques durs : vue éclatée et photographies (en haut : Seagate, en bas IBM micro-disk)

Après avoir utilisé des actionneurs pas à pas rotatifs associés à un système de conversion rotation-translation, les têtes de lecture-écriture des disques durs modernes sont entraînées directement par des actionneurs à bobine mobile semi-rotatifs pour minimiser les temps d'accès. On s'oriente vers des systèmes à aimants mobiles (même principe) pour accroître encore les accélérations.

La miniaturisation des disques (aujourd'hui 1" de diamètre : 340 Mo pour un système de 19 grammes pour un encombrement de 43x36x5mm<sup>3</sup>, voir fig. 1.2) conduit à des recherches vers des micromécanismes réalisés en nouvelles technologies.

#### Montres et horloges électriques et à aiguilles.

Les montres à aiguilles constituent un bel exemple d'intégration mécatronique. La figure 1.3 décrit une montre autonome utilisant les mouvements du poignet pour faire tourner un générateur à très grande vitesse qui recharge un supercondensateur, l'énergie est ensuite utilisée pour le comptage du temps et pour l'alimentation du moteur d'entraînement des aiguilles.

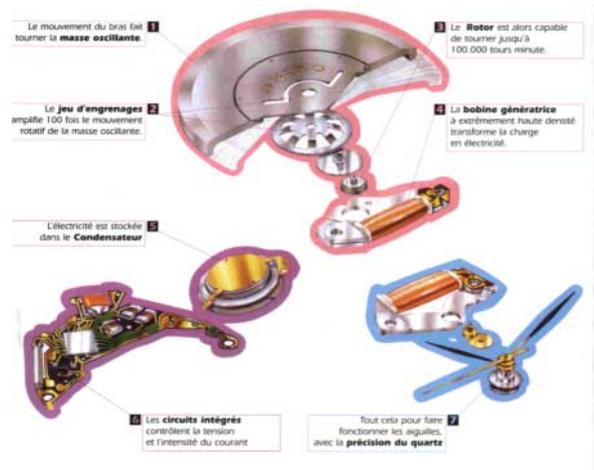


Figure 1.3

Montre électrique à recharge par les mouvements du poignet (Seiko)

#### Ventilateurs

Le moteur est intégré à l'intérieur de la turbine, la plupart du temps, il s'agit de structures à rotor extérieur. Compte tenu de la durée de vie exigée, les collecteurs sont exclus, celle-ci est donnée par la qualité (et le prix) des paliers (coussinets, billes ou autres). Le silence est également un autre critère essentiel. Selon la source d'alimentation disponible, ils mettent en œuvre soit des moteurs asynchrones monophasés, soit des moteurs synchrones autopilotés à aimants (DC brushless).

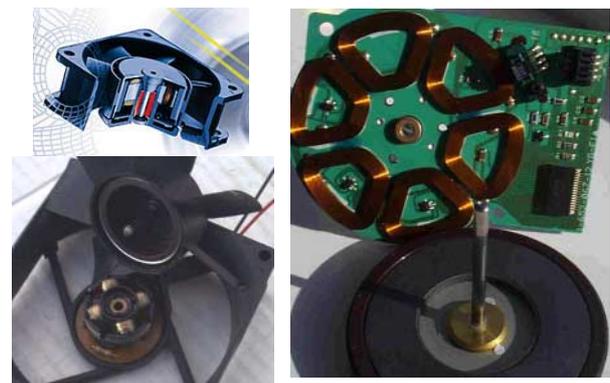


Figure 1.4

Moteurs à commutation électronique associés à l'électronique de pilotage (à gauche : ventilateur, à droite : magnétoscope)

#### Magnétoscopes

Pour l'entraînement du tambour supportant les têtes magnétiques mais également pour l'entraînement du cabestan, on utilise des moteurs triphasés à aimants autopilotés intégrés à un circuit imprimé. La figure 1.4 (droite) montre une photo de l'architecture fréquemment utilisée pour le moteur du cabestan, il s'agit d'une structure à champ axial, le circuit imprimé supporte le circuit ferromagnétique de fermeture du flux statorique (plaque d'acier se trouvant sous le circuit), les 3 capteurs à effet Hall que l'on peut voir au centre des 3 bobines (en bas à gauche) ainsi que les circuits de commande et de puissance du moteur.

#### 1.4- Contraintes et évolutions

Le coût de revient est toujours une donnée industrielle fondamentale mais il est encore plus crucial quand il s'agit de grande série. Le produit doit donc répondre au besoin au meilleur coût et offrir de nouvelles fonctionnalités qui le rendront plus attractif par rapport à la concurrence. Le coût des matières premières intervient pour plus de 50% dans le prix de revient d'un moteur fabriqué en très grande série :

- 15 à 20 F/kg pour le cuivre : les cours du cuivre varient beaucoup ;
- 3 à 6 F/kg selon la teneur en silicium pour des tôles à grains non orientés de 0,5 mm d'épaisseur ;
- aimants : 30 à 40 F/kg pour des ferrites, moins pour les plasto-ferrites, 300 à 1000 F/kg pour les NdFeB selon les nuances (plasto-NdFeB ou pur). En terme d'énergie par unité de prix, l'écart se réduit, on peut dire que les ferrites sont encore 2 à 3 fois moins chers que les NdFeB.

Dans le process de fabrication, la simplicité des structures des machines est un élément important (moins d'étapes, machines de production moins complexes et plus fiables...), c'est ainsi que dans les applications où les contraintes économiques sont primordiales, la solution monophasée à circuit magnétique en U (ou encore Lavet) est souvent choisie qu'il s'agisse de moteurs à collecteur ou asynchrones. Les moteurs asynchrones triphasés produits en grande série atteignent un prix voisin de 40 F/kg soit environ 250 F/kW.

En ce qui concerne les contraintes techniques, les situations sont très différentes selon les domaines. Le coût et le respect des normes sont systématiquement des contraintes fortes.

Dans le secteur de l'électroménager, s'ajoutent la discrétion acoustique et l'ergonomie (compacité en général). Très souvent, l'exigence de compacité nécessite un moteur rapide associé à un réducteur mais la diminution du bruit pourrait conduire à sa suppression, à condition de trouver des moteurs fort couple et bas coût, par exemple piézo-électriques. Mais lorsque la vitesse requise par la fonction est suffisamment élevée (centrifugeuses, mixers, moulinettes, aspirateurs, sèche-cheveux, petits ventilateurs...), les moteurs entraînent directement leur charge. En revanche, de nombreuses applications (robots culinaires, batteurs, presse-agrumes, couteaux électriques, ouvre-boîtes...) utilisent encore un réducteur car celui-ci confère le meilleur prix et le meilleur encombrement du système compte tenu des contraintes et des exigences des utilisateurs. L'outillage électroportatif est sensiblement moins contraignant sur le bruit acoustique.

Le rendement est rarement un critère important, sauf pour les longues durées de fonctionnement (circulateurs de chauffage central, VMC...). On s'est aperçu assez récemment que ces dispositifs étaient de gros consommateurs d'énergie car ils fonctionnent souvent en permanence et avec de faibles rendements de conversion [Kudel\_98]. Les petites pompes de circulation ont des rendements de 7 à 12% pour des puissances consommées de 25 à 80 W, le moteur asynchrone monophasé gaspille une part notable de l'énergie (rendements de 20 à 30% pour ces puissances). Des turbines mieux conçues et des moteurs à rendement améliorés alimentés par variateur électronique permettraient de faire des gains énergétiques considérables.

## 2- Les moteurs asynchrones

Les moteurs asynchrones sont très utilisés dans les applications de grande série car ils sont, a priori économiques (fabrication simple) pour une longue durée de vie, souvent limitée par les paliers. Ils sont évidemment intéressants lorsqu'ils peuvent fonctionner directement à partir du réseau alternatif. L'alimentation monophasée étant la seule souvent disponible et le moteur asynchrone monophasé ayant un couple de démarrage nul, il est nécessaire de trouver des solutions pour réaliser des moteurs asynchrones sensiblement diphasés alimentés en monophasé. On rencontre deux familles de solutions : celles à bagues de déphasage et celles diphasées à condensateur de déphasage. Dans tous les cas, le circuit magnétique est feuilleté (souvent des tôles de 0,5 mm ou plus), la cage est coulé en aluminium (sauf dans les moteurs de pompes à rotor immergé où elle est en cuivre), les barres sont souvent inclinées ou en chevron pour réduire les vibrations dues aux variations de réductance locale (en chevron pour supprimer l'effort axial résultant de l'inclinaison : cas du ventilateur de la figure 2.3b). Comme leur couple de démarrage est assez faible, ces moteurs sont généralement utilisés dans des ventilateurs et des pompes (électroménager entre autres). Les

bobinages au stator facilitent la surveillance de température qui peut être faite par une thermistance ou un fusible couplé thermiquement aux têtes de bobine.

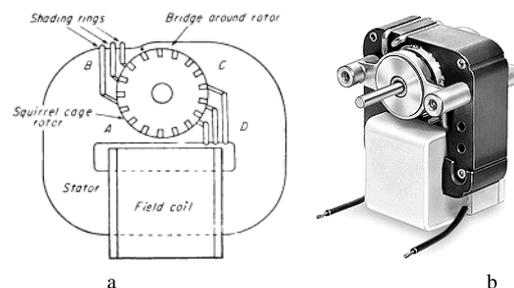
### 2.1- Structures

#### 2.1.1- Structures à bagues de déphasage

Pour obtenir, à partir de l'unique bobine d'alimentation une deuxième phase qui produira un champ décalé spatialement d'un quart de période et de  $\pi/2$  électriquement, on peut utiliser le principe de la bague de déphasage (utilisé également dans les électroaimants alimentés en courant alternatif). On parle également de moteurs à spires de Frager, à bobines écrans ou encore shaded poles.

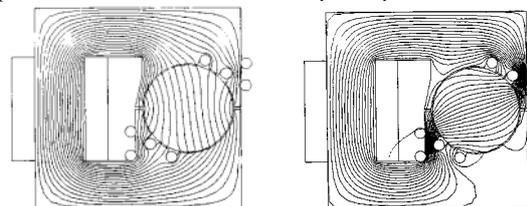
Ces machines n'ont évidemment qu'un seul sens de rotation, mais, en modifiant l'emplacement des bagues (pôles opposés), on peut obtenir des moteurs tournant dans un sens ou un autre.

La figure ci-dessous montre la structure extrêmement fréquente (des milliards fabriqués chaque année) à circuit magnétique en U, bobine en U, 2 pôles munis chacun de une, deux ou trois bagues en court-circuit (en cuivre).



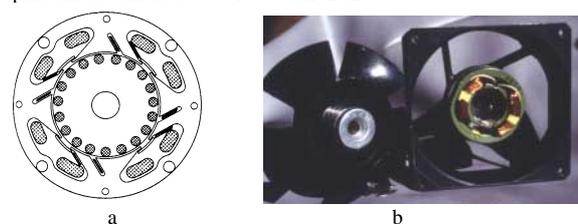
**Figure 2.1**  
Structure « Shaded Pole » en U à 2 pôles  
a : 3 bagues en court-circuit par pôle [Nasar\_87]  
b : photo structure 2 bagues par pôle

La figure suivante montre les lignes de champ calculées avec, d'une part, la bobine d'alimentation seule et, d'autre part, bobine et spires de Frager alimentées. On voit ainsi apparaître une deuxième composante du champ magnétique qui, si elle est convenablement déphasée, permet d'obtenir un système quasi-diphasé.



**Figure 2.2**  
Lignes de champ avec et sans courant dans les bagues de déphasage [Lamo\_96]

Une autre architecture est également utilisée (figure 2.3), elle comporte un stator cylindrique à pôles saillants (il peut donc y avoir plus de deux paires de pôles, contrairement à la structure précédente). Elle est plus compacte mais également sensiblement plus complexe à la fabrication. De nombreux ventilateurs (refroidissement des systèmes ou ventilation de logement) mettent en œuvre de telles structures avec, souvent un rotor extérieur. Les puissances vont de 5 W à 100 W environ.



**Figure 2.3**  
a : Structure 4 pôles à spires de Frager [Nasar\_87]  
b : exemple de ventilateur 2 pôles

La simplicité des moteurs à bobine écran se paye souvent cher en terme de rendement, celui-ci pour des puissances utiles de quelques dizaines de watts, se situe dans la plage de 10 à 30% selon

la puissance et les compromis de conception (couple de démarrage, facteur de puissance). Le glissement nominal est couramment de 20% et le facteur de puissance compris entre 0,4 et 0,6. Cela se traduit, outre un coût de fonctionnement élevé (surtout s'ils fonctionnent durant un temps important, ce qui est souvent le cas), par un volume et une masse importants, donc un coût matière finalement élevé. Cette raison les a mis dans une position en régression sur le marché au profit des moteurs synchrones de type Lavet, également monophasés, beaucoup plus petits et capables de démarrer si la charge le permet (Cf § 4.2).

### 2.1.2- Structures à condensateur de déphasage

Dès que les puissances dépassent quelques dizaines de watts, le faible rendement des structures précédentes ou/et leur faible couple de démarrage conduit à des solutions coûteuses (il existe toutefois de gros moteurs asynchrones à bagues de déphasage). Ainsi, les pompes de chauffage central, les entraînements de tambour de lave-linge (sans variateur électronique), les volets roulants motorisés et bien d'autres applications, mettent en œuvre des moteurs asynchrones diphasés à alimentation monophasée. La phase principale est alimentée directement par le réseau et la phase auxiliaire l'est à travers un condensateur permettant de déphaser au plus près de  $\pi/2$  son courant par rapport à celui de la première. L'inversion du sens de marche est possible grâce à un simple commutateur [Gréh\_95].

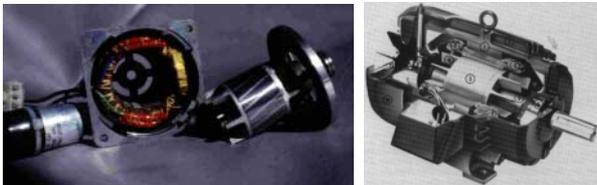


Figure 2.4

Moteurs asynchrones « monophasés » à condensateur de déphasage  
 a : petit moteur 230 V-50 Hz  $\phi$  5 cm (condensateur 4  $\mu$ F)  
 b : moteur autoventilé de quelques 100 W à condensateur

Ces moteurs se rencontrent jusqu'à des puissances de l'ordre de 1 à 2 kW (exceptionnellement : quelques 10 kW). Selon que le condensateur est calculé pour optimiser le couple de démarrage, le rendement ou le facteur de puissance au fonctionnement nominal, le  $\cos \phi$  et le rendement prennent des valeurs très différentes, le tableau suivant donne quelques exemples et montre une comparaison avec un cas triphasé :

P @ N	$C_d/C_n$	$\cos \phi_n$	$\eta_n$ en %
MONO 120 W 1400 tr/mn	1,5	0,58	50%
	0,4	0,9	57%
TRI 120 W 1400 tr/mn	2,4	0,63	60%
MONO 500 W 1400 tr/mn	1,2	0,64	62%
	0,35	0,92	66%
TRI 550 W 1400 tr/mn	2,2	0,73	73,5%

Notons également la possibilité d'avoir deux vitesses par le traditionnel changement de pôles du bobinage statorique (principe Dalhander) utilisé, entre autres, dans les lave-linge pour obtenir les vitesses de lavage et d'essorage.



Figure 2.5

Moteur asynchrone (SIMU) associé à un frein pour volets roulants

La figure 2.5 montre un « moteur tubulaire » (démonté) pour entraînement de volets roulants, le rotor est associé à un frein à manque de tension (une partie du champ statorique est dérivée pour attirer un plateau mobile qui décolle le frein). La gamme des moteurs Somfy couvre des puissances de 10 W à 190 W mécaniques, le

réducteur associé possède un rapport de 100 à 300 pour donner des couples de sortie de 4 à 100 N.m [Gréh\_95].

La figure 2.6 montre une coupe de moteur asynchrone chemisé à rotor immergé [Kudel\_98] ainsi qu'une photo de pompe de circulateur de chauffage central.

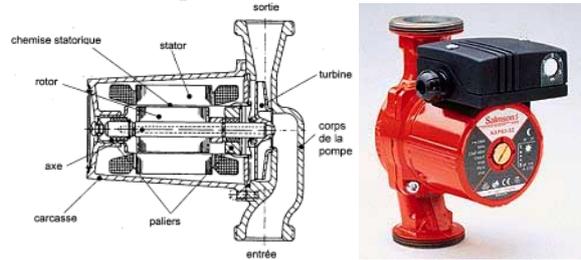


Figure 2.6

Coupe du moteur chemisé et pompe de circulateur de chauffage (Salmson)

### 2.2- Alimentations électroniques économiques

La variation de vitesse des machines asynchrones nécessite, a priori, de régler leur fréquence ce qui conduit à des structures de convertisseur souvent beaucoup plus coûteuses que le moteur lui-même, particulièrement dans la gamme de puissance au delà de 100 W. Ainsi, les fabricants recherchent des solutions économiques souvent très dégradées comme, par exemple, l'alimentation par gradateur (fréquence fixe).

La figure 2.7 rappelle l'évolution de la caractéristique couple-vitesse d'un MAS (celle d'un moteur monophasé à condensateur ou à bague de déphasage est semblable à celle d'un moteur triphasé) lors d'une alimentation à fréquence fixe ou à fréquence variable.

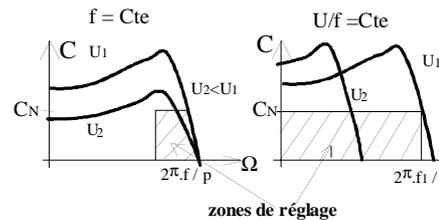


Figure 2.7

Réglage de la caractéristique mécanique des MAS

La solution la plus économique mais également la plus médiocre sur le plan de la qualité consiste à alimenter l'ensemble par un gradateur. Cela revient, en première approximation, à faire varier la tension d'alimentation, par conséquent, la plage de réglage de vitesse est très réduite mais cela peut suffire pour certaines applications de ventilation. Elle s'applique aussi bien aux machines à bobine écran qu'à celles à condensateur de déphasage.

En outre, dans le cas des moteurs à condensateur, la valeur optimale de la capacité est différente selon le point de fonctionnement considéré (par ex. démarrage ou régime nominal), il est ainsi envisageable de la faire varier en plaçant à ses bornes un triac [Mulj\_93], cela permet de trouver par exemple un meilleur compromis entre le couple de démarrage et le rendement au point nominal.

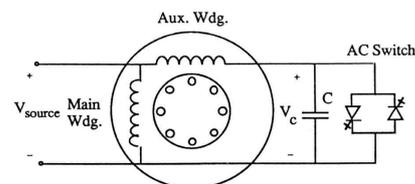


Figure 2.8

Réglage de la capacité par gradateur [Mulj\_93]

La figure 2.9 montre un variateur de fréquence économique pour moteur monophasé à condensateur [Miya\_93]. Un seul bras de pont suffit en utilisant une source d'alimentation à diviseur capacitif.

Dans le cas des moteurs de volets roulants où les exigences de couple et de capacité sont sévères, Somfy a envisagé des moteurs triphasés alimentés par un variateur également triphasé [Orsa\_94].

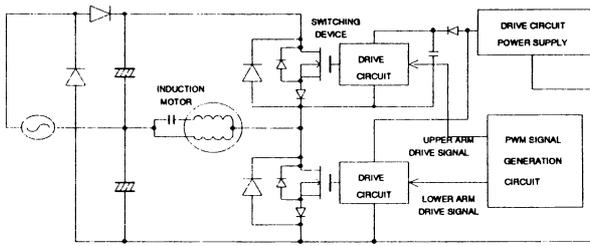


Figure 2.9

Réglage de tension et fréquence pour MAS monophasé [Miya\_93]

### 3- Les moteurs à collecteur mécanique

Ce sont les machines de prédilection dans les applications alimentées en courant continu (accessoires automobiles et équipements basse tension divers) et, en courant alternatif, lorsque l'on souhaite des vitesses supérieures à la vitesse maximale de synchronisme permise par la fréquence d'alimentation (3000 ou 3600 tr/mn) sans l'aide d'une alimentation électronique. Ce sont les moteurs dits universels qui permettent de grandes vitesses comme dans les aspirateurs de poussières (jusqu'à 50 000 tr/mn). Cependant, les collecteurs mécaniques ont une contre partie : l'usure des balais et/ou du collecteur qui, selon la qualité des matériaux employés, les régimes de fonctionnement et la qualité des commutations, offrent des durées de vie limitées à quelques milliers (voire dizaines de milliers) d'heures. Sachant qu'un fonctionnement continu durant une année représente plus de 8000 h, les moteurs à collecteur se trouvent exclus des applications à très longue durée de vie. En outre, la production de poussières d'usure et de vibrations peut également les prohiber. C'est généralement pour une ou plusieurs de ces raisons que les moteurs à collecteur sont, déjà depuis 10 à 30 ans, remplacés par des moteurs synchrones autopilotés.

Les caractéristiques mécaniques des moteurs à collecteur dépendent de leur alimentation et de leur mode d'excitation. La figure 3.1 rappelle les allures des caractéristiques couple-vitesse des machines à collecteur à aimants permanents (flux inducteur constant) et à excitation série (moteurs universels).

Rappelons que, lorsque qu'un réglage électronique de vitesse est nécessaire, les moteurs à collecteur présentent l'énorme avantage de se satisfaire des structures de convertisseur les plus simples et les plus économiques, ce qui reste, aujourd'hui encore, un de leurs atouts majeurs. En l'absence de réversibilité, un simple hacheur à un seul transistor suffit à partir d'une alimentation en tension continue.

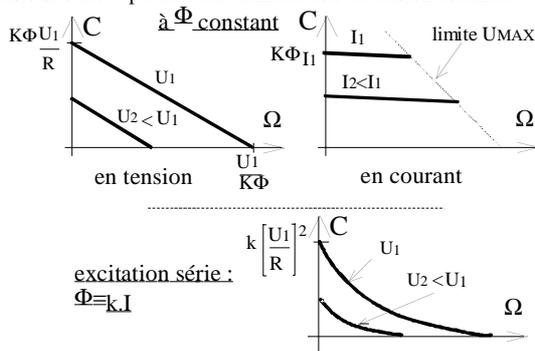


Figure 3.1

Caractéristiques mécaniques des moteurs à collecteur

Les tout petits moteurs (moins de quelques watts) utilisent des balais en métaux précieux, principalement pour minimiser les frottements qui prendraient des proportions inadmissibles dans cette gamme de puissances et si les durées de fonctionnement sont importantes. Pour les puissances plus élevées et/ou pour des applications très impulsives (réglage de rétroviseur ou verrouillage des portes, par exemples), on utilise des balais en carbone.

#### 3.1- Excitation à aimants

Il s'agit d'un très large domaine recouvrant beaucoup d'applications, presque toujours en basse tension (à partir de piles ou d'accumulateurs ou d'alimentations basse tension). On rencontre ces moteurs d'équipement automobile, les jouets, les appareils photos, la

motorisation des commandes de platines cassettes audio, les éjecteurs de lecteur de CD (environ 0,1 W), les petits outils (visseuse, perceuse...) ou appareils électroménagers (aspirateurs) sans fil...

Les aimants sont presque exclusivement en ferrite ou plastoferrite. Mais lorsque les performances (puissance massique, rendement) doivent être élevées et que l'acheteur est prêt à payer le prix (modélisme), on rencontre des aimants haute énergie (SmCo ou NdFeB) souvent grande vitesse (plus de 20 000 tr/mn) avec des collecteurs à 7 ou 11 lames. L'inducteur possède de 2 à 3, voire 4 paires de pôles. La limite supérieure est liée plus à la complexité du bobinage d'induit qu'à la fréquence.

Les induits des moteurs économiques comportent un nombre d'encoches minimal de 3 (structure la plus simple appelée encore induit Siemens avec une seule paire de pôles : Fig. 3.1 b et c), on rencontre couramment 6, 8, 12, 16 encoches. Plus le nombre d'encoches est élevé, meilleures sont la commutation et les ondulations de couple.

Les rendements peuvent être très bons, c'est une question de prix, de masse (remplissage en cuivre des encoches...) et de matériaux. On trouve des petits moteurs de quelques 1/10<sup>ème</sup> de watt dont les rendements dépassent 50% et des moteurs de quelques centaines de watts pour lesquels on atteint péniblement cette valeur, alors que les effets d'échelle dans le cas d'une complète homothétie devraient conduire à des écarts très importants.

Exemples de structures simplifiées :

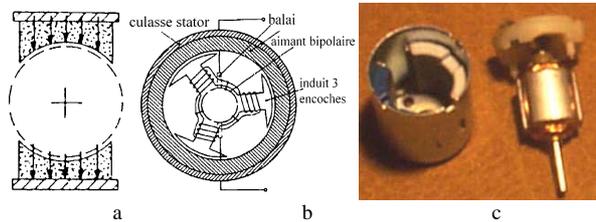


Figure 3.2

MCC : a : culasse se refermant aux extrémités, b : structure à culasse classique, induit à 3 encoches et collecteur à 3 lames, c : photographie

Exemples :

Moteur Mabuchi 3 encoches, aimants ferrite RK370 pour jouet (véhicules radio-commandés) :

au rendement maximum sous 7,2 V :  $P_{mec} = 8,4$  W,  $C = 5,9$  mN.m,  $N = 13\ 700$  tr/mn (à vide : 16500 tr/mn, au démarrage : 36 mN.m). Diamètre : 24 mm, longueur : 30 mm, masse : 51 g, balais carbone.

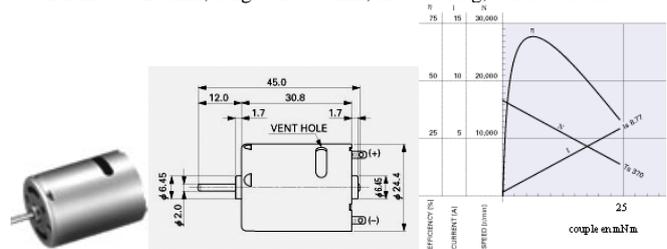


Figure 3.3

Moteur de jouet Mabuchi 7,2 V-8,4 W [Mabuchi]

Moteur Astroflight modélisme à aimants samarium-cobalt Cobalt 05, collecteur à 7 lames, 400 W à 24 000 tr/mn, rendement 78%, masse 150 grammes (diamètre 33,5 mm, longueur 63,5 mm), soit une puissance et un couple massiques de 2,6 kW/kg et 1,1 N.m/kg, valeurs excellentes pour un prix d'environ 1000 F...

Moteur Valeo ventilateur thermique moteur (10T45) [Deses\_95]

Environ 170 W utiles à 2000 tr/mn, au rendement maximum 65%  
Aimants ferrites (0,39 T à 20°C) 2 paires de pôles  
Diamètre extérieur 100 mm, épaisseur de culasse : 2,5 mm, longueur : 61 mm, entrefer : 0,6 mm, diamètre d'entrefer : 80 mm, longueur de l'induit : 33,5 mm, 16 encoches, épaisseur d'aimants : 6,9 mm, longueur : 42 mm, arc polaire : 66°.

On remarquera que la longueur de fer du stator est beaucoup plus importante que celle de l'induit, on met à profit la culasse statique pour la tenue mécanique de l'ensemble et sa longueur importante

permet d'avoir une épaisseur de culasse plus faible (à même induction), les aimants ont également une longueur supérieure à celle de l'induit ce qui permet, à encombrement global donné, d'accroître leur flux. Le dessin suivant qui montre un résultat de calcul de champ 2D, a été effectué avec une épaisseur accrue pour prendre en compte cet « effet 3D ».

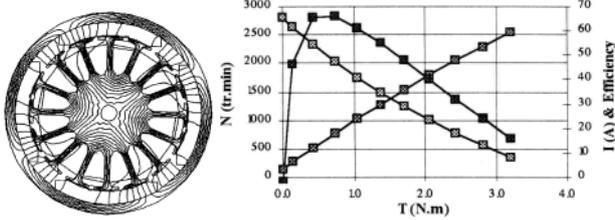


Figure 3.4

Moteur 12 V-250 W Valeo de ventilateur thermique moteur [Deses\_95]

Les plus grosses machines à collecteur à aimants fabriquées en grande série sont probablement les démarrateurs de moteurs thermiques [Dong\_94]. Les contraintes sont très sévères car il faut assurer un couple de démarrage extrêmement élevé dans des conditions de température très étendues. Le moteur série était au départ le mieux adapté pour ses qualités de couple de démarrage et d'autolimitation de la puissance. Mais, tout d'abord pour le démarrage des petites cylindrées puis pour des puissances croissantes (jusqu'à 2 kW pour des moteurs thermiques jusqu'à 2,2 litres environ), le moteur à aimants permanents s'est progressivement imposé. La masse d'un démarreur de 2 kW est ainsi passée de 12 kg en 1970 à 4 kg dans les années 90. Le démarrage à froid est, de ce point de vue, dimensionnant pour les aimants car c'est là que le courant de démarrage est le plus élevé et que les ferrites (technologie employée pour ses qualités économiques) sont plus sensibles à la désaimantation.

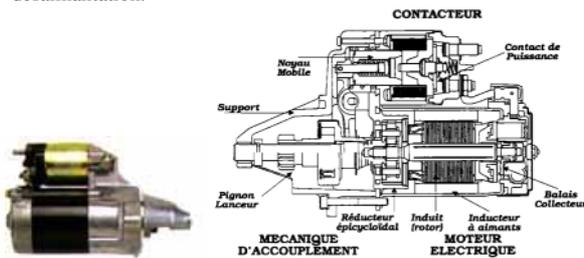


Figure 3.5

Démarrateur de moteur thermique (photo Denso et schéma Valeo)

Les vitesses de rotation de l'induit atteignent 30 000 tr/mn pour des induits de diamètre 50 mm (ce qui donne des vitesses périphériques élevées), sa température peut atteindre 400°C dans son régime de fonctionnement complètement impulsif (échauffement quasi-adiabatique). Le circuit magnétique est à 4 ou 6 pôles. Les balais en cuivre et graphite, parcourus par des courants allant jusqu'à 400 A, subissent des densités de courant beaucoup plus élevées que dans les machines à collecteur classiques.

### 3.2- Excitation bobinée

Dans le domaine de la grande série, le moteur à collecteur à excitation bobinée série occupe une position dominante surtout en courant alternatif où il est appelé moteur universel. Il permet, comme nous l'avons déjà dit, d'obtenir des vitesses élevées. Ainsi, si l'utilisation d'un réducteur est possible (perceuses, démarrateurs), on obtient une très grande compacité. En courant alternatif, la vitesse variable est aisément obtenue grâce à un simple gradateur, c'est ainsi que les lave-linge, naguère entraînés par des moteurs asynchrones à condensateur, utilisent, en majorité, un moteur universel. Les aspirateurs et les perceuses en sont quasiment tous équipés. Son principal handicap est sa commutation difficile en courant alternatif, les étincelles sont très difficiles à éviter [Matsu\_95].

Selon les contraintes d'encombrement, deux architectures sont rencontrées, comme le montre la figure 3.6. La première à bobinage d'excitation asymétrique se rencontre dans certaines applications de petite puissance (rasoirs, jouets...), elle est de plus en plus rare. La seconde occupe un marché très étendu des outils portatifs (perceuses,

meuleuses d'angle...) aux aspirateurs en passant par les lave-linges (800 W environ jusqu'à 18 000 tr/mn).

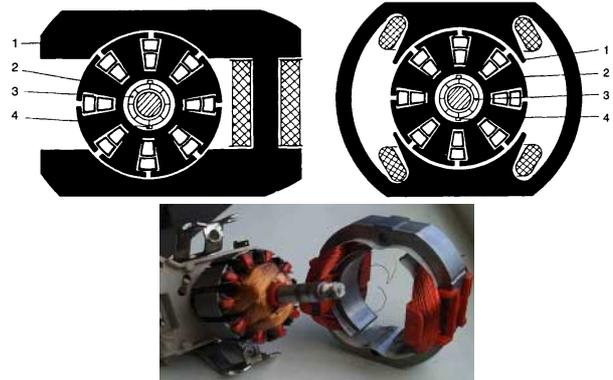


Figure 3.6

Architectures du circuit magnétique de moteurs universels [Mocz\_87] et Photo moteur collecteur 10 lames 10 encoches, robot culinaire

Le moteur universel peut être avantageusement alimenté en courant continu ondulé grâce à un redresseur lui-même contrôlé par un triac (surcoût des diodes) ou par un hacheur haute fréquence. Le gain de performances du moteur permet de réduire sensiblement ses dimensions et, parfois, de compenser le surcoût de l'électronique. En outre, l'alimentation en courant continu permet une réduction du bruit acoustique.

Dans le domaine des aspirateurs ménagers, on assiste à un accroissement des vitesses de rotation dans l'objectif de réduire le volume et le coût de l'ensemble moteur-turbine [Mult\_99]. Le tableau suivant (d'après Moulinex) montre l'évolution des vitesses, en Europe, pour des puissances (absorbées) de 1300 W. Les moteurs sont des moteurs universels dont les limites technologiques ne cessent d'être repoussées (vitesse périphérique de 90 m/s). Cependant le collecteur (souvent 24 lames pour un induit à 12 encoches) freine la progression (limites de commutations sous 230 V et encombrement : allongement de la distance entre paliers). En outre leur durée de vie est comprise entre 500 et 1500 heures. Ainsi des moteurs à commutation électronique (aimants permanents ou réluctance variable), capables de plus hautes vitesses, sont à l'étude. Le prix de revient d'un groupe moteur et turbine 45 000 tr/m est de 50 F environ.

année	1993	1994	1996	1997
$\Omega_{Max}$ tr/mn	26 000	32 000	42 000	45 000
masse moteur+turbine	2,5 kg	1,9 kg	1,6 kg	1,5 kg

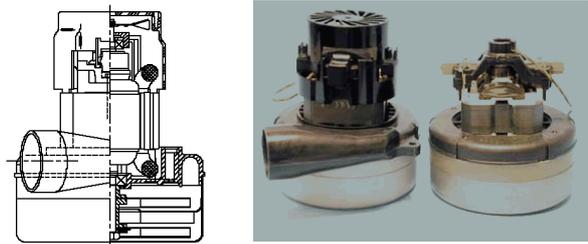


Figure 3.7

Ametek turbine 2 étages, 1500 W absorbés

## 4- Les machines synchrones

Nous avons distingué les machines synchrones des machines à collecteur mécanique par pure commodité et pour ne pas complètement rompre avec les vieilles habitudes mais il est peut-être utile de rappeler que leurs principes sont identiques. Les courants alternatifs d'induit des machines synchrones sont produits soit directement par le réseau soit grâce à une commutation électronique, quant à ceux des machines à collecteur, c'est cet organe qui commute les courants et réalise leur autopilotage.

### 4.1- À excitation séparée

Dans le domaine des petites puissances, l'excitation séparée est particulièrement avantageuse pour la génération d'énergie à vitesse



Le moteur à aimant disque Escap est unique en son genre, il met en œuvre un disque rotorique aimanté axialement et très fin [Oudet\_81]. Le stator est constitué de U en tôles excités par des bobinages globalisés, l'induit est diphasé. Cette architecture originale permet d'obtenir de très grandes accélérations et des fréquences très élevées grâce à de faibles pertes magnétiques.

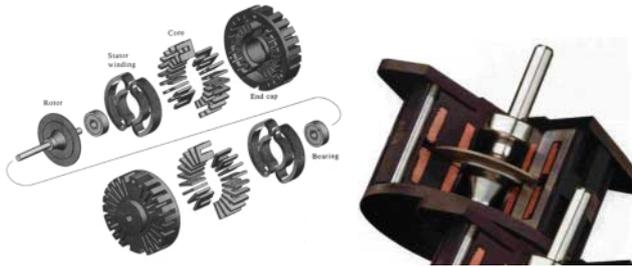


Figure 4.7  
Moteur à aimant disque Portescap [Oudet\_81] [Kenjo\_92]

Enfin, citons les moteurs hybrides dans leur structure la plus courante, celle à aimantation axiale au rotor et deux dents décalées d'un demi-pas pour obtenir un flux inducteur alternatif au stator. La plus courante comprends deux phases composées chacune de 4 pôles statorique dentés et un rotor à 50 dents qui confèrent une résolution de 200 pas par tour. Il existe également des moteurs à 5 phases.



Figure 4.8  
Moteur pas à pas hybride Vexta, 200 pas par tour, 2 phases.

#### 4.4- À bobine mobile

Les disques durs modernes sont entraînés directement par des actionneurs à bobine mobile semi-rotatifs, à débattement limité, pour minimiser les temps d'accès. On s'oriente vers des systèmes à aimants mobiles (même principe) pour accroître les accélérations.

- Nombreuses architectures : 2 très fréquemment utilisées
- celle de la figure 4.9 pour les systèmes comprenant plusieurs plateaux
  - celle à bobine plate (photo de la figure 4.9) et à aimant bipolaire pour les disques ultraplats.

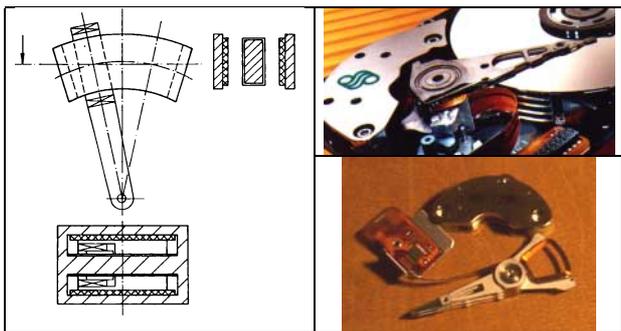


Figure 4.9  
Dessin d'un actionneur à bobine mobile tel que ceux qui actionnent les têtes de lecture-écriture des disques durs [Jufur\_89].  
Photo disques Seagate (haut) Maxtor (bas)

Les bobines mobiles sont alimentées par un hacheur 4 quadrants qui permet de les asservir en position avec une bande passante maximale.

#### 4.5. Autopilotes

Généralement, ce sont des moteurs à induit à pôles saillants, pour des raisons de simplicité de bobinage. Lorsque la structure est à rotor extérieur, l'induit est le même que celui d'un moteur à collecteur à rotor intérieur ce qui permet de conserver les techniques

de fabrication déjà bien au point. Il y est plus facile de bobiner sur un cylindre à pôles saillants qu'à l'intérieur d'un tube. Pour minimiser le coût de l'électronique, on cherche souvent à minimiser le nombre de phases, mais cela se fait aux dépens des ondulations du couple. Tous ces petits moteurs sont, généralement, alimentés en créneaux de courant, parce que cela donne la solution de commande la plus simple, c'est, sauf exception, un ou plusieurs capteurs à effet Hall à sortie logique qui délivrent les signaux de position permettant de déterminer les angles de commutation du ou des courants.

Les ventilateurs brushless intègrent une structure à rotor extérieur en plastoferrite. Les moteurs n'ont qu'un seul sens de rotation et ils sont monophasés, généralement avec un enroulement bifilaire alimenté par un onduleur à 2 transistors (figure 4. ?). Les transistors, ainsi qu'un capteur à effet Hall sont intégrés sur un circuit imprimé qui sert également de support à l'induit. Afin de pouvoir démarrer, on utilise un positionnement par le couple de détente tel que le couple de démarrage soit non nul. Pour cela, on est obligé de « bousculer » la nature, en effet, naturellement le couple de détente a tendance à arrêter le rotor dans une position de flux inducteur maximal, donc de couple synchrone nul, il faut donc changer cet équilibre, par exemple en créant une dissymétrie des pôles d'induit (chanfreinage d'un bord de chaque pôle) ou encore avec des pôles intermédiaires non bobiné (photo de la figure 4.10 droite). Dans les ventilateurs, la configuration à rotor extérieur intégré dans la turbine offre un grand moment d'inertie et tolère donc des ondulations de couple importantes, c'est pourquoi la solution monophasée est acceptable. On la rencontre pour des puissances de quelques 1/10<sup>èmes</sup> de watt (2,5 cm de côté pour 0,4 à 1 W) à quelques dizaines de watts. Le couple de détente est faible et, si les paliers lisses sont grippés, le rotor n'atteint plus sa position de démarrage, c'est souvent la cause de panne de ces ventilateurs, de vrais roulements à billes permettent d'allonger la durée de vie.



Figure 4.10  
Moteur monophasé à 4 pôles et enroulement bifilaire [Berda-91]

La structure diphasée n'est intéressante, d'un point de vue convertisseur, que si l'on peut réaliser une source à point milieu ce qui conduit à un onduleur à 4 transistors. L'exemple suivant, proposé par Emerson [Li\_98], montre une telle structure à 3 paires de pôles et son alimentation électronique pour une application économique (seulement 4 transistors et 2 capteurs à effet Hall) avec une puissance d'environ 50 W à 4300 tr/mn, le rendement global vaut 72%.

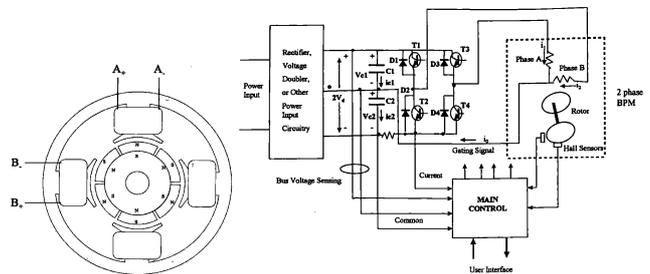


Figure 4.11  
Moteur diphasé 4-6 Emerson et son alimentation électronique [Li\_98]

Les moteurs triphasés permettent, avec 6 transistors, d'atteindre de très bonnes performances (faible ondulation de couple en particulier), ils nécessitent également 3 sondes à effet Hall. Ce sont les structures utilisées, par exemple, pour l'entraînement des plateaux de disques durs ou des cabestans de magnétoscope (en général très grand nombre de pôles). Le principe de l'alimentation dans le cas idéal où les fem sont trapézoïdales et les courants en créneaux parfaits (effets inductifs négligeables et autopilotage parfait) est décrit ci dessous

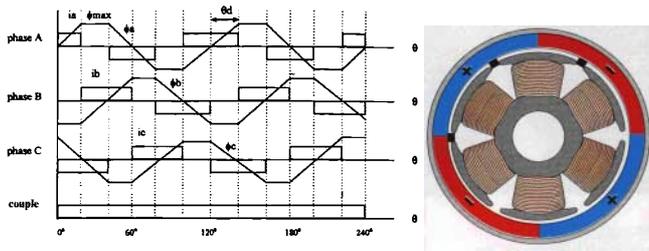


Figure 4.12  
Formes d'onde dans un moteur triphasé et structure 4 pôles (Papst)

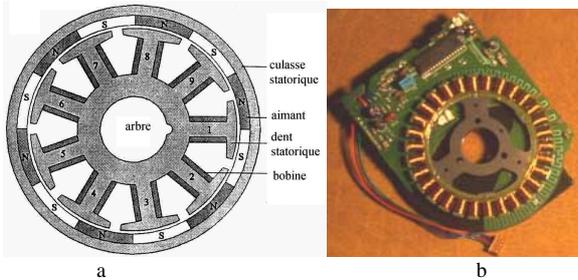


Figure 4.13  
Exemples moteurs 3 phases. a : 9 encoches 12 pôles [Hwa\_98]  
b : 30 encoches - 40 pôles.

La figure 4.13 donne deux configurations magnétiques de moteurs triphasés à induit à pôles saillants. La figure 4.12 droite montre la position des 3 sondes à effet Hall (petit carrés noirs dans l'entrefer entre les pôles d'induit) qui permettent d'obtenir les 3 signaux d'autopilotage décalés d'1/3 de période électrique. La figure 4.13b donne la coupe d'un moteur triphasé 9-12 (3 dents par phase et 12 pôles) conçu pour des entraînements de lecteur de CDROM et optimisé pour avoir un couple de détente minimal [Hwa\_98] (forme des pôles). En général, la réduction du couple de détente est obtenue par inclinaison des encoches ou par inclinaison des aimants (axialement) Dans les structures à pôles saillants, l'inclinaison nécessaire serait trop importante relativement à l'arc polaire et pénaliserait fortement les performances, sans parler de la complication de fabrication.

### Exemples

Mabuchi EG-520ED, aimants ferrite : lecteur de cassettes pour auto-radio. Vitesse réglée à 2400 tr/mn 0,98 N.m (0,25 W) électronique intégrée,  $U_n = 13,2 V$  (plage de 8,4 à 18 V), rendement global au point nominal : 25%, masse 50 grammes.

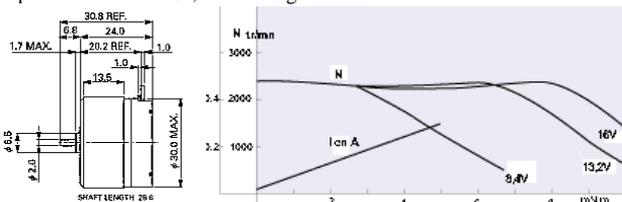


Figure 4.14  
Moteurbrushless Mabuchi 13,2 V-0,25 W [Mabuchi]

Moteur de modélisme Astroflight Brushless 020, aimants SmCo 12 encoches, 4 pôles, 120 W à 14 000 tr/mn, rendement 80%, masse 64 g ( $\phi$  24 mm, L 43 mm) 1,2 N.m/kg, électronique 6 transistors MOS masse 20 g.

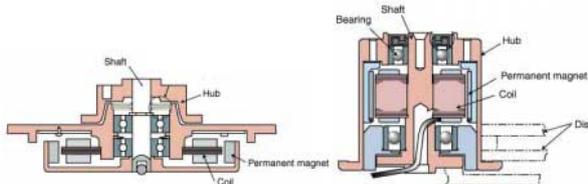


Figure 4.15  
Emplacement des moteurs d'entraînement des disques durs (Nidec)

Disques durs : ce sont exclusivement des moteurs à aimants autopilotés par capteurs à effet Hall ou indirects. La vitesse de

rotation est d'environ 8 000 tr/mn à 10 000 tr/mn et va vers 14 000 tr/mn. La figure 4.15 montre les dispositions intégrées des moteurs d'entraînement des disques de stockage empilés sur le tube. Lorsqu'il y a un seul disque, le moteur est extra-plat à champ radial et placé en dessous. Dans le cas des grosses capacités (plusieurs disques empilés), la meilleure intégration conduit à un moteur avec une structure longue de faible diamètre disposée à l'intérieur.

La figure 4.16 montre la structure d'un petit moteur économique de lecteur de CDROM ou de petits ventilateurs, il est monophasé « type sandwich » ou encore à bobine homopolaire [Chao\_98]. Pour les petites dimensions, sa construction est plus simple que celle de la figure 4.10.

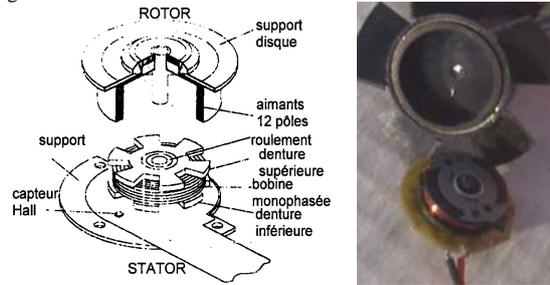


Figure 4.16  
Moteur monophasé à aimants et bobinage global (schéma et photo)

Lorsque la rotation doit être très régulière et très silencieuse et que le rendement n'est pas un critère majeur, on réalise des structures à induit sans encoches (bobinage dans l'entrefer). La figure 4.17 montre une structure triphasée à champ axial très fréquemment utilisée dans les magnétoscopes (voir §1.2 et Fig 1.4). Les bobines sont sur le circuit imprimé où sont déposés une plaque ferro-magnétique assurant le retour du flux, les circuits intégrés de pilotage et les sondes de Hall éventuelles.

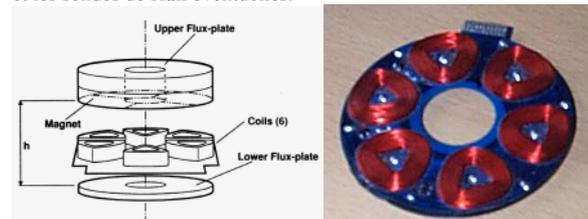


Figure 4.17  
Structure triphasée à champ axial et bobines dans l'air [Furla\_92]

## 5- Les moteurs à réluctance variable

Ces moteurs, bien connus dans le cas de la commande pas à pas, présentent des avantages de simplicité et de robustesse mais ils peuvent être bruyants et cela limite leur champ d'application. Ils sont utilisés depuis longtemps dans des domaines marginaux mais de grande diffusion, comme les rasoirs électriques (Braun), la figure 5.1 montre un moteur oscillant de rasoir, il occupe la quasi totalité du volume du boîtier. L'alimentation directe à 50 Hz du stator (à gauche sur la photo) produit une force magnétique à 100 Hz (carré de l'induction) qui excite le système oscillant mécanique à ressort (à droite) dont la fréquence propre doit être sensiblement égale. Il en résulte un mouvement de basculement qui, via une transmission mécanique articulée, produit un mouvement alternatif.



Figure 5.1  
Moteur à réluctance oscillant de rasoir électrique (Braun)

Le moteur à réluctance, sans balais comme les moteurs à aimants et asynchrone, est également un candidat au remplacement du moteur à collecteur dans bon nombre d'applications. Dans ce cas, il est alimenté et autopiloté par un onduleur électronique, a priori unidirectionnel en courant car les forces générées ne dépendent pas

de son signe. Le demi-pont asymétrique est alors la pierre de base des convertisseurs pour MRV.

Les efforts ne pouvant être qu'attractifs, le couple d'une phase ne peut être moteur que sur la moitié d'une période électrique, ainsi il faut un minimum de 3 phases pour obtenir un moteur à deux sens de rotation (ex. structure 6-4 figure 5.2). Pour un seul sens de rotation, deux phases peuvent suffire, elles doivent alors travailler en opposition (système biphasé), et comme dans le moteur à aimants monophasé, il faut une « astuce » pour permettre le démarrage sous faible couple résistant.

Citons les perceuses où il a trouvé des débouchés grâce à ses possibilités de grande vitesse (Hilti), un lave-linge (Emerson) à tambour incliné La figure 5.2 montre la comparaison des rotors du moteur universel et du moteur à réluctance qui le remplace.



Figure 5.2

MRV triphasée 6-4 à gauche et comparaison des rotors des moteurs à réluctance et universel (SRD Ltd.)

Les aspirateurs ménagers qui nécessitent de grandes vitesses de rotation permettent grâce à cette technologie de surpasser les moteurs universels sans faire de poussoirs sur le plan mécanique. Pour minimiser les problèmes de bruit acoustique, le fabricant Ametek a breveté un stator asymétrique de moteur biphasé. La figure 5.3 donne une coupe de ce stator et montre l'ensemble turbine-MRV réalisé.

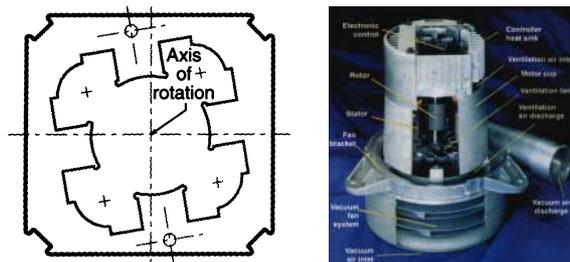


Figure 5.3

Moteur Ametek biphasé pour aspirateur [Connor\_99]

Le moteur biphasé peut fonctionner avec un convertisseur de puissance simplifié à deux transistors. La figure 5.4 décrit la structure d'un tel convertisseur (« Cdump ») où la magnétisation de chaque phase est effectuée par un transistor et la démagnétisation par un petit convertisseur hacheur élévateur chargé de renvoyer dans l'alimentation l'énergie magnétique non convertie. En outre, ce montage peut avantageusement fonctionner en correcteur de facteur de puissance.

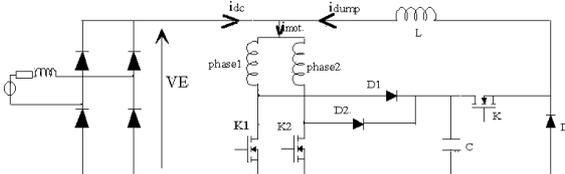


Figure 5.4

Convertisseur économique pour moteur à réluctance biphasé.

## 6- Conclusion, perspectives

Les moteurs produits en grande série révèlent une très grande diversité. Cet article avait pour objectif d'ouvrir les yeux sur un monde que nous côtoyons au quotidien mais que nous ignorons souvent. Il y manque beaucoup de points importants, en particulier, les actionneurs piézoélectriques qui percent lentement mais sûrement ainsi que les micromoteurs réalisés avec les technologies de la microélectronique qui vont faire leur apparition industrielle prochainement.

## 7- Bibliographie

- [Jufer\_79] M. JUFER, « Electromécanique », Traité de l'école polytechnique fédérale de Lausanne, Ed. Georgi (1979).
- [Mult\_00] B. MULTON « Motorisation des véhicules électriques », Techniques de l'Ingénieur, à paraître en 2000.
- [Kudel\_98] M. KUDELSKI « Analyse et conception de moteurs synchrones chemisés à commutation électronique », thèse EPFL, 98.
- [Deses\_96] P.F. DESESQUELLES, E. SANTANDER (Valeo) « Un point de vue industriel sur la machine à courant continu », Revue 3EI n°7, déc. 1996, pp.15-20.
- [Mult\_94] B. MULTON, « De nouvelles possibilités avec les moteurs à alimentation électronique. », Revue Générale de l'Electricité, N°1/94, janvier 1994, pp.11-19.
- [Berg\_94] C. BERGMANN, « Les actionneurs électriques pour la voiture de l'an 2000 », journées EEA, mars 94.
- [Gréh\_95] B. GRÉHANT « Actionneurs tubulaires pour le bâtiment », journées club EEA fév. 1995, pp.78-83.
- [Orsa\_94] J.M. ORSAT, C. VANDERSCHAEGHE « Entraînement électrique à vitesse variable pour les produits légers du bâtiment », EPE drives Conf, Lausanne 1994, pp.49-53.
- [Nasar\_87] S.A. NASAR, « Handbook of Electric Machines », Mc Graw Hill 1987.
- [Deses\_95] P.F. DESESQUELLES « About the commutation in DC motors », Journ. Phys III, juin 1995, pp.825-834.
- [Mabuchi] site web de Mabuchi, [www.mabuchi-motor.co.jp](http://www.mabuchi-motor.co.jp).
- [Matsu\_95] T. MATSUDA et al. « Method for analysing the commutation in small universal motors », IEE Proc. E.P.A., Vol42, march 95, pp.123-130.
- [Lamo\_96] J.M. LAMOTTE, F. MATHEU « Le four à micro-ondes et sa motorisation », dossier IUFM de Cachan, 1996.
- [Dong\_94] A. DONGFACK, Valeo « Démarreurs et véhicules automobiles, apports de l'électrotechnique », journées EEA, mars 94.
- [Gali\_94] M. GALIET, Valeo « Alternateurs pour voiture », journées EEA, mars 94.
- [Minot\_98] P. MINOTTI, A. FERREIRA, « Les Micromachines », Hermes 1998.
- [Oudet\_81] C. OUDET « A new family of multipolar P.M. stepper motors », 10th Symp. IMCSD, 1981, pp.337-351.
- [Connor\_99] R. O'CONNOR, C.J. MURRAY « No reluctance over switched reluctance. Three applications harness the benefits of this often overlooked motor technology », Global Design News, Apr. 99.
- [Mocz\_87] H. MOCZALA et al. « Small electric motors », IEE Power and Energy series, 1987.
- [Mult\_99] B. MULTON, J. BONAL « Les entraînements électromécaniques directs : diversité, contraintes et solutions. », REE n°10, novembre 99, pp.67-80.
- [Furla\_92] E.P. FURLANI « A method for predicting the field in permanent-magnet axial-field motors », IEEE trans. On mag, vol28 n°5, sept. 92, pp.2061-2066.
- [Alten\_94] G. ALTENBERND, L. WÄHNER, « Self-starting of fractional horse power two-pulse synchronous motor with permanent magnet motor under load », SPEEDAM 94, pp.127-132.
- [Kenj\_92] T. KENJO « Stepping Motors and their Microprocessor Controls », Oxford Science Publications 1984-1992
- [Jufer\_89] M. Jufer « Actionneurs linéaires et rotatifs à bobine mobile », journée SEE Valence nov. 1989.
- [Mulj\_93] E. MULJADI et al. « Adjustable ac capacitor for a single-phase induction motor », IEEE trans on IA, may/june93, pp.479-485.
- [Miya\_93] H. MIYAZAKI, M. ONO (Toshiba Corp.) « A Speed Control System for AC Induction Motor Application to Home Appliances », PCIM'93, Proc. Intel. Motion, June 1993, pp.230-236.
- [Berda\_91] M.N. BERDAI, H. SCHOORENS, J.P. HAUTIER, « Brushless DC Motors Torque Ripple Optimisation », SM 100, Zürich, 27-29 August 1991, pp.1108-1112.
- [Hwa\_98] C.C. HWANG et al. « Reduction of cogging torque in spindle motors », IEEE trans on Mag, Vol34, march 98, pp.468-470.
- [Chao\_98] C.M. CHAO et al. « Torque and cogging torque in sandwich type CDROM spindle motor », IEEE trans on Mag, Vol34, n°2, march 98, pp.471-473.
- [Mult\_97] B. MULTON, M. LAVABRE, C. MORE « Actionneur linéaire à bobine mobile. », Revue 3EI n°10, sept. 1997, pp.53-59.
- [Li\_98] Y. LI et al. « A novel two-phase BPM drive system with high power density and low cost », IEEE trans IA, vol34, n°5, sept. 98, pp.1072-1079.

Cet article est téléchargeable au format pdf sur le site web :

<http://www.mecatronique.bretagne.ens-cachan.fr>