

Actualisation des connaissances sur les moteurs électriques

par **Charles-Henri VIGOUROUX**

Lycée Carnot - 42300 Roanne

charles-henri.vigouroux@wanadoo.fr

RÉSUMÉ

La banalisation des variateurs électroniques de vitesse a révolutionné les domaines d'utilisations des moteurs électriques : la vitesse variable et la régulation de vitesse sont désormais possibles avec n'importe quel type de moteur et n'importe quel type de source (réseau triphasé ou réseau monophasé, batterie d'accumulateurs, etc.).

À l'heure actuelle, le démarrage, le réglage de la vitesse, ses variations spontanées en fonction de la charge, le risque de décrochage, ne sont plus des critères déterminants : quel que soit le type de moteur, ces problèmes sont résolus par l'électronique de puissance.

Les critères de choix peuvent être tous les autres facteurs : coût d'achat, coût de maintenance, durée de vie, puissance massique (en W/kg), comportement dynamique, bruit, etc.

Ce document ne comporte pas d'images, absence compensée par des adresses Internet (sites de fabricants, cours sur les moteurs à vitesse variable, etc.).

Première partie Exemples d'utilisations des différents types de moteurs électriques

TRACTION ÉLECTRIQUE

Évolution des TGV

- ◆ *1981 - TGV « Paris - Sud-Est »*
(dernier équipement important de la SNCF à moteurs à courant continu) ;
puissance totale 6,4 MW, rame de 385 tonnes, 368 places, 270 km/h ;
12 moteurs à courant continu de 535 kW et 1 535 kg (soit une puissance massique de 348 W/kg) ;
démontage et surfaçage du collecteur tous les 300 000 km ;

variation de vitesse : pont mixte (thyristors et diodes) pour les lignes en 25 kV alternatif 50 Hz, transformable en hacheur pour les lignes en 1 500 V continu.

- ◆ 1988 - TGV « Atlantique » (moins de moteurs, plus de puissance et de vitesse)
puissance totale 8,8 MW, rame de 450 tonnes, 485 places, 300 km/h ;
8 moteurs synchrones autopilotés de 1,1 MW et 1 450 kg
(puissance massique 758 W/kg) ;
variation de vitesse : onduleurs alimentés en 25 kV, 50 Hz ou 1500 V continu.
- ◆ 1994 - TGV « Eurostar Paris-Londres »
puissance totale 13,2 MW, rame de 816 tonnes, 794 places, 300 km/h ;
12 moteurs asynchrones de 1,1 MW et 2 105 kg (puissance massique 520 W/kg) ;
variation de vitesse : onduleurs alimentés en 25 kV, 50 Hz en France et dans le tunnel sous la Manche, en 3 kV continu en Belgique, et en 750 V continu en Angleterre ;
(les faibles tensions d'alimentation en courant continu ne permettant que des performances dégradées).

Locomotives pour trains de voyageurs et trains de marchandises

- ◆ Avant les années 80
 - En 1971, mise en service de la série BB 15000 (25 kV, 50 Hz).
 - En 1976 mise en service des séries BB 7200 (1500 V continu) et BB 22200 (bi-courant 25 kV, 50 Hz et 1500 V continu).

Tous ces modèles sont à 2 moteurs à courant continu de 2200 kW chacun, à excitation série. Les BB 7200 et BB 22200 sont un peu « spécialisées » pour optimiser les performances dans deux créneaux différents :

 - BB 7200 : marchandises, vitesse maxi : 160 km/h ;
 - BB 22200 : voyageurs, vitesse maxi : 200 km/h.
- ◆ 1988 : mise en service des BB 26000 « Sybic »
(synchrone **bi**-courant : 25 kV alternatif, 1500 V continu) ;
2 moteurs *synchrones* de 2800 kW chacun ;
ces locomotives sont parfaitement « généralistes » ;
voyageurs : vitesse maxi 200 km/h, 16 voitures sur rampe de 2,5 pour mille ;
marchandises : vitesse maxi 160 km/h, traction à 80 km/h d'un train lourd de 2050 t sur une rampe de 8,8 pour mille.
- ◆ 1998 : mise en service des BB 36000 « Passe-Frontières »
(France 25 kV 50 Hz et 1500 V continu, Belgique et Italie 3000 V continu) ;
4 moteurs *asynchrones* de 1530 kW chacun ;
mêmes performances que les locomotives Sybic.

Locomotives diesel-électriques

Les plus répandues en France sont de la génération des années 60-70.

Le moteur diesel entraîne un alternateur qui alimente deux moteurs à courant continu (un dans chaque bogie) par l'intermédiaire d'un pont redresseur.

Exemple : série CC 72000

- moteur diesel 2650 kW, 16 cylindres en V, carburant gazole, air suralimenté 16 bars, couple 18 750 Nm à 1350 tr/min, rendement 40 % ;
- alternateur 3 MVA, triphasé, tension 1200 V, intensité 1500 A, rendement 97 % ;
- pont redresseur commandé à thyristors et à diodes ;
- deux moteurs à courant continu, puissance maxi 1470 kW chacun, excitation série, tension 1500 V, intensité 1030 A, rendement 95 % ;
- double rapport de réduction : voyageurs 140 km/h, marchandises 85 km/h.

Transports urbains de Lyon

- ◆ Métro (1978) : moteurs à courant continu.
- ◆ Tramway (2001) : moteurs asynchrones.

Un site « grand public » sur l'électricité dans les transports

<http://www.edf.fr/transports/index.htm>

La Revue 3 EI - n° 19 - décembre 1999 (niveau post-baccalauréat)

« La traction électrique ferroviaire »

<http://www.lesite3EI.com>

PARKINGS SOUTERRAINS DU CENTRE COMMERCIAL « LES 4 TEMPS »

Situé dans le quartier de la Défense à Paris, le centre commercial « Les 4 temps » est l'un des plus grands d'Europe.

Ses parkings ont une capacité de 5 600 places, sur quatre niveaux, et sont fréquentés en moyenne par 10 000 véhicules par jour.

Construits en 1981, il devenait indispensable de rénover leurs installations électriques et mécaniques car les coûts de maintenance avaient tendance à s'envoler. Cette remise à hauteur, commencée en 1998 s'est achevée en novembre 2000.

Dans l'installation initiale, les moteurs asynchrones des ventilateurs démarraient par couplage direct sur le réseau. Cela provoquait des perturbations électriques et soumettait les moteurs et les turbines à des contraintes mécaniques sévères. Avec certains moteurs, il était impossible d'effectuer plusieurs démarrages rapprochés, et la ventilation ne pouvait pas s'adapter finement aux besoins car les moteurs ne pouvaient tourner qu'à une seule vitesse.

Désormais, les cinq centrales de ventilation sont équipées en tout de 57 moteurs asynchrones, de puissances comprises entre 22 et 180 kW, associés à 57 variateurs de vitesse Altivar (Schneider Electric).

Des capteurs répartis dans les parkings analysent en permanence la qualité de l'air (monoxyde de carbone), les informations sont reçues par une centrale de mesure. Elle les transmet à des automates qui choisissent la bonne vitesse parmi les quatre programmées sur les variateurs, afin d'adapter le débit de ventilation aux conditions constatées et aux consignes à respecter.

USINE D'EMBOUTEILLAGE

La société Saint-Alban Boissons, créée en 1997, produit par heure 20 000 bouteilles en PET de 1,25 litre d'eau minérale naturelle gazeuse de la source locale (exploitée depuis l'époque romaine) et 72 000 boîtes métalliques de 33 cl de sodas divers fabriqués sous licence (Pepsi, Ice Tea, 7 Up, etc.).

Sur la chaîne d'embouteillage d'eau, plus de cinq bouteilles par seconde sont mises en forme par soufflage à chaud à partir d'ébauches, remplies d'eau minérale gazeuse, bouchées, contrôlées, étiquetées, datées, palettisées.

Sur la chaîne des canettes de sodas, le débit est de vingt boîtes par seconde ! Les opérations de remplissage, capsulage, marquage de la date, sont si rapides qu'on ne peut pas les suivre visuellement.

Tous les moteurs sont des moteurs asynchrones à vitesse variable : l'usine compte plus de 200 variateurs électroniques, asservis à la cadence des soutireuses et à de nombreux autres paramètres.

Localisation : Saint-Alban-les-Eaux, près de Roanne, département de la Loire (42).

MACHINES-OUTILS

Les machines-outils modernes sont des « centres d'usinage à commande numérique », polyvalents autant en outils de coupe qu'en formes usinées, à pilotage informatique.

Chaque mouvement fait appel à un moteur à vitesse variable alimenté par électronique de puissance : translations de la table d'usinage et des porte-outils, rotation de l'outil.

Suivant les cas, on trouve tous les types de moteurs : asynchrones, synchrones, à courant continu, pas à pas, linéaires.

Le concept « un mouvement = un variateur + un moteur » supprime les boîtes à vitesses, les cardans, les renvois d'angles et autres arbres cannelés télescopiques. Chaque mouvement est géré individuellement par l'électronique, c'est-à-dire commandé par le programme informatique et contrôlé par des capteurs.

Les moteurs linéaires, qui commencent à apparaître dans ces gammes d'applications, suppriment tout intermédiaire puisque leur mouvement est rectiligne sans passer par la rotation d'un rotor.

Un site de fabricant d'électrobroches à moteurs synchrones (l'outil de coupe est fixé directement au rotor) :

<http://www.precise.fr>

Quelques sites de constructeurs de centres d'usinages à commande numérique :

<http://www.charlyrobot.com>

<http://www.nodier.com>

<http://www.huron-graff.fr>

PHOTOCOPIEURS

Ils contiennent un grand nombre de micro-moteurs (entraînement des feuilles, déplacement de l'optique et autres mouvements...) dont la moitié peuvent être des moteurs à courant continu à collecteur et l'autre moitié des moteurs « brushless » (synchrone + commutation électronique).

D'autres types de moteurs sont aussi présents, par exemple des moteurs pas à pas, en nombre de plus en plus grand.

Interviewez le technicien quand il vient faire la maintenance d'un photocopieur sur votre lieu de travail...

Autres systèmes complexes d'usage courant, les distributeurs de billets de banque comprennent aussi un nombre considérable de micro-moteurs. Mais il est nettement plus délicat d'interviewer le technicien de maintenance !!!

EN GUISE DE CONCLUSION

Depuis les années 60, l'utilisation des moteurs électriques a subi des évolutions (des révolutions !) successives, liées à l'électronique de puissance :

◆ Années 60

Maîtrise d'une tension continue réglable par composants électroniques au silicium

– *début et milieu de la décennie* : ponts redresseurs à thyristors ;

– *fin de la décennie* : hacheurs à thyristors.

◆ Années 70

L'électronique de puissance connaît des perfectionnements mais pas de révolution. En revanche, l'arrivée de l'électronique numérique ouvre une ère nouvelle (calculateurs, micro-informatique, informatique industrielle).

◆ Années 80

Maîtrise d'une fréquence réglable (onduleurs à rapport tension / fréquence = constante).

◆ Années 90

Onduleurs à commande vectorielle, contrôlant séparément le couple (composante active de l'intensité du stator, ou courant actif) et le flux (composante réactive de l'intensité du stator, ou courant magnétisant).

- *début de la décennie* : avec capteurs de position du rotor (capteurs à effet Hall, codeurs, resolvers) ;
- *fin de la décennie* : sans capteurs.

◆ Années 2000

Une nouvelle révolution avec le développement des moteurs linéaires ?

http://www.ad.siemens.de/mc/html_76/products/motors/linearmotoren/index.htm

<http://www.lineardrives.com>

http://www.lesir.ens-cachan.fr/lesir/genie_electrique/conception_actionneurs/machlin.html

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

En plus de l'apparition de *nouveaux composants*, l'évolution de l'électronique de puissance a été rendue possible par les progrès de la *modélisation mathématique* du fonctionnement des moteurs électriques, par l'introduction de l'électronique numérique, et par l'augmentation incessante des performances des *calculateurs* incorporés dans les variateurs de vitesse.

Parallèlement, la technologie de construction des moteurs eux-mêmes a beaucoup évolué aussi : améliorations des matériaux *conducteurs* ou *isolants*, des matériaux *magnétiques*, des *capteurs* (de température, de vitesse, de position, de contraintes mécaniques).

Les gains en puissance massique, en comportement dynamique et en fiabilité ont été considérables.

Des structures nouvelles de moteurs ont été développées pour des besoins particuliers... et ce n'est pas fini !!!

Deuxième partie
Idée de base sur les moteurs électriques

Les trois grands types de moteurs sont : moteur asynchrone, moteur synchrone, moteur à courant continu.

Il faut savoir qu'il existe une assez grande quantité de structures dérivées des trois types de base, pour s'adapter au mieux aux besoins industriels, surtout quand il s'agit de grande diffusion.

Les descriptions ci-dessous sont volontairement exemptes de formules. L'exercice de style a consisté à trouver des explications simples mais restant le plus près possible des phénomènes électromagnétiques. La lecture nécessite évidemment un certain effort de concentration pour « visualiser » ces explications imagées.

Les références données à la fin permettent d'aller plus loin, dans le domaine des réalités industrielles comme dans celui des lois de la physique et de leur cortège mathématique.

MOTEUR ASYNCHRONE

Le bobinage du **stator**, alimenté en courant alternatif, produit un **champ magnétique tournant** dont la vitesse est fixée par la fréquence du courant et le nombre de pôles du bobinage. Dans le **rotor** en fer, sont inclus des conducteurs en aluminium coulé, parallèles à l'axe (ou légèrement inclinés), leurs extrémités étant toutes reliées entre elles par des anneaux de même métal pour former ce qu'on appelle la « **cage à écureuil** » ou plus simplement la « cage ». Il n'y a aucun contact électrique entre le rotor et l'extérieur. Le mouvement du champ tournant provoque des **courants induits** dans la cage en aluminium du rotor, les forces de Laplace sur ces courants produisent la rotation.

La vitesse du rotor se stabilise spontanément à une valeur un peu plus faible (**glissement**) que celle du champ tournant, telle que les forces de Laplace produisent le couple moteur nécessaire à l'entraînement de la charge. **Le moteur s'adapte à une augmentation de la charge** par une faible diminution de la vitesse du rotor, ce qui conduit à une augmentation de la vitesse de glissement du champ tournant par rapport à la cage et par conséquent de l'intensité des courants induits : les forces de Laplace augmentent. Phénomènes inverses pour une diminution de la charge. Les adaptations aux variations de la charge se répercutent au stator. Celui-ci absorbe une puissance électrique active (en watts) qui suit, aux pertes près, les variations de la puissance mécanique fournie sur l'arbre du rotor, par des variations de l'intensité au stator et surtout du facteur de puissance $\cos \varphi$ (l'angle φ étant le déphasage entre l'intensité et la tension).

Les moteurs asynchrones industriels sont en général alimentés en triphasé mais il en existe en monophasé, de faible puissance, pour des usages où l'on ne dispose que du réseau domestique monophasé : circulateurs de chauffage central, pompes de vidange des machines à laver, turbines de VMC pour le renouvellement d'air dans l'habitat, ventilateurs de rétroprojecteurs, etc.

Le moteur asynchrone triphasé est le moteur « à tout faire » dans l'industrie : bon marché, robuste, sans entretien. Branché directement au réseau triphasé, sa vitesse varie seulement de quelques pour cent entre le fonctionnement à vide et la pleine charge, restant toujours un peu plus faible que la vitesse du champ magnétique tournant, fixée par la fréquence au stator. Dans la plupart des cas, ces petites variations de vitesse ne sont pas gênantes. En courant alternatif 50 Hz, les vitesses ne peuvent être que « un peu inférieures » à 3000, 1500, 1000, etc., tours par minute, pour des moteurs bipolaires,

tétrapolaires, hexapolaires. De nombreuses utilisations nécessitent donc un réducteur de vitesse par engrenages (groupes moto-réducteurs), ou un choix de vitesses par poulies étagées. Le rendement s'en ressent : pour une puissance utile de l'ordre du kW, le rendement du moteur seul est voisin de 80 %, celui d'un moto-réducteur peut chuter à 50 %. Le prix d'achat s'en ressent aussi, en raison du coût du réducteur ou de la « boîte à vitesses ».

Jusqu'aux années 80 le moteur asynchrone n'était pas utilisable pour les applications en vitesse variable, ni à des vitesses supérieures à 3000 tr/min. Actuellement, l'électronique de puissance permet de produire des tensions triphasées à **fréquence variable** : en quelques années, cette technologie a révolutionné l'utilisation des moteurs asynchrones. Les variateurs de première génération délivrent des tensions triphasées à rapport U/f constant, avec ou sans régulation de vitesse. Les variateurs de la génération actuelle sont à « commande vectorielle », et contrôlent séparément le couple (par la composante active de l'intensité) et le flux (par la composante réactive de l'intensité ou courant magnétisant). Les performances de ces variateurs permettent un réglage de la vitesse du rotor à 0,1 % près avec capteurs de vitesse et de position angulaire du rotor, et à 0,5 % près sans capteurs. Parmi ses multiples avantages, la commande vectorielle permet d'exercer le couple nominal (et même supérieur) avec le rotor à l'arrêt, et rend possible le freinage avec récupération, l'énergie étant alors renvoyée au réseau d'alimentation.

Les tensions alternatives triphasées produites par les variateurs électroniques sont obtenues à partir de tensions continues symétriques, par découpage d'impulsions très fines de durées modulées de telle façon que le fondamental de la série de Fourier soit à la fréquence et à la valeur efficace désirée (onduleur MLI : à modulation de largeur d'impulsions). L'effet inductif du stator impose à l'intensité une forme proche de la sinusoïde.

MOTEUR SYNCHRONE

Le **stator** est le même que celui du moteur asynchrone : alimenté en courant alternatif, il produit un **champ magnétique tournant** dont la vitesse est fixée par la fréquence du courant et le nombre de pôles du bobinage. Le **rotor** est un aimant permanent ou un électroaimant à courant continu. On peut dire de façon imagée que l'aimant du rotor **s'accroche** au champ tournant du stator et tourne à la même vitesse. Ou encore, que les pôles magnétiques Nord et Sud du rotor sont entraînés à la même vitesse par les pôles de noms contraires du champ tournant du stator. Quand il fonctionne, le moteur synchrone **s'adapte aux variations de la charge** par de faibles variations de distance angulaire entre les pôles des champs tournants du stator et du rotor, conduisant au final à la variation de la puissance active absorbée par le stator. **La vitesse du rotor reste toujours égale à la vitesse du champ tournant.**

Si le moteur synchrone est alimenté par le réseau 50 Hz, la vitesse du rotor est exactement égale à un sous-multiple de 50 tours par seconde (autrement dit à un sous-multiple de 3000 tr/min). De nombreux petits moteurs synchrones monophasés, à rotor à aimant permanent, et dans une configuration à démarrage spontané, sont « depuis toujours » appréciés pour leur vitesse rigoureusement constante, liée à la fréquence du

réseau : **programmeurs en électroménager** par exemple (lave-linge, four, ...).

Pour les applications industrielles, le moteur synchrone est resté longtemps marginal car il présente deux inconvénients quand il est alimenté directement par le réseau :

- il ne démarre pas spontanément, car le rotor ne peut pas tourner instantanément pour suivre le champ tournant du stator qui démarre, lui, sans aucune inertie ;
- si la charge augmente trop, le rotor « décroche » du champ tournant statorique, il cale brusquement et se met à vibrer.

Dans les années 80, le développement des alimentations électroniques triphasées à fréquence réglable a d'abord révolutionné l'utilisation des moteurs synchrones, avec la génération des moteurs synchrones « auto-pilotés », avant d'atteindre le domaine des moteurs asynchrones une dizaine d'années plus tard. Dans les **moteurs synchrones auto-pilotés**, la fréquence des courants du stator (et par conséquent la vitesse du champ tournant entraînant le rotor) est contrôlée par des capteurs mesurant en permanence la position du champ magnétique du rotor par rapport à la position du champ magnétique tournant. Les problèmes de **démarrage et de décrochage sont résolus**, et la vitesse devient réglable par une action extérieure sur la fréquence.

La robotique, les centres d'usinage à commande numérique, l'usinage à très grande vitesse, utilisent des moteurs synchrones auto-pilotés à rotor à aimants permanents, en raison de leur très grande puissance massique (en kW/kg), des possibilités de vitesses de rotation élevées, et en raison de l'absence de pertes Joule et de pertes magnétiques au rotor. Les puissances peuvent aller jusqu'à la dizaine de kW. L'industrie textile les utilise pour la facilité qu'ils offrent de créer des mouvements parfaitement synchrones : tous les moteurs alimentés avec la même fréquence tournent exactement à la même vitesse.

En très petite puissance, ils donnent aux disques durs de micro-ordinateurs et aux têtes de lecture de magnétoscopes, des vitesses de rotation parfaitement maîtrisées. Les lecteurs de disquettes informatiques et les cabestans de magnétoscopes (entraînement de la bande) sont en général à moteur synchrone triphasé auto-piloté à champ **axial**, pour être les plus plats possible. Les bobines du stator, l'électronique de commande, les capteurs à effet Hall, tout est sur le même circuit imprimé. Le champ se referme par une plaque de fer opposée, et le rotor est un disque en aimant permanent, entre les deux plans parallèles du stator.

Les moteurs synchrones de forte puissance ont un rotor à électroaimant excité en courant continu. De tels moteurs, auto-pilotés, sont utilisés en traction électrique (TGV Atlantique, locomotives Sybic) où ils ont assuré la transition, pour les matériels fabriqués dans les années 80, entre les moteurs à courant continu et les moteurs asynchrones. Dans certaines applications de grande puissance et de fonctionnement permanent comme l'entraînement de pompes en pétrochimie, de compresseurs ou de gros ventilateurs, des moteurs synchrones de l'ordre des MW étaient utilisés bien avant l'arrivée des moteurs auto-pilotés, malgré le problème du démarrage. Ils étaient appréciés pour leur **excellent rendement** (pouvant être supérieur à 95 %), leur alimentation sous plusieurs kV ainsi que

leurs possibilités de **réglage de la puissance réactive**. En effet, pour une même puissance mécanique fournie sur l'arbre et une même puissance électrique active absorbée (en watts), le moteur synchrone peut fonctionner sans puissance réactive (en var), il peut aussi en absorber, ou en fournir au réseau, suivant les besoins, par un réglage de l'intensité d'excitation de l'électroaimant rotorique en courant continu (*ça se complique, n'est-ce pas ?!*).

Si les problèmes de démarrage et de décrochage ont longtemps exclu les moteurs synchrones de la plupart des usages industriels et les ont cantonnés à quelques applications seulement, on pourrait maintenant en trouver partout, grâce aux alimentations électroniques auto-pilotées à fréquence réglable. En fait, s'il y a le choix, les moteurs asynchrones retiennent la préférence des industriels car ils sont beaucoup moins coûteux et peuvent dorénavant couvrir la plupart des besoins. Après une décennie de gloire, les moteurs synchrones semblent donc à nouveau dévolus à occuper seulement quelques « niches » où leurs qualités sont irremplaçables.

Quand le rotor est à aimant permanent, les moteurs synchrones sont en général qualifiés de « **moteurs brushless** » (sans balais). Bien sûr, les moteurs asynchrones sont eux aussi sans balais, mais l'appellation brushless ne les concerne pas. Elle a commencé d'être utilisée quand les moteurs synchrones auto-pilotés et à aimants permanents sont apparus, à cause de leurs propriétés très voisines de celles des moteurs à courant continu, qui ont des balais. Depuis, le nom a été conservé, et même, certains moteurs synchrones auto-pilotés à aimants permanents ont des comportements tellement proches des moteurs à courant continu qu'on les appelle « moteurs brushless à courant continu » !

On ne peut finir cet exposé sans mentionner que les alternateurs des centrales hydro-électriques réversibles fonctionnent en moteurs synchrones pour remonter l'eau dans le lac supérieur pendant les heures creuses (les turbines fonctionnent alors en pompes). Les puissances en jeu sont considérables.

MOTEUR À COURANT CONTINU

Le **stator** produit un **champ magnétique fixe dans l'espace et constant dans le temps**. Dans les petits moteurs, le stator est à aimants permanents. Dans les moteurs plus puissants, il est formé de bobinages parcourus par du courant continu.

Le **rotor** comprend des conducteurs parallèles à l'axe (ou légèrement inclinés), reliés à un ensemble de lames de cuivre, le collecteur. Dans le champ magnétique fixe du stator, les courants rotoriques subissent des forces de Laplace qui provoquent la rotation. Le rotor est alimenté en courant continu, mais le **système balais-collecteur** fait circuler dans les conducteurs rotoriques des **courants alternatifs synchronisés avec la rotation** : le courant change de sens dans un conducteur du rotor chaque fois qu'il passe d'un pôle du stator au pôle suivant, pour que les forces de Laplace soient toutes orientées dans le même sens.

La vitesse de rotation dépend de la tension d'alimentation du rotor, et du champ magnétique du stator. Si la tension d'alimentation est constante et le stator à aimants permanents, le moteur à courant continu **s'adapte aux variations de la charge** par de faibles variations spontanées de la vitesse, conduisant à des variations de fém, et par conséquent d'intensité dans le rotor et son alimentation. Si le stator est un électroaimant alimenté de façon indépendante du rotor (moteur à excitation séparée), les variations spontanées de la vitesse sont faibles, comme dans le cas des moteurs à aimants permanents. Elles peuvent au contraire être assez importantes si le stator est traversé par le même courant que le rotor (moteur à excitation série). Dans tous les cas, la régulation électronique de vitesse permet de corriger ces variations spontanées de vitesse.

À puissance égale, les moteurs à courant continu sont beaucoup plus coûteux que les moteurs asynchrones (bobinages au stator et au rotor, collecteur, balais). Le système balais-collecteur est fragile, il nécessite **surveillance et entretien**. Par exemple, les moteurs des TGV Paris - Sud-Est doivent subir un démontage complet et un reprofilage du collecteur tous les 300 000 km, c'est-à-dire, grosso modo, tous les ans. Les moteurs à courant continu sont donc actuellement réservés aux usages qu'ils sont seuls à pouvoir satisfaire.

Les moteurs à courant continu ont été **longtemps les champions de la vitesse réglable** : il suffit d'alimenter le rotor avec une tension continue réglable pour faire varier la vitesse. La régulation de vitesse et les asservissements de vitesse et de position ont été maîtrisés pour les moteurs à courant continu bien avant les autres types de moteurs. Si l'énergie électrique est fournie par le réseau alternatif, la tension continue réglable est obtenue à l'aide d'un **pont redresseur commandé**, mettant en œuvre des thyristors, dont la fonction est analogue à des diodes mais avec une conduction déclenchée à chaque alternance positive à l'instant désiré, par une « gâchette ». Si l'énergie électrique est fournie par une source de tension continue fixe (réseau continu du métro, batterie d'accumulateurs des chariots élévateurs de type Fenwick), la tension continue variable est obtenue par un **hacheur** à thyristor ou à transistor qui découpe dans la tension continue fixe des créneaux périodiques de rapport cyclique réglable. On trouve des moteurs à courant continu dans tous les domaines industriels, de la très grande puissance avec les moteurs de laminoirs dans les aciéries, aux micro-moteurs à très faible inertie, en passant par la traction électrique, les rotatives d'imprimerie et la robotique...

Depuis les années 80, comme on l'a dit dans les paragraphes précédents, les nouveaux progrès de l'électronique de puissance réduisent peu à peu les parts de marché des moteurs à courant continu, au profit des moteurs synchrones auto-pilotés et des moteurs asynchrones à vitesse variable. Néanmoins, les **applications pour l'automobile** restent un grand marché pour les moteurs à courant continu : démarreur, refroidisseur du moteur thermique, pompe à carburant, essuie-glace, lave-glace, lève-vitre, ventilateur, climatiseur, toit ouvrant, réglage des sièges et autres multiples accessoires. Les moteurs électriques à courant continu, à stator à aimants permanents, peuvent se compter par dizaines dans une voiture, un poids-lourd ou un autocar. L'industrie du jouet est un autre débouché

important dans le domaine des petits moteurs à courant continu (millions d'exemplaires).

Le « *moteur universel* » est un cas particulier de moteur à courant continu... fonctionnant en alternatif ! Il équipe de nombreux **appareils électroménagers** (aspirateurs, mixers, robots, tambours de certains lave-linge, ...) et **outillages portatifs** (perceuses, ponceuses, meuleuses, scies circulaires, scies sauteuses, ...). Sa structure est celle d'un moteur à courant continu : le stator crée un champ magnétique de direction fixe, le rotor possède des conducteurs parallèles à l'axe dans des encoches en périphérie, chacun étant relié à une lame du collecteur sur lequel frottent les balais pour transmettre le courant. L'excitation est en série : le bobinage du stator est traversé par le même courant que le rotor. Ainsi, quand le sens de l'intensité d'alimentation s'inverse, cela se produit en même temps au stator et aux balais puisqu'ils sont en série. Par conséquent, à chaque inversion de la tension alternative du réseau, le champ magnétique du stator et l'ensemble des courants du rotor s'inversent en même temps, ce qui laisse les forces de Laplace inchangées et la rotation se poursuit dans le même sens. Parcouru par du courant alternatif, le stator doit être feuilleté, comme le rotor, pour limiter les pertes par courants de Foucault. Il se produit des **étincelles** entre les balais et le collecteur car les inversions de sens du courant d'alimentation se superposent aux inversions électromécaniques du système balais-collecteur sur les courants rotoriques. Depuis quelques années, on ajoute souvent un pont redresseur car le courant ondulé pose moins de problèmes au collecteur que le courant alternatif (le moteur universel se rapproche alors d'un moteur à courant continu). Le fonctionnement à vitesse variable est possible, le moyen le plus simple étant d'intercaler un gradateur à triac (composant bi-directionnel dont la conduction est commandée à chaque alternance par une électrode, avec un retard facilement réglable). La durée de vie des moteurs universels est assez faible, le rendement médiocre (parfois inférieur à 10 % !), le bruit et les parasites radio-électriques difficiles à éliminer. Inconvénients supportables car ces moteurs ne se trouvent que sur des appareils à usage intermittent de courtes durées, et en général de faible puissance. Leur intérêt tient dans leur alimentation directe par le réseau monophasé, et leur grande **vitesse** de rotation, permettant éventuellement de disposer d'un **couple** important si on intègre un réducteur de vitesse, pour un volume occupé très petit.

QUELQUES RÉFÉRENCES

- ◆ Une démonstration vectorielle animée de la création de **champs magnétiques tournants** est visible à l'adresse suivante :

<http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/electri/triphase.html>

- ◆ Des cours de niveau post-baccalauréat mais abordables et illustrés (sous Powerpoint), sur la variation de vitesse des moteurs synchrones et asynchrones sont téléchargeables sur la **page de physique appliquée du site Internet de l'académie de Lyon** :

<http://www2.ac-lyon.fr/enseigne/physique/phyapp2/>

- ◆ **La Revue 3EI** (Enseigner l'Électrotechnique et l'Électronique Industrielles) destinée

à l'actualisation des connaissances des enseignants de physique appliquée, publie de nombreux articles (niveau post-baccalauréat) sur les moteurs électriques, les alimentations électroniques, l'évolution des technologies et des applications.

Le sommaire des numéros et des renseignements divers sont sur le site Internet :

<http://www.lesite3EI.com>

◆ Deux sites de **fabricants de moteurs** :

http://www.ad.siemens.de/mc/html_76/products/motors/index.htm

<http://www.sew-eurodrive.com>

◆ Deux sites de **fabricants de variateurs de vitesse** :

<http://www.schneider-electric.ca/www/fr/products/acdrives/index.htm>

<http://www.danfoss.fr>

◆ Un petit livre intéressant sur la variation de vitesse des moteurs électriques :

La vitesse variable - L'électronique maîtrise le mouvement, co-édité en 1992 par EDF, Techno-Nathan et Gimélec.

Mais... ne pas oublier que depuis 1992 la variation de vitesse a encore considérablement évolué, surtout dans le domaine des variateurs pour moteurs asynchrones !

◆ **Manuels de terminale STI - Génie électrotechnique**

Voir catalogues des éditeurs de manuels scolaires...

◆ **Un ouvrage de référence** (maîtrise, écoles d'ingénieurs) :

GRELLET Guy et CLERC Guy. *Actionneurs électriques. Principes - Modèles - Commande*. Eyrolles, 1996.