

Les entraînements électromécaniques directs : diversité, contraintes et solutions.

Bernard Multon, Jean Bonal

▶ **To cite this version:**

Bernard Multon, Jean Bonal. Les entraînements électromécaniques directs : diversité, contraintes et solutions.. Colloque Conversion Electromécanique Directe (CEMD) 1999, Feb 1999, CACHAN, France. pp.95-100. hal-00674081

HAL Id: hal-00674081
https://hal.science/hal-00674081

Submitted on 24 Feb 2012

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

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

LES ENTRAÎNEMENTS ÉLECTROMÉCANIQUES DIRECTS : DIVERSITÉ, CONTRAINTES ET SOLUTIONS

ELECTROMECHANICAL DIRECT DRIVES : VARIETY, CONSTRAINTS AND SOLUTIONS

Bernard MULTON[1] et Jean BONAL[2]
[1]Antenne de Bretagne de l'École Normale Supérieure de Cachan - LÉSIR - Campus de Ker Lann - 35170 BRUZ
email : multon@bretagne.ens-cachan.fr
[2] Prométhée, Groupe SCHNEIDER - 89, Bd Roosevelt BP 323 - 92506 RUEIL MALMAISON Cedex

Abstract :

Electromechanical direct drives represent ultimate simplification of the electromechanical conversion systems because of they permit removal of parts of transmission system : reduction and multiplier gears, rotating to linear movement transformation... This simplification of the transmission system is employed since always in certain applications where mechanical requirements are adjust easily with classical motors (speed from about 1000 to 3000 rpm). But in very low speed and high torque, very high speed as well as linear drives, establishment takes slowly. In this paper, we aim to give numerous application examples where direct drives exist or emerge. We recall too their specific constraints. Finally, we develop a specific chapter on feasibility limits of rotating very high speed electromagnetic motors.

Résumé :

L'entraînement électromécanique direct représente la simplification ultime des systèmes de conversion électromécanique d'énergie puisqu'il permet de supprimer les organes de transmissions mécaniques : réducteurs, multiplicateurs, transformation de mouvement de rotation et mouvement linéaires... Cette simplification de la transmission est utilisée depuis toujours dans certaines applications où les caractéristiques mécaniques correspondaient bien à celles des moteurs classiques (vitesses comprises entre 1000 et 3000 tr/mn). Mais dans les applications de très basses vitesses et fort couple, les très hautes vitesses ainsi que celles à mouvements linéaires, la pénétration s'effectue progressivement. Dans cet article, nous proposons de donner de nombreux exemples pour faire apparaître la grande diversité des applications où les entraînements directs existent ou émergent ; nous évoquons également leurs contraintes spécifiques. Enfin, nous développons un chapitre spécifique sur les limites de faisabilité des moteurs électromagnétiques tournants aux très grandes vitesses.

I- Introduction

Les entraînements électriques pénètrent progressivement, depuis plus d'un siècle, tous les domaines de la société (en France, ils consomment environ le quart de la consommation totale d'électricité et plus de 70% de la consommation industrielle [1]). Dans la plupart des cas, la charge est entraînée via une transmission mécanique plus ou moins complexe : réducteur, multiplicateur, pignon-crémaillère, différentiel, joints de cardan... La transmission a alors pour rôle d'adapter la charge au moteur, ce qui permet de se servir, le plus souvent, de moteurs normalisés. La transmission mécanique permet également, dans nombre de situations, de déplacer le moteur à un endroit où l'on dispose de plus d'espace.

Dans un nombre croissant d'applications, pour diverses raisons que nous allons tenter de mettre en évidence, on souhaite transmettre directement les efforts à la charge mécanique. On parle alors d'**entraînements directs** (**direct drives** en anglais). Les actionneurs nécessaires sont alors conçus selon des critères particuliers, pour **s'intégrer** au mieux au système, produire des **couples élevés à basse vitesse**, travailler à des **vitesses très élevées,** produire des **mouvements linéaires** ou encore produire de **grandes accélérations**. Cette tendance à la simplification de la chaîne de transmission va dans le sens de l'amélioration de la fiabilité par la réduction du nombre de maillons de cette chaîne mais les contraintes de coût, toujours primordiales, limitent souvent la pénétration de ces techniques. Des évolutions importantes ont eu lieu ces dernières années grâce aux progrès réalisés dans le domaines des matériaux (magnétiques, mécaniques ou thermiques...), des principes de conversion, de l'électronique de puissance (plus grandes puissances, plus hautes fréquences, nouvelles architectures...), de la commande (technologies numériques et nouvelles méthodes de l'automatique), des capteurs et des structures (créativité des concepteurs).

Nous montrerons, ici, la variété des architectures de machines électromagnétiques puis nous aborderons, plus en profondeur, le domaine des très grandes vitesses de rotation.

Nous poserons enfin la problématique des entraînements directs à travers la grande diversité des applications, grâce à des exemples.

Actuellement, le principe électromagnétique de conversion électromécanique règne encore largement, il a fait et fera encore des progrès mais d'autres procédés émergent, comme la conversion piézo-électrique [2]. Les progrès dans le domaines des supraconducteurs ouvrent également de nouvelles possibilités [3].

Dans les applications à fort couple et à très basse vitesse, les machines électromagnétiques sont généralement handicapées par leur volume ou/et leur masse. En effet, de telles machines sont d'autant plus petites qu'elles fonctionnent à haute fréquence, il faut donc qu'elles tournent rapidement ou qu'elles aient un grand nombre de pôles. Dans ce dernier cas, leur construction est plus coûteuse et leur alimentation plus complexe. Il est donc souvent avantageux d'associer des machines rapides à un réducteur pour réduire volume, masse et coût. C'est alors ce que l'on fait si le réducteur mécanique n'est pas prohibé pour des raisons de jeu, de durée de vie ou de bruit acoustique. Mais il ne s'agit plus d'entraînements directs !

Dans d'autres situations extrêmes, les charges entraînées nécessitent des vitesses très élevées, ce qui pose des problèmes de résistance mécanique et de faisabilité des machines électriques, des multiplicateurs mécaniques peuvent alors être nécessaire.

Enfin, pour produire des mouvements linéaires, on fait, le plus souvent appel, à des systèmes de conversion mécanique : vis-écrou, vis à bille, pignon-crémaillère... Mais il est possible de réaliser des moteurs produisant directement des mouvements linéaires.

Qui dit entraînement direct, dit, à quelques exceptions près, réglage électronique du mouvement, donc présence d'un convertisseur électronique de puissance, de capteurs et d'un dispositif de commande [4], avec des contraintes spécifiques liées aux grandes vitesses ou grandes précisions requises (fréquence de découpage élevée, haute résolution des capteurs de position, commande rapide).

Pour diverses raisons (fiabilité, maintenance, coût, précision, bruit...), on peut chercher à éviter le dispositif d'interface mécanique. Mais actuellement, les « adaptateurs » mécaniques que nous cherchons à supprimer offrent des avantages importants comme un faible coût, souvent un bon rendement ; en outre, ils progressent du point de vue de l'entretien et du bruit. Enfin, les moteurs spéciaux fort couple, très grandes vitesses ou linéaires, sont souvent plus coûteux et il n'est pas toujours évident que la meilleure solution soit celle de l'entraînement direct.

Le choix d'une solution technologique nécessite toujours une analyse système, le cas des entraînements électromécaniques n'y échappe pas. Ainsi les systèmes de forte puissance nécessitent de considérer un grand nombre d'éléments allant des infrastructures lourdes (« Génie civil »), qui représentent une part considérable du coût global, au process, la consommation d'énergie et la maintenance (entretien et coût des arrêts). Le système complet doit satisfaire à de nombreuses exigences dont voici quelques unes : coût, durée de vie, entretien, compacité, pollution réseau, bruit acoustique, ondulations de couple (sollicitation de la mécanique de transmission), précision de positionnement, répétabilité...

II- Architectures des machines électro-magnétiques

Les efforts électromagnétiques sont limités par la pression magnétique tangentielle d'entrefer σ_T dont la valeur est liée à l'induction moyenne sous un pôle et à la densité linéique de courant d'induit. Les phénomènes de saturation magnétique, d'échauffement, voire de désaimantation, limite sa valeur, en régime permanent à des valeurs comprises entre 1 et 10 N/cm² selon les modes de refroidissement et les dimensions géométriques. Ainsi le couple (machines tournantes) ou la force (mouvements linéaires) sont-ils limités par la surface active d'entrefer et par les échauffements dus aux pertes Joule [5].

Les architectures réalisables permettent tous les types de mouvements qu'ils soient tournants, linéaires ou à plusieurs degrés de liberté.

Notons que tous les principes de conversion électromagnétiques (asynchrones, synchrones à inducteur bobiné, à aimants, réluctance variable, hybrides...) s'appliquent à ces diverses architectures.

Architectures des machines tournantes

Diverses géométries sont possibles selon que le champ magnétique est radial (cylindrique) ou axial (discoïde) :

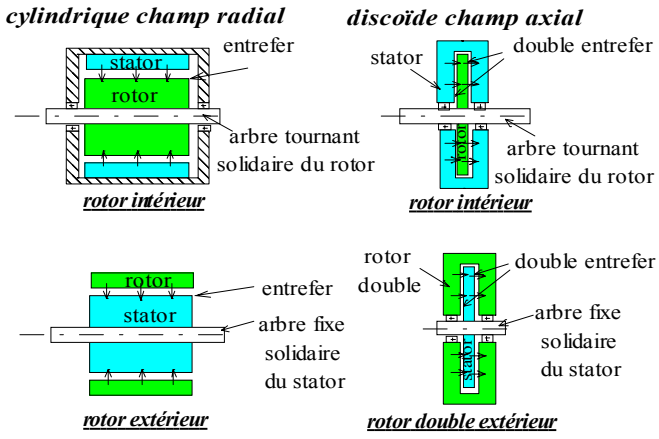


Figure -1-

Architectures de machines tournantes

Les **structures cylindriques à champ radial** peuvent être à rotor intérieur (cas le plus fréquent) ou à rotor extérieur (par exemple, ventilateurs, moteurs de disque dur ...). La composante

tangentielle de l'effort est habituellement la partie utile alors que la composante normale, dont la pression correspondante est beaucoup plus élevée (environ 50 N/cm²) est parasite. Elle est normalement de résultante nulle si rotor et stator sont en parfaite coaxialité (dispositifs cylindriques), ou en parfait centrage axial dans les géométries discoïdes. Dans ces dernières, il est plus délicat d'obtenir un positionnement précis et les efforts axiaux parasites sont plus difficiles à supporter par les roulements, c'est ce qui explique, entre autres, la rareté des structures à champ axial.

Lorsque l'on souhaite des vitesses élevées (quelques 10 000 à 100 000 tr/mn), on a recours de préférence à des structures cylindriques longues et à faible nombre de pôles (1 à 3 paires, pour limiter la fréquence électrique et les pertes magnétiques) car elles permettent de mieux respecter les contraintes mécaniques des hautes vitesses.

Pour les très basses vitesses, on accroît le nombre *p* de paires de pôles de façon à minimiser le volume et la masse du circuit magnétique. En effet, la section nécessaire pour assurer le passage du flux d'un pôle à l'autre est plus faible lorsque le pas polaire est court. Le volume de fer actif est sensiblement inversement proportionnel à *p* et il en est de même pour les têtes de bobine Dans les machines cylindriques, l'accroissement de *p* conduit à des machines creuses bien adaptées lorsqu'il s'agit de les placer autour d'un axe ou dans un moyeu (figure 2). La figure 2 montre comment évolue la forme du circuit magnétique lorsque le nombre de pôles augmente.

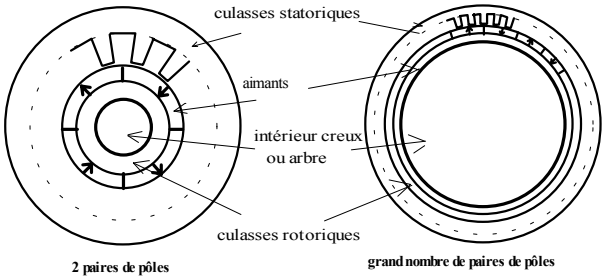
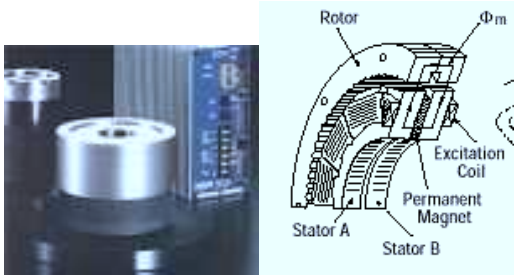


Figure -2-

Effet de l'accroissement du nombre de pôles dans une structure à champ radial.



a b

Figure -3-

Moteurs fort couple destinés aux entraînements directs
a : à réluctance variable (Megatorque de NSK)
b : hybrides (Dynaserv de Parker)

La figure 3 montre deux exemples de moteurs fort couple commercialisés, il s'agit de moteurs réluctants avec aimants (Dynaserv : 50 à 400 N.m) et sans aimants (Megatorque : 10 à 245 N.m) conçus pour des applications d'entraînement direct (par ex. bras de robot).

Les couples massiques des machines électromagnétiques classiques sont typiquement compris entre 1 et 10 N.m/kg. Les machines supraconductrices peuvent accepter des densités linéiques plus élevées et atteignent ainsi des couples massiques bien supérieurs : 10 à 100 N.m/kg (hors cryostat) [6]. Un moteur à induit supraconducteur et inducteur à aimants de 150 kW à 400 tr/mn [6] a été construit et testé au LEG (Grenoble), son couple massique actif est de 36 N.m/kg et la valeur globale (avec cryostat) est de 12 N.m/kg.

Les **structures discoïdes à champ axial** sont utilisées lorsque l'on souhaite optimiser différemment l'encombrement et la masse. Pour des géométries axialement courtes, la surface d'entrefer active est plus grande que dans les machines cylindriques L'accroissement du nombre de pôles a le même effet que dans les structures cylindriques et se traduit ici par une diminution de la longueur, le volume étant parfaitement occupé contrairement aux structures cylindriques qui deviennent creuses. Le moteur Lynx de la figure 4 (moteur à aimants à très grand nombre de pôles et à induit sans encoches) donne une idée des performances atteintes.



Figure -4-

Moteur à aimants à champ axial (Lynx Motion Tecnology Corp.T468)
T_{max} = 1350 N.m P_{max} = 35 kW, 58 kg (27 N.m/kg)

La figure 5 montre des moteurs asynchrones plats également à champ axial.

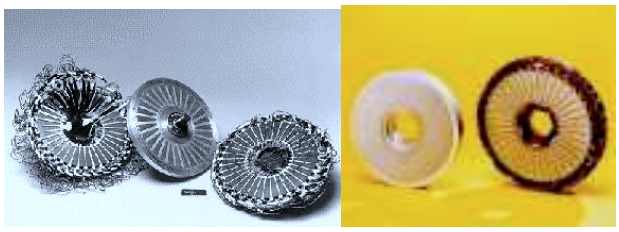


Figure -5-

Moteurs asynchrones à champ axial
(à gauche : Satcon Corp.26,5 kW à 4500 tr/mn - 67 kg, à droite : Electrodrives Ltd.)

Les structures discoïdes donne également la possibilité de la modularité, le couple peut être accru en disposant, sur la même ligne d'arbre, plusieurs modules. C'est ce que propose Jeumont Industrie [7] pour réaliser des machines de forte puissance (entraînements de gros bateaux et générateurs pour éoliennes).

Pour obtenir de plus grandes densités d'effort (couple ou force par unité de volume), il est nécessaire de multiplier les surfaces d'entrefer en volume. Les modes de conversion d'énergie sont alors fondés sur les principes de réluctance variable associant ou non des aimants permanents [8]. Des machines tournantes polydiscoïdes, mettant en œuvre les avantages des dispositifs polyentrefer ont été réalisées [9] et [10] mais les difficultés mécaniques (nécessité de très faibles entrefers axiaux) ont stoppé leur développement.

Géométries des machines linéaires

Sans aborder les principes de conversion électromécanique, trois familles d'architectures peuvent être distinguées [11] :
- inducteur solidaire du rail, donc fixe (figure 6a) et induit mobile dont l'alimentation peut s'effectuer par un câble souple (mouvement limité) ou par transmission d'énergie sans contact, l'énergie peut être également être embarquée ;
- inducteur solidaire du rail (ex. table de machine outil) mobile et induit fixe localisé (alimentation facilitée), figure 6b ;
- induit fixe (figure 6c) et distribué sur la longueur du rail (voie active dans le cas des trains), la partie mobile supporte uniquement l'inducteur. Dans ce cas, l'énergie est amenée à la partie fixe ce qui évite les difficultés de transmission mais le système d'alimentation est complexe et coûteux.

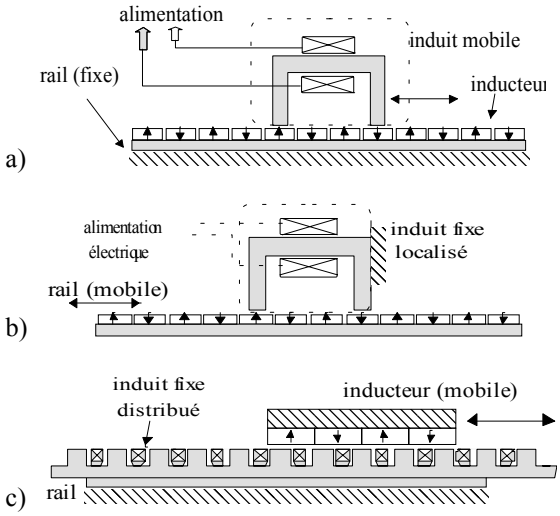


Figure -6-
Principales architectures d'actionneurs linéaires

Le rail (partie fixe, éventuellement de grande longueur) peut être « entouré » par la partie mobile ou également « entourant ».

Si la surface active d'entrefer est plane et unique, les efforts normaux (non productifs du mouvement attendu) sont loin d'être négligeables et créent des contraintes très fortes sur les guidages. Lorsque cela est possible, on essaie de réduire ces efforts en adoptant des structures symétriques, par exemple, avec des stators en forme de U (figure 7a) ou encore tubulaires (figure 7b). Les efforts normaux ont alors une résultante nulle si le centrage est parfait (comme dans les machines tournantes cylindriques), mais l'équilibre obtenu est instable et il subsiste toujours un effort résiduel de décentrement. Il est donc nécessaire de réaliser un guidage mécanique très précis. Généralement, celui-ci est déporté et lié à la charge entraînée. Ce guidage devra avoir un coefficient de frottement aussi faible que possible, surtout dans les applications où la masse embarquée est grande.

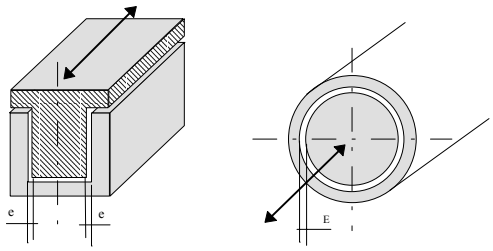


Figure -7-
(a) forme en U et T (b) forme tubulaire
Géométrie minimisant l'effort normal parasite

La figure 8 montre un exemple d'actionneur linéaire direct industriel à aimants NdFeB (série avec deux diamètres de barreau central : ϕ 25 et 38 mm, les poussées atteignent 1300 N, les vitesses 11 m/s et les accélérations 200 m/s², pour les plus petits). L'architecture est de type a (fig.6) et la géométrie de type b (fig. 7).

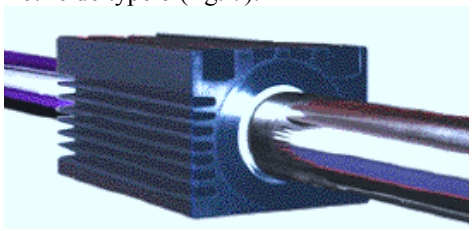


Figure -8-
Moteur Linéaire à aimants tubulaires (Linear Technology)

Notons, pour clore ce chapitre qu'il existe des actionneurs, dits linéaires, indirects, c'est à dire utilisant une conversion mécanique de mouvement de rotation en translation.

III- Limites de faisabilité en très grande vitesse

Nous ne considérerons ici que des structures cylindriques classiques. Dans ce cas, le couple s'exprime en fonction de la pression tangentielle et des dimensions de l'entrefer r (rayon moyen) et L (longueur active) :

$$C_{max} = \sigma_{T\,max}.2.\pi.r^2.L \qquad (1)$$

Le couple en régime continu est limité par les échauffements, on peut montrer que pour des échanges thermiques de surface (convection naturelle ou forcée), la pression tangentielle évolue en :

$$\sigma_T \propto l^{*0,5} \qquad (2)$$

où l^* est une dimension réduite (application des lois de similitude [12]).

Le rayon est limité par la vitesse périphérique maximale v_{pmax} elle-même limitée par les caractéristiques de résistance des matériaux et la géométrie du rotor :

$$r = \frac{v_{p\,max}}{\Omega_{max}} \qquad (3)$$

Les vitesses périphériques maximales d'induit possibles dans différents types de machines sont :
- turbo-alternateurs ***230 m/s*** en fonctionnement normal (***270 m/s*** en survitesse 20%), rotor en acier forgé spécial ([13]).
- asynchrones à cage et encoches semi-fermées : ***160 m/s*** (Kavo EWL),
- asynchrones à cage encoches fermées et forme des barres optimisée (ACEC Energie [GILO_SEE98] et Satcon Corp.) ***300m/s***.
- à aimants enterrés (défluxables) (Parvex) ***110 m/s*** (160 m/s faisables avec des tôles fer-silicium classiques).
- à aimant tube NdFeB non fretté ***95 m/s*** [14].
- à aimants en surface frettés (fibre de carbone) ***230 m/s***.
- à collecteur ***80 m/s*** (collecteur 50 m/s) [15].
- à rotor massif (réluctance pure ou avec excitation homopolaire...) ***300 m/s*** [14].

La flexion de l'arbre entre ses paliers conduit à des vitesses critiques de flexion, en faisant coïncider la première vitesse critique de flexion avec la limite de vitesse périphérique maximale, on arrive avec les aciers utilisés et des distances entre paliers et des diamètres d'arbre classiques à montrer [16] que le rapport K_{Lr} longueur active sur rayon est égal à une constante :

$$K_{Lr} = \frac{L}{r} \cong 5 \qquad (4)$$

ce qui conduit à des moteurs plutôt longs.

En combinant les équations (1) (3) et (4), on obtient :

$$C_{max} = \sigma_{T\,max}.2.\pi.K_{Lr}.\left[\frac{v_{p\,max}}{\Omega_{max}}\right]^3 \qquad (5)$$

Ainsi le produit couple maximal par vitesse maximale (appelé puissance de coin dans les moteurs fonctionnant à puissance maximale constante : $P_{coin} > P_{maxi}$) vaut :

$$P_{c\,max} = C_{max}.\Omega_{max} = \frac{\sigma_{T\,max}.2.\pi.K_{Lr}}{\Omega_{max}^2}.v_{p\,max}^3 \qquad (6)$$

Par exemple : une vitesse maximale de 10 000 tr/mn, une vitesse périphérique maximale de 180 m/s, un rapport K_{Lr} de 5 et une pression tangentielle de 4 N/cm^2 donnent une puissance de coin maximale de 7 MW.

On constate que la faisabilité de moteurs rapides de très grande puissance est conditionnée par l'efficacité du mode de refroidissement (pression tangentielle) et par la robustesse du rotor (vitesse périphérique élevée). Les pertes aérodynamiques prennent, dans ce contexte, des proportions considérables. Le fonctionnement en régime de défluxage pour les très grandes vitesses est pénalisant car les limites sont déterminées à la fois par le couple à basse vitesse et par la vitesse maximale : « puissance de coin ».

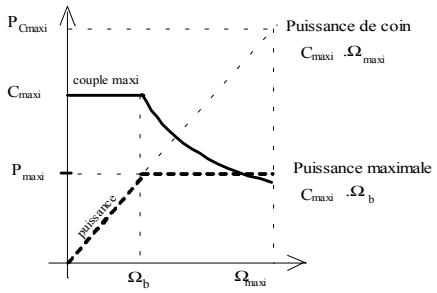


Figure -9-
Caractéristique mécanique maximale avec fonctionnement en régime de défluxage

En prenant en compte le fait que la pression magnétique active varie avec les dimensions (aspects thermiques), on obtient, à partir de (2) et (6) l'expression (7) qui montre comment évolue la puissance de coin maximale en fonction de la vitesse maximale de rotation :

$$P_{cMax} \propto K_{Lr}.\frac{v_{p\,max}^{3,5}}{\Omega_{max}^{2,5}} \qquad (7)$$

Par exemple, à 100 000 tr/mn, une vitesse périphérique maximale de 180 m/s, un rapport K_{Lr} de 5 et une pression tangentielle de 2 N/cm^2, permettent une puissance de coin de 30 kW.

Un accroissement de la vitesse de 80 à 200 m/s permet de multiplier par 16 la puissance de coin faisable à vitesse donnée. Par exemple, à 5000 tr/mn, la puissance de coin d'une MCC est limitée à environ 1,5 MW (soit, pour un fonctionnement à puissance maximale constante de 1700 à 5000 tr/mn, une puissance maximale de 500 kW), alors que celle d'une machine à commutation électronique capable de 200 m/s est de 24 MW.

La figure 10 montre sur une large plage de puissances, les limites de faisabilité des moteurs électromagnétiques cylindriques (paramètre vitesse périphérique maximale).

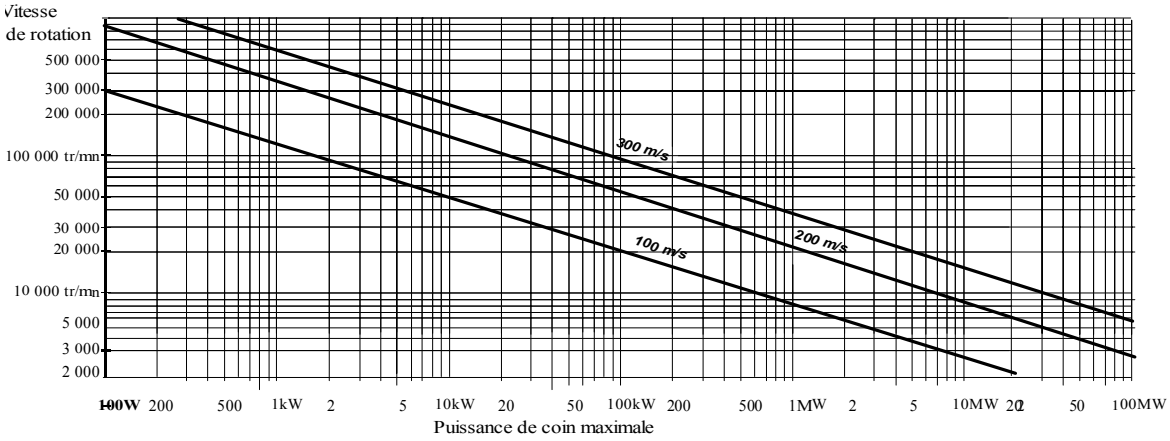


Figure -10-

Limites approximatives de faisabilité en vitesse maximale des moteurs électromagnétiques cylindriques à vitesse variable en fonction de la puissance de coin, paramétrées en vitesse périphérique du rotor

IV- Domaines d'application, besoins en matière d'entraînements directs, solutions adoptées

Pour illustrer la diversité des besoins en entraînements directs, nous avons choisi une classification par domaine d'application. Dans chaque situation, nous nous efforçons de mettre en évidence les caractéristiques recherchées et les solutions actuelles. Nous évoquerons également des tentatives de réalisations d'entraînements directs et les raisons pour lesquelles elles ont échoué.

❑ Transports

◆ Traction ferroviaire

Dans la très grande majorité des cas, les trains et métros sont motorisés par des moto-réducteurs tournants placés dans des boggies. Lorsque l'on recherche de plus grandes performances (plus grandes vitesses, accélérations élevées et freinage efficaces quelles que soient les conditions d'adhérence, confort, suppression du bruit de roulement, plus faible rayon de courbure des lignes...), une traction par **moteurs linéaires** peut se révéler intéressante. Les exemples commerciaux sont peu nombreux, on peut citer la ligne de transport automatique Birmingham-aéroport (abandonnée pour manque de pièces de rechange), les métros automatiques de Vancouver (Canada) (mis en service en 1985, 2 moteurs asynchrones linéaires LIM par voiture, architecture type fig. 6a) et de Kuala Lumpur en Malaisie (mis en service en 1998 (29 km de voies), 2 LIM par voiture). Dans ces deux derniers cas, l'avantage principal a été une réduction de hauteur. Celle-ci a permis une diminution de la section des tunnels et donc un abaissement substantiel des coûts de génie civil. Dans ces systèmes, il existe des roues dont la seule fonction est le guidage. Inconvénient : le moteur a un rendement plus faible et la consommation d'énergie a augmenté d'environ 10%.



Figure -11-

Métro de Kuala Lumpur à moteurs linéaires et sur roues (Bombardier).

Dans le domaine des trains à grandes vitesses et à sustentation magnétique, trois projets coexistent (Japon, Allemagne et Suisse). Au Japon (Maglev) et en Allemagne (Transrapid). Le Maglev japonais est à voie active (l'induit du moteur linéaire est réparti tout le long de la voie, architecture type fig. 6c) et sustentation magnétique. Les avantages de la sustentation magnétique résident dans l'absence d'usure par frottements, la réduction du bruit (particulièrement en zone urbaine et à vitesse modérée), le confort...



Figure -12-

Maglev japonais MLX01 à voie active, prévision de vitesse commerciale 500 km/h.

Dans le projet Swissmetro, la voie serait passive et l'énergie serait transmise à bord, sans contact, par

un transformateur linéaire [17]. La motorisation nécessite un effort maximal de 230 kN (accélération de 1,3 m/s²) jusqu'à 160 km/h soit environ 10 MW jusqu'à 500 km/h.



Figure -13-
Projet Swissmetro

Pour l'instant, mis à part le projet suisse qui fonctionnerait en tunnel sous basse pression, le coût des trains à voie active se révèle très élevé. Qui plus est, les grandes vitesses (> 400 km/h) au niveau du sol posent des problèmes difficiles de bruit aérodynamique. Bien que techniquement possible, il n'est pas encore certain que ces trains aient une vie commerciale.

Il arrive fréquemment que la vitesse de rotation des moteurs « ordinaires » soit proche de celle requise au niveau des roues, on peut alors envisager de supprimer la transmission mécanique. Mais en réalité, celle-ci joue un rôle fondamental de transmission élastique qui permet de réduire les masses non suspendues (impact sur l'usure des voies et sur le confort). Le problème est donc difficile ; malgré cela, il est envisagé de réaliser des **entraînements tournants directs**, en particulier pour des motorisations très réparties (Japon, projet NEXT250 Train à 250 km/h [18]). Dans [18], un moteur à aimants à rotor extérieur a été conçu pour un couple de 540 N.m à 1480 tr/mn (84 kW), d'une masse de 280 kg. Les avantages attendus, en traction ferroviaire sont une maintenance réduite, un plus faible bruit et un plus haut rendement.

◆ Tramway : en exploitation à Strasbourg, les moteurs-roues (4 moteurs asynchrones de 26,5 kW en régime continu, 120 kg par bogie, refroidis à l'eau) ont permis la suppression du différentiel, mais des problèmes d'usure anormale des organes de roulement sont observés : la gestion du différentiel électrique est un problème difficile encore mal maîtrisé.

◆ Traction routière

Pour les véhicules électriques (hybrides ou autres), qu'il s'agisse d'automobiles, autobus, de poids lourds ou de 2 roues, il est, comme dans le cas des trains, tentant de vouloir supprimer les organes de transmission. Actuellement, il existe des prototypes mais il n'y a, apparemment, pas de cas commercialisés, sauf des motoréducteurs intégrés aux roues mais il ne s'agit pas d'entraînements directs bien qu'il existe déjà une partie de la problématique. Les avantages sont la suppression des organes d'usure (lubrification, bruit) et une meilleure contrôlabilité.

La transmission à un moteur par roue (même s'ils ne sont pas directs) permet un contrôle indépendant des roues qui doit offrir un meilleur comportement routier [19] Dans le cas des transports en commun, ils permettent un abaissement du plancher et donc une accès facilité, pour les handicapés en particulier.

Limitations et inconvénients : le fonctionnement à basse vitesse (une roue de voiture tourne environ à 1000 tr/mn à 100 km/h) requiert, pour des raisons de confort et de tenue de route (masses non suspendues), des moteurs à très fort couple massique. Ceux-ci sont encore trop coûteux et trop lourds et l'allégement des chaînes de traction passe plutôt par l'augmentation de la vitesse de rotation des moteurs et donc l'utilisation d'un réducteur, c'est la voie la plus communément choisie aujourd'hui, en voici quelques exemples :

bus hybride de 12,2 m [20] General Electric, avec 4 moto-réducteurs de 75 kW intégrés dans les roues ;

- formule 3000 2 motoréducteurs de 80 N.m à 20 000 tr/mn - 150 kW, r = 10 [21] ;
- bus hybride CIVIS Renault VI, moteurs asynchrones ALSTOM intégrés dans des roues spécialement conçues par Michelin 80 kW maxi, r = 20 [22].

Les moteurs fort couple envisagés sont presque tous à aimants permanents à structures cylindriques [23] ou discoïdes à grand nombre de pôles. Les induits sont éventuellement sans encoches au prix d'un volume d'aimants plus important [24]. Une voiturette prototype (deux roues arrières motrices, CNR-T2) et un scooter ont été équipés de moteurs à flux axial [25]. La figure 15 montre le scooter sur lequel a été testé cette technologie.

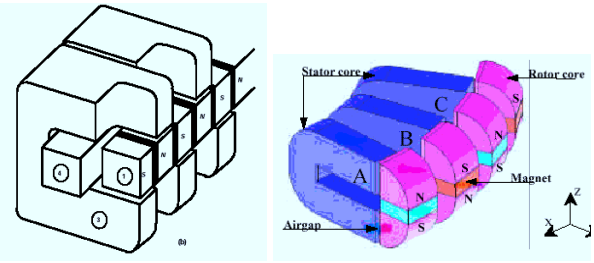


Figure -15-
Moteur à champ axial à aimants permanents pour scooter (Université de Rome)

L'un des principes de moteur envisagé et, à plusieurs reprises testé, est celui de type synchrone

à bobinages globaux, dit à flux transverse (TFM : transverse flux motor) [26]. Il s'agit de machines spéciales de type hybride.

La figure 16 montre quelques unes des géométries utilisées [27 et 28]. Dans la position relative rotor-stator de la figure 16a, tous les pôles identiques délivrent leur flux dans les pièces en C du stator. La structure b est de type Vernier (moteur dit Transverse Vernier Hybrid Reluctance Motor).



a b

Figure -16-

Structures de moteur à flux transverse [a : 27, b : 28]
1 : parties fer et aimants alternées rotor, 3 : pièces statoriques en C, 4 : bobinage d'induit global (solénoïdal)

Une autre variante de moteur fort couple est celle des structures Vernier à réluctance variable et à aimants [41], elle a également été étudiée dans un objectif d'application au véhicule électrique [42].

◆ Bicyclette à assistance électrique

Ici également, on a cherché à réaliser des entraînements directs d'une roue pour des raisons d'amélioration du rendement, de meilleure intégration et de silence (suppression du bruit de réducteur) [29]. Les puissances sont beaucoup plus faibles, environ 200 W à des vitesses maximales de roues de 200 tr/mn (27 km/h), le couple à basse vitesse doit atteindre 25 N.m.

◆ Propulsion navale (sous-marins, bateaux)

Dans ces applications, le couple à fournir est croissant avec la vitesse, un fonctionnement à puissance maximale constante est, en général, inutile. La compacité et une plus grande manoeuvrabilité sont les améliorations recherchées. Dans les petits engins sous marins, on a cherché à intégré le moteur à l'hélice (comme dans les ventilateurs), ainsi un moteur à réluctance variable de 7,5 kW à 1200 tr/mn a été conçu pour réaliser une unité de propulsion de 350 N [30]. Le rotor comprend 20 dents, les espaces interpolaires sont remplis avec un matériau amagnétique pour réduire les pertes hydrodynamiques et le stator est un simple secteur de 72° comprenant un système triphasé à 6 pôles bobinés.

Dans les gros bateaux, le moteur électrique entraîne généralement l'hélice à travers une « ligne d'arbre ». Afin de pouvoir faire varier l'orientation de l'hélice, une solution consiste à placer le moteur accoupler directement à l'hélice dans une nacelle (pod en anglais) mais, pour que cela soit possible, une grande compacité est nécessaire et des moteurs basse vitesse à très grande puissance volumique doivent être conçus. Par exemple, pour des gros paquebots ou des frégates, les puissances nécessaires dépassent les 10 MW par moteurs à des vitesses de moins de 200 tr/mn. Dans [7], un moteur à aimants à champ axial modulaire à été dimensionné pour une puissance de 20 MW à 180 tr/mn, la masse est passée de 120 tonnes (avec un moteur synchrone cylindrique à grand nombre de pôles) à 62 tonnes (couple massique de 17 N.m/kg) et le volume à été réduit d'un facteur 7 grâce à la meilleure utilisation du volume que permettent les architectures discoïdes à polarité élevée.

◆ Ascenseurs

Habituellement les moteurs d'ascenseur sont situés dans une cabine en haut de la cage et l'ascenseur est tiré par un système de câbles. Pour diverses raisons, gain de place (suppression de la cabine), élimination des câbles (limite de longueur), accroissement des accélérations, on est amené à éliminer le système de câbles (« ropeless elevator »). Deux solutions sont actuellement sur le marché : l'ascenseur est un véhicule avec des roues qui se déplace dans un couloir vertical (Schindler) ou un moteur linéaire propulse la cabine (Otis au Japon). Dans [31], une motorisation linéaire asynchrone est conçue pour le transport de 30 personnes (2 tonnes utiles et autant pour la cabine) à 7 m/s, une force de 58 kN et une puissance de plus de 400 kW sont nécessaires. La masse embarquée du moteur représente une part non négligeable et il est nécessaire d'optimiser le système complet.

Des entraînements directs se rencontrent également dans des systèmes à câbles : lorsque l'on recherche des grandes vitesses (de 2,5 à 10 m/s, Otis), le moteur est accouplé directement à l'enrouleur, il peut s'agir de moteurs à courant continu (solutions anciennes) ou de moteurs asynchrones.

❑ **production d'énergie (générateurs)**

◆ Dans la production d'énergie à grande échelle, on est habitué, depuis longtemps, à des alternateurs à rotor bobiné entraînés directement par des turbines à vapeur (grandes vitesses, jusqu'à 1500 MW) ou à gaz ou à eau (basses vitesse). La vitesse est fixe pour satisfaire simplement l'exigence de la fréquence 50 Hz. Mais il est aujourd'hui envisageable, grâce à l'électronique de puissance, de fonctionner à vitesse variable pour améliorer les rendements des groupes d'entraînement. Seuls des gains substantiels sur la consommation d'énergie pourraient permettre l'amortissement de systèmes aussi complexes.

◆ Dans un certain nombre de systèmes de propulsion embarqués (aéronautique, bateaux, trains

autonomes, véhicules hybrides série...), on réalise déjà (avions) ou l'on souhaite disposer de groupes de production d'énergie électrique extrêmement compacts. Une solution consiste à associer une turbine (par ex. réacteur) tournant à grande vitesse (quelque 10 000 à 100 000 tr/mn) entraînant directement un alternateur très haute vitesse. Dans le cas où cette turbine a une vitesse de rotation très peu variable, on peut concevoir un alternateur fonctionnant au delà de sa première vitesse critique ce qui permet d'aller outre les limitations de vitesse (et donc de compacité) décrites au chapitre III (fig. 10).

Un groupe de production d'électricité pour poids lourd hybride a été développé par Volvo et ABB [32]. Il se compose d'une turbine entraînant, de 50 000 à 70 000 tr/mn, un alternateur à aimants NdFeB de puissance continue 110 kW. La masse totale du groupe est de 400 kg et son rendement de 32%. En observant le graphique de la figure 10, on peut constater qu'il faut normalement dépasser 300 m/s pour pouvoir convertir 110 kW à 70 000 tr/mn. Ici la puissance a pu être obtenue avec une vitesse périphérique de 230 m/s, grâce à un rotor plus long fonctionnant au-delà de sa première vitesse critique de flexion. Le rotor est constitué d'un aimant cylindrique bipolaire fretté. General Motors a également développé un tel groupe à turbine et alternateur à aimants de 40 kW à 140 000 tr/mn (masse 100 kg).

Les machines TFM (voir moteurs de traction, fig.16) sont utilisées également, pour leur qualité de compacité à basse vitesse, comme générateurs dans les groupes de propulsion, commercialisés par Siemens (générateurs Voith 160 et 210 kW) pour des autobus hybrides de 18 à 27 tonnes. Elles sont entraînées directement par un moteur à combustion interne à des vitesses de l'ordre de 1000 tr/mn.

◆ Les aérogénérateurs [33], actuellement en forte expansion, sont, en grande majorité, constitués d'une hélice à 3 pales et à axe horizontal entraînant, à basse vitesse (quelques 10 à 100 tr/mn selon les puissances de 1,5 MW à 100 kW) un générateur rapide à travers un multiplicateur mécanique de vitesse. Pour minimiser les opérations de maintenance (graissage) et réduire le bruit, certains fabricants (Enercon) réalisent des générateurs très basse vitesse intégrés dans l'hélice. La figue 17 montre une éolienne Enercon 500 kW équipée d'un alternateur à rotor bobiné à très grand nombre de pôles (environ 60 paires). Des générateurs à aimants permanents sont également à l'étude. Dans les petites puissances (éoliennes pour voiliers par exemple), les vitesses de rotations beaucoup plus élevées sont compatibles avec des machines de construction plus classique, l'entraînement direct s'est donc naturellement imposé.



Figure -17-
Générateur direct pour éolienne 500 kW (Enercon)

◆ Autres générateurs électromécaniques d'énergie

La production d'énergie électrique en faible puissance, à partir de moteurs à combustion interne, s'effectue habituellement avec des alternateurs tournants classique accouplés directement au moteur thermique. Pour la réalisation de véhicules hybrides, ou encore, pour la production d'énergie électrique combinée à celle de chaleur, on peut associer directement aux pistons du moteur des alternateurs linéaires (dispositifs à « pistons libres ») qui convertissent l'énergie mécanique en énergie électrique. L'avantage est la suppression des dispositifs mécaniques de transformation du mouvement de translation des pistons en mouvement de rotation. L'idée, qui n'est pas nouvelle, renaît actuellement pour des dispositifs résidentiels à cycle combiné (production de chaleur et d'électricité) à partir de la combustion de déchets végétaux ou ménagers. La société Sunpower Inc. A déjà réalisés des prototypes à cycle Stirling (Biowatt) et envisage une commercialisation en 2000 pour des puissances électriques de 500 W à 10 kW (15% de l'énergie est transformée en électricité et 70% en chauffage).

La figure 18 montre la structure d'un alternateur à piston libre Stirling de Sunpower de 400 W [34]. L'alternateur comprend un aimant annulaire mobile, l'aimantation radiale est alternée axialement et produit un flux alternatif dans le bobinage. La longueur totale est de 36 cm et le diamètre de 16 cm.

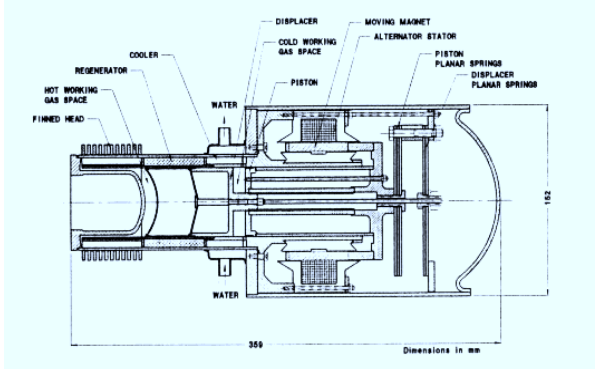
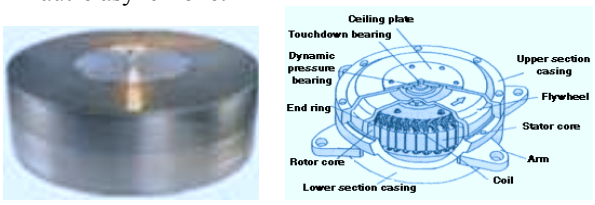


Figure -18-
Alternateur intégré dans un piston libre à cycle Stirling (Supower Inc.)

◆ Stockage électromécanique d'énergie

Le stockage d'énergie dans des volants d'inertie nécessite des entraînements directs à très grande vitesse. Pour les hautes densités d'énergie (applications embarquées), on utilise des volants en matériaux composites, les vitesses sont alors extrêmement élevées, selon les énergies stockées (quelques kW.h) : 30 000 à 100 000 tr/mn, les machines sont généralement à aimants et rotor extérieur. Pour des applications à plus fortes contraintes économiques et moins exigeantes sur le plan de la masse, on a recours à des volants en acier haute résistance. Deux applications commercialisées peuvent être citées. La première concerne un tramway mis en service à Bristol en 98, il fonctionne de façon autonome (pas de captage de courant) et recharge électriquement sont volant d'inertie à certaines stations. La seconde concerne des alimentations sans coupures (Active Power et Flywheel Japanese), dans lesquelles on a remplacé les batteries électrochimiques par un volant d'inertie, il s'agit alors de grandes puissances (qq 100 kW à qq MW) avec des temps de décharge courts (quelques minutes), le moteur/générateur associé est, dans un cas, à réluctance variable, dans l'autre asynchrone.



a b

Figure -19-

Accumulateurs électromécanique

(a : Active Power [35], b : Flywheel Japanese [36])

Exemple de moteur/générateur pour volant composite : machine à aimants 368 kW de 29 000 à 58 000 tr/mn 58 kg, 6,3 kW/kg.

❑ **Equipements embarqués**

◆ Alternateurs-démarreurs



Figure -20-

Démarreur/Alternateur à réluctance variable de réacteur (General Electric - Sundstrand aerospace)

Dans les avions, voire les hélicoptères, des travaux sont menés pour réaliser des démarreurs/générateurs directement accouplés à la turbine. General Electric [37] travaille depuis plusieurs années sur un dispositif dont les caractéristiques sont les suivantes : 177 N.m de 0 à 13 500 tr/mn et 250 kW permanents (330 kW crêtes 5 s) de 13 500 à 22 200 tr/mn (27 000 tr/mn en survitesse). La machine est à réluctance à double saillance (structure 12-8, masse 59 kg, fig.20). Cette machine a été choisie pour ses qualités de fonctionnement en environnement sévère (haute température...) et pour sa grande tolérance aux défaillances (nombreuses possibilités de fonctionnements dégradés).

Dans le cas de véhicules automobile, un alternateur-démarreur présente plusieurs avantages : combinaison de deux fonctions en une seule machine, lissage de la rotation du moteur thermique à basse vitesse tout en supprimant le volant d'inertie et récupération d'énergie au freinage (ex. Citroën Xsara Dynalto). Ce concept ancien s'est toujours heurté à des problèmes de coût, mais aujourd'hui la puissance des alternateurs a augmenté et se rapproche de celle du démarreur. En outre, un tel système pourrait permettre la traction électrique en zone urbaine pour de petits trajets et, en fonctionnant en mode hybride parallèle, il permettrait des gains de consommation et pollution.

Un alternateur-démarreur de véhicule routier est accouplé directement au moteur thermique, dans une application où il sert également de moteur de traction urbain (véhicule hybride Ford) [38], il doit développer au démarrage 300 N-m de 0 à 250 rpm, pour le fonctionnement en moteur de traction : 8 kW (20 secondes entre 1000 et 3000 tr/mn) et pour le fonctionnement en générateur 3 kW en continu avec un rendement de plus de 80 %. Les contraintes d'encombrement sont drastiques : épaisseur très faible, structure annulaire (ϕ_{ext} 295 mm). Dans l'application Ford, la machine retenue est asynchrone. La Toyota Prius, premier véhicule hybride commercialisé intègre, au moteur thermique, un système moteur et générateur à aimants qui remplit entre autre la fonction démarreur.

◆ Divers équipements automobiles

Deux projets, avec quelques réalisations prototypes mérites d'être signalés. Il s'agit des suspensions et des soupapes électriques.

Des suspensions électriques, on attend un meilleur contrôle de la stabilité et du confort, voire une récupération de l'énergie. Avec une puissance moyenne de 100 à 200 W par roue, l'énergie récupérable ne serait pas négligeable, en particulier sur chaussée déformée [39].

Les soupapes électriques posent également un problème très difficile par les accélérations de mouvement (qq 1000 m/s²) et les puissances instantanées exigées (kW). En effet, on en attend une plus grande précision de contrôle que les soupapes à commande mécanique. Actuellement, un fabricant FEV [40] propose des électroaimants

(fig. 21) dont la masse mobile doit être très faible (masse des soupapes environ 50 g).

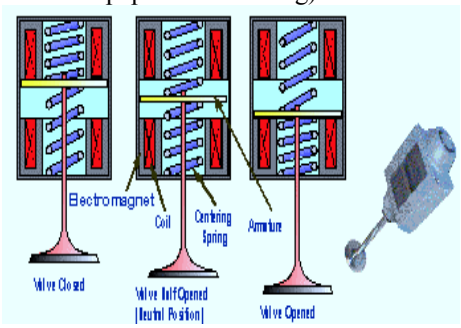


Figure -21-

Actionneur de soupape pour moteur à explosion (FEV)

❑ **Applications domestiques**

Les contraintes sont, ici : coût, discrétion acoustique et 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.

◆ Aspirateurs

On assiste, ici, à un accroissement des vitesses de rotation dans l'objectif de réduire le volume et le coût de l'ensemble moteur-turbine. La 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. Cependant le collecteur (limites de commutations sous 230 V et encombrement : allongement de la distance entre paliers) freine la progression. Ainsi des moteurs à commutation électronique (aimants permanents ou réluctance variable) capable de vitesses plus grandes sont à l'étude.

année	1993	1994	1996	1997
Ω_{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

◆ Lave-linge

Des lave-linge à entraînement direct (une courroie permet, d'habitude, d'obtenir un rapport de réduction d'environ 20), ont été récemment commercialisés sur les marchés néo-zélandais (tambour vertical) et australien. Le couple maximal est de 25 N.m et la vitesse maximale (à couple réduit) vaut 1000 tr/mn en essorage. Le moteur est à aimants (42 à 56 pôles). Ce procédé permet un plus grand silence, une meilleure intégration et une fiabilité accrue.

◆ Réfrigérateurs

Dans le cas des compresseurs de réfrigérateur, un système à piston du compresseur entraîné par un moteur linéaire à aimants a été réalisé et testé, il permet un plus grand silence de fonctionnement. La figure 22 montre un compresseur Sunpower. [32].

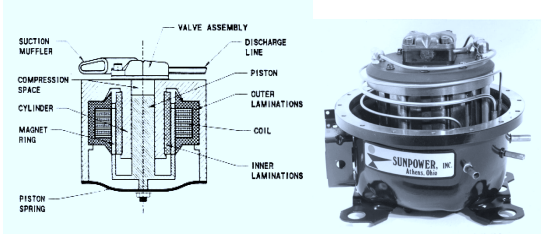


Figure -22-

Compresseur pour réfrigérateur à moteur linéaire (Sunpower Inc.)

◆ Fermetures de rideaux

Dans le domaine de la domotique, une application des moteurs linéaires est à signaler, il s'agit des tringles de rideaux. L'intégration dans des tringles standards (par exemple 24 sur 16 mm de section) ainsi que la discrétion acoustique (pas de système mécanique de conversion rotation-translation) a conduit à la réalisation de moteurs linéaires spéciaux tirant actionnant directement les rideaux (SOMFY). Les ordres de grandeurs des caractéristiques sont quelques 10 N pour des vitesses de moins de 1 m/s (puissance utile de l'ordre de 10 W) et pour des fonctionnements de courte durée (moins d'une minute).

❑ **Péri-informatique et audio-visuel**

◆ Disques durs

Moteurs d'entraînement du disque : pour des raisons d'encombrement, ils sont maintenant intégrés à l'intérieur de l'empilement de disques (cylindrique rotor extérieur), 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 et va vers 14 000 tr/mn. Elle doit être très précise et la rotation très régulière avec une grande répétitivité (les paliers à billes doivent être remplacés par des paliers hydrodynamiques).

Actionneurs de tête de lecture : pour obtenir des temps d'accès faibles, on a recours à des entraînements directs semi-rotatifs (trajet en arc de cercle). La technologie à bobine mobile est encore la plus utilisée mais on s'oriente vers des aimants mobiles pour des accélérations encore plus fortes.

◆ Têtes de magnétoscopes

Pour obtenir des rotations très régulières et silencieuses, on a recours à des moteurs à aimants, de préférence à champ axial (moteurs plats) et à bobinages concentrés (non répartis) dans l'entrefer (sans encoches). 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.

❑ Quelques applications à très grandes vitesses

◆ Machines-outils

Les électrobroches rapides représentent une évolution importante dans l'usinage car elles permettent un plus grand débit de matière et une meilleure qualité de finition. Les moteurs doivent être intégrés à la broche avec des paliers à grande raideur afin d'obtenir de hautes précisions. Les paliers sont de type fluides (hydrodynamiques), magnétiques actifs ou à billes céramiques.

Les moteurs utilisés dans ces applications sont, la plupart du temps, de type asynchrones à cage. Les vitesses périphériques atteignent 160 m/s et voici quelques exemple de puissances obtenues : 130 kW à 30 000 tr/mn, 10 kW à 120 000 tr/mn.

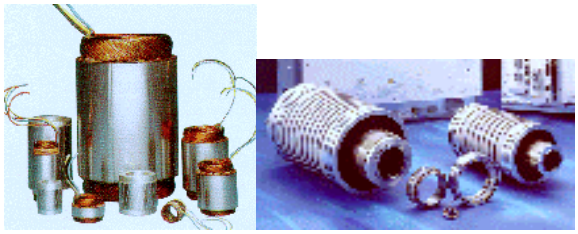


Figure -23-

Moteurs pour électrobroches

(à droite : asynchrones Kavo-EWL, à gauche : à aimants Parvex)

L'une des caractéristiques particulières des entraînements de broches est la nécessité de fonctionner à puissance maximale constante sur une plage de vitesse assez étendue (souvent 2 avec les asynchrones). Depuis quelques années Parvex [43] propose des moteurs rapides à aimants permanents défluxables, également intégrables aux broches, dont le principal avantage est d'avoir un « rotor froid » (contrairement au moteur asynchrone, il n'y a quasiment pas de pertes dans le rotor à aimants) et ainsi un accroissement sensible des précisions d'usinage (moins de dilatation).

Le perçage rapide des circuits imprimés nécessite des vitesses de rotation très élevées, par exemple 250 000 tr/mn avec 60 W. Dans [44], c'est un moteur synchrone à aimants monté sur paliers

Les outils dentaires exigent, pour des puissances moindres, des vitesses exceptionnelles obtenues encore très souvent avec des moteurs pneumatiques, par exemple 400 000 tr/mn sous 32 bars.

Dans les grandes vitesses, les fréquences électriques sont élevées et les faibles nombres de spires des bobinages d'induit donnent de faibles inductances. Pour un bon contrôle du courant avec des ondulations de hachage acceptables, des fréquences de modulation de largeur d'impulsion (PWM) très élevées sont souvent nécessaires.

◆ Pompes et compresseurs à très grande vitesse

Une pompe turbomoléculaire cryogénique de 100 W à 500 000 tr/mn a été réalisée [45]. La société ETEL a conçu des moteurs à aimants frettés (environ 200 m/s) de 500 W à 180 000 tr/mn et 1 kW à 100 000 tr/mn pour des compresseurs frigorifiques (station spatiale internationale).

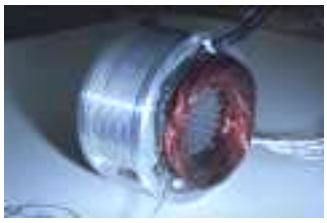


Figure -24-

Stator d'un moteur à aimants 500 W-180 000 tr/mn (ETEL)

◆ Compresseurs de grandes puissances

Les applications les plus fréquentes sont les entraînements directs de compresseurs pour le stockage de gaz ou pour les pipelines [46 à 49]. Il s'agit, ici, souvent de remplacer des entraînements par turbine. Jusqu'à un peu plus de 20 MW, les moteurs asynchrones à cage (encoches fermées pour accroître la tenue mécanique) dominent. Ils utilisent des paliers hydrodynamiques ou magnétiques (plus faibles pertes mécaniques et vitesses sensiblement plus élevées). Quelques exemples : 5 MW-19 ktr/mn, 9,4 MW-8 ktr/mn, 25 MW-9 ktr/mn.

Pour les plus grandes puissances, on utilise des moteurs synchrones à rotor bobiné (type turbo-alternateur), par exemple : 30 MW-5250 tr/mn (raffinerie).

◆ Ventilateurs de grandes puissances

Dans les grandes souffleries d'essais aérodynamiques, les vitesses exigées sont plus faibles et les vitesses périphériques nécessaires moins contraignantes. Les moteurs sont de type synchrones à nombre de paires de pôles élevé (technologie alternateur hydraulique) Deux exemples : 50 MW- 900 tr/mn Alstom ETW, 100 MW 600 tr/mn ABB Nasa. L'alimentation de ces machines de grande puissance se fait encore par des convertisseurs de courant à thyristors.

❑ Quelques applications fort couple

L'entraînement des bras de robot industriels nécessite de grandes accélérations (réduction du moment d'inertie ramené au moteur) et une très grande répétabilité (les réducteurs introduisent du

jeu : phénomène de « backlash »). Les meilleures performances sont obtenues avec des moteurs directs de type synchrones à aimants ou à réluctance variable (voir ch.II, fig.3). La précision est alors liée à la qualité du capteur de position utilisé pour l'autopilotage et pour le contrôle de position.

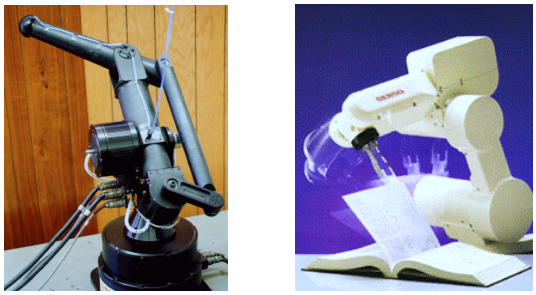


Figure -25-
Robots avec moteurs « direct drive »
(Univ. Berkeley et Denso 6 axes)

Les grands télescopes demandent également des grandes performances sur le plan de la qualité du mouvement à très basse vitesse et de la précision. Les actionneurs sont à aimants généralement disposés en secteurs.

❑ **Quelques applications linéaires**

Dans le cas des tables de machines-outils, des centres d'usinage, des machines de découpe (laser, jet d'eau)...., les moteurs linéaires permettent des accélérations (plusieurs dizaines de g), des vitesses (plusieurs dizaines de m/s, NSK 40 m/s) et, surtout des raideurs, des précisions et des répétabilités que l'on ne peut pas atteindre avec des systèmes mécaniques. Les machines adoptées sont la plupart du temps à aimants permanents (architectures a ou b de la figure 6), quelquefois asynchrones et, plus rarement, à réluctance.

Pour obtenir de très grandes accélérations et de grandes précisions de positionnement, les actionneurs à bobine mobile se placent parmi les meilleurs (machines de fabrication et d'assemblage comme celles de placement de circuits intégrés). La société ETEL fabrique de tels actionneurs pour des machines de bonding (réalisations des connexions pattes-puce) de circuits intégrés [51], des accélérations de 300 m/s² sont atteintes, le guidage de très haute précision est obtenu par coussin d'air. Les performances sont essentiellement limitées par les échauffements.

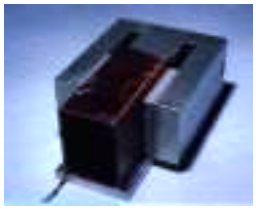


Figure -26-
Actionneur à bobine mobile (ETEL)

Les pompes à pétrole terrestres produisent un mouvement linéaire du piston à partir d'un moteur tournant actionnant un dispositif à balancier. Pour remplacer cette structure encombrante, un moteur synchrone linéaire à inducteur bobiné a été conçu et testé pour générer directement le mouvement linéaire de pompage [52]. Un mouvement sinusoïdal d'amplitude crête à crête 3 m et de fréquence 8 cycles par minute est requis, la force utile est de 50 000 N à laquelle il faut ajouter une force d'accélération maximale de 30 000 N environ. La puissance mécanique crête atteint 100 kW. La structure retenue pour le moteur linéaire est de type induit mobile (2,2 m de long et 0,4 m de diamètre), l'inducteur concentrique extérieur est fixe (longueur 5,25 m et diamètre 0,75 m) (architecture a de la figure 6). Ce projet n'a pas abouti industriellement à cause des difficultés mécaniques.

V- Conclusion

D'une façon générale, l'actionneur doit s'adapter aux caractéristiques mécaniques de la charge. Dans nombre de situations, cela se passe naturellement et on ne songe pas à interposer un « adaptateur » mécanique mais dans les autres cas on est confronté au choix d'un entraînement direct ou indirect. Le choix d'une solution technologique s'effectue au meilleur coût du système complet (incluant le « génie civil ») tout en satisfaisant, bien sûr, aux exigences. Dans ce cas, l'entraînement direct est souvent handicapé car les solutions technologiques sont souvent sophistiquées. Mais lorsque l'on ne sait pas faire autrement (accélération, précision, intégration, fiabilité…), il s'impose.

Il s'agit bien d'une véritable tendance qui touche tous les domaines

Nous n'avons pas abordé, dans cet article, les nouvelles technologies (voir [53]) telles que celles à matériaux électroactifs ou celles électromagnétiques à supraconducteurs. Les premières ont déjà bien pénétré certains secteurs : les actionneurs piézo-électriques équipent, depuis plus de 10 ans, les objectifs motorisés de nombreux appareils photos ou caméscopes. Quant aux machines supraconductrices, elles font toujours l'objet de recherches sans avoir encore trouver d'applications. Ces technologies émergeantes viennent conforter le domaine des basses vitesses mais, dans les grandes vitesses, les structures électromagnétiques sont encore bien implantées.

Remerciements pour les précieux renseignements fournis, à Michel GUINET(Moulinex) domaine de l'électroménager (aspirateurs notamment), à Jean-François MAISTRE (Parvex) moteurs de broches, Marcel JUFER (EPFL) disques durs, Eric FAVRE (ETEL) grandes vitesses, José HERRADA (SEB-Rowenta), lave-linge.

V- Bibliographie

[1] B. MULTON, « L'énergie sur la terre : analyse des ressources et de la consommation. La place de l'énergie électrique. », Revue 3E.I n°13, septembre 98, 9p.
[2] B. NOGAREDE, « Moteurs piézoélectriques »
Techniques de l'Ingénieur D3765, traités de Génie Electrique.
[3] P. TIXADOR, « Les supraconducteurs », Hermès, Paris 95.
[4] J. BONAL, « Entraînements à vitesse variable » Tome 1 : rappels d'électrotechnique de mécanique, les procédés de variation de vitesse, Lavoisier Tech. Doc.
[5] M. JUFER, « Les machines électriques pour entraînement direct, état de l'art et limites en densité d'effort et de puissance », CEMD'99, Cachan 4 février 1999.
[6] P. TIXADOR, et al., « Moteur couple supraconducteur à aimants permanents », REE n°3, mars 1997, pp43-46.
[7] R. MICHAUX, P. LETELLIER « Les machines discoïdes à champ axial dans les systèmes de propulsion électrique », REE n°3, mars 1997, pp.37-42.
[8] H. BEN AHMED, L. PREVOND, B. MULTON « Structures polyentrefers : solutions pour les entrainements directs ? », Colloque SEE CEMD99, Cachan 4 février 99.
[9] J.P. BASTOS, R. GOYET, J. LUCIDARME « Performances intrinsèques des machines à réluctance variable à disques imbriqués », Rev. Phys. Appl. 15, Janvier 1980, pp. 45-54.
[10] J. LUCIDARME, C. RIOUX, J. POUILLANGE, « Moteurs discoïdes à réluctance variable et à aimants permanents : des couples spécifiques élevés à faible vitesse », RGE n°3, mars 97, pp.48-52.
[11] A. BEN AHMED, et al. « Special Synchronous Linear Actuators. Structures and Performances. », Revue Electromotion, à paraître en fin. 98.
[12] M. JUFER, « Electromécanique », Traité de l'école polytechnique fédérale de Lausanne, Ed. Georgi (1979).
[13] G. RUELLE, « Turboalternateurs », Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie Électrique D3530, 3-1993, 16p.
[14] K. ENDO, A. MASHIMO, « A High Performance Permanent Magnet Motor for Electric Vehicle », EVS14, 1997, proc. CDROM.
[15] C. HAGLON « Machines électriques à vitesse variable et à haute puissance massique et volumique », Journées DRET électrotechnique avancée, octobre 1989, 26 p.
[16] A. WIART « New High-Speed High Power Machines with Converter Power Supply », MOTORCON 1982, pp.354-365.
[17] M. JUFER, A. CASSAT, N. MACABREY « Swissmetro, a High Speed Underground Transportation System », SPEEDAM, Taormina (Italy, June 1994, pp.227-230.
[18] K. MATSUOKA, K. KONDOH, H. HATA « Development of Wheel-Mounted Direct Drive Traction Motor », WCRR'97 World Congress on Railway Research, Florence, Italy.
[19] B. ARNET, M. JUFER, « Torque Control on Electric Vehicles with separate wheel drives », EPE'97, Trondheim, Vol.4, pp.659-664.
[20] R.D. KING, et al. , « Heavy Duty (225 kW) Hybrid-Electric System for Low-Emission Transit Buses. Performances, Emission and Fuel Economy Tests », EVS 14 1997, 13 p.
[21] P.H. MELLOR, T. ALLEN, D. HOOWE, « Operational Experience of a Hub-Mounted, Electric Drive System for a High Performance All-Electric Racing Vehicle », EVS 14 1997, 9 p.
[22] B. JEANNERET, et al. , « Drive train evaluation using simulation Application to the V2G/VEG vehicle developed by Alstom and Renault VI » EVS15, Brussels oct.98.
[23] C. ESPANET, « Modélisation analytique d'un moteur-roue synchrone sans balais en vue de son optimisation », JCGE'98, Cachan, pp.249-252.
[24] B.J. CHALMERS, et al. , « Compact Permanent-Magnet Machines » Electric Machines and Power Systems, n°25, 1997, pp.635-648.
[25] F. CARICCHI, et al. , « Compact Whell Direct Drive for Evs », IEEE IA Magazine, Nov/Dec. 96, pp.25-32.
[26] H. WEH, « Synchronous Machines with New Topologies », SM 100, Zürich, August 91, Part 2, ppC1-C9.
[27] MASMOUDI, A. ELANTABLY, « Electric Propulsion for Hybrid Buses, a Comparison Study » EVS15, oct98.
[28] D. HADJIDJ, et al., « A new structure of a wheel motor : the Transverse Vernier Hybrid Reluctance Motor - Comparison with the Synchronous AC Brushless Motor », EVS15, oct98.
[29] C. ESPANET, M. KARMOUS, J.M. KAUFFMANN, « Le vélo électrique », Journées électrotech. 98 Club EEA Nancy.
[30] «K.M. RICHARDSO N, et al.., « Design and Performance of a rotor position sensing system for a switched reluctance marine propulsion unit », IEEE IAS96 conf., Vol.1, pp.168-173.
[31] T. MORIZANE et al. « Direct Linear Drives for Vertical Transportation », EPE'95, Vol.3, pp98-103.
[32] P. CHUDI, A. MALMQUIST, « Groupe propulseur hybride à faibles émissions de substances nocives pour camions et autobus modernes », Revue ABB 6/7 1996, pp.12-18.
[33] G. CATTO « Recent Developments in the use of Electrical Machines in Wind Turbines », ICEM'96 Conf. Vigo, 10-12 sept. 96, Vol.3, pp.353-357.
[34] R. REDLICH « A summary of Twenty Years Experience with Linear Motors and Alternators », 1996,
http ://www.sunpower.com/pub64/linmot.html.
[35] Active Power, site internet
http://www.activepower.com/whyflywheel.html.
[36] Flywheel Japanese, site internet
http://www.world-egg.com/fly/indexe.html.
[37] E. RICHTER, C. FERREIRA, A.V. RADUN « Testing & Performances Analysis of a High Speed, 250 kW Switched Reluctance Starter Generator System », ICEM'96 Conf. Vigo, 10-12 sept. 96, Vol.3, pp.364-369.
[38] A. K. JAURA, M.B. LEVIN (Ford), « Starter Alternator Evolution and Interface in Hybrid Vehicles », EVS15, oct98.
[39] I. MARTINS, J. ESTEVES, « Energy Recovery from an Electrical Suspension for EV », EVS15 Brussels oct.1998.
[40] FEV, site internet,
http://www.fev.de/design/valvdesgn.htm#vvt.
[41] D. MATT, J.F. LLIBRE, « Performances comparées des machines à aimants et à réluctance variable. Maximisation du couple massique ou volumique », Journ. Phys. III, oct. 95, pp.1621-1641.
[42] P. POULOT et al. , « "Machine à réluctance variable et à aimants alternés. Dimensionnement d'une structure à concentration de flux destinée à la motorisation d'un véhicule électrique », EPE Drives Symp., Lausanne, 1994, pp.503-508.
[43] GEC-ALSTHOM PARVEX, Notice d'utilisation des servomoteurs de broche LW, n°PVD 3470F, 04/96.
[44] I.E.D. PICKUP et al., « A 250 000 rpm Drilling Spindle using a Permanent Magnet Motor », ICEM96, pp.337-342.
[45] M. DESSOUDE, EDF-DER
"Les moteurs électriques de demain"
[46] B.M. WOOD, et al., « Development of an 11 000 r/min 3500 hp Induction Drive for Refinery Service », IEEE Trans. On IA, Vol.33, may/june 1997, pp.815-825.
[47] J.C RAMA, A. GIESECKE, « High-Speed Electric Drives : Technlogy and Opportunity », IEEE Indust. Appl. Magazine, sept/oct 97, pp.48-55.
[48] D. GILON, « Cooling Solutions for High Speed High-Power Induction Motors », ICEM'94, Paris, Sept. 94, Vol.3, pp.516-521.
[49] D. GILON, V. VALLIERI, « Le moteur asynchrone à grande vitesse variable : une solution éprouvée pour l'entraînement direct de pompes et de compresseurs », journée SEE Club12 du 26 mars 98.
[50] I. TAKAHASHI, et al., « A Super High Speed PM Motor Drive System by Quasi-Current Source Inverter », IEEE IAS Meeting, Toronto, October 1993, Part I, pp.657-662.
[51] N. WAVRE, « Positionnement micro et nanométrique avec moteur linéaire sans balais sur coussin dair » Journées MPP, Nancy, juillet 1992, pp.43-51.
[52] CELDUC Rech., « Une pompe à pétrole à moteur linéaire », Revue Celduc News, N°4, avril 1992, pp.14-15.
[53] B. NOGARÈDE « Progrès et évolutions à venir dans les machines électriques, les obstacles à franchir » », CEMD'99, Cachan 4 février 1999