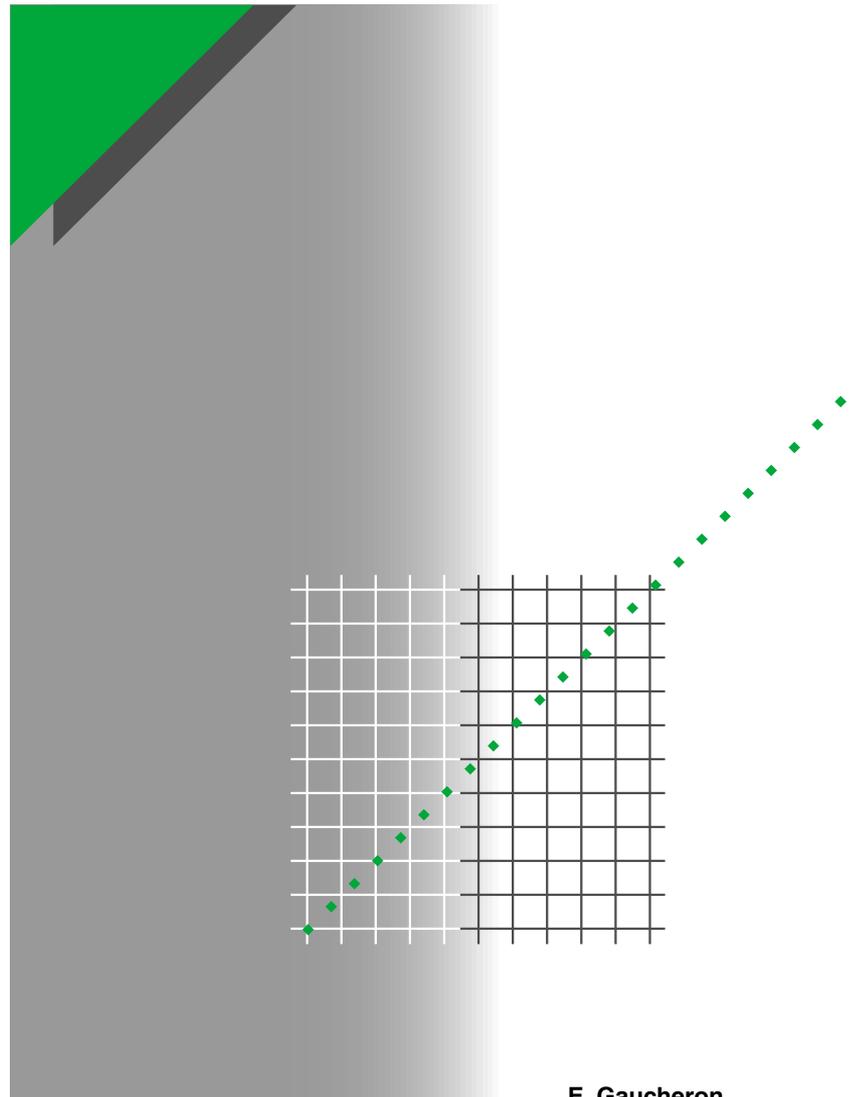


Cahier technique n° 207

Les moteurs électriques

... pour mieux les piloter et les protéger



E. Gaucheron

Les Cahiers Techniques constituent une collection d'une centaine de titres édités à l'intention des ingénieurs et techniciens qui recherchent une information plus approfondie, complémentaire à celle des guides, catalogues et notices techniques.

Les Cahiers Techniques apportent des connaissances sur les nouvelles techniques et technologies électrotechniques et électroniques. Ils permettent également de mieux comprendre les phénomènes rencontrés dans les installations, les systèmes et les équipements.

Chaque Cahier Technique traite en profondeur un thème précis dans les domaines des réseaux électriques, protections, contrôle-commande et des automatismes industriels.

Les derniers ouvrages parus peuvent être téléchargés sur Internet à partir du site Schneider Electric.

Code : <http://www.schneider-electric.com>

Rubrique : **Presse**

Pour obtenir un Cahier Technique ou la liste des titres disponibles contactez votre agent Schneider Electric.

La collection des Cahiers Techniques s'insère dans la « Collection Technique » de Schneider Electric.

Avertissement

L'auteur dégage toute responsabilité consécutive à l'utilisation incorrecte des informations et schémas reproduits dans le présent ouvrage, et ne saurait être tenu responsable ni d'éventuelles erreurs ou omissions, ni de conséquences liées à la mise en œuvre des informations et schémas contenus dans cet ouvrage.

La reproduction de tout ou partie d'un Cahier Technique est autorisée avec la mention obligatoire :

« Extrait du Cahier Technique Schneider Electric n° (à préciser) ».

n° 207

Les moteurs électriques

... pour mieux les piloter et les protéger

Etienne Gaucheron



Technicien supérieur en électrotechnique, de formation. Après un court passage chez Thomson il rejoint l'activité VVD (Variation de Vitesse et Démarreur) de Télémécanique en 1970 ; puis étant au service après vente Télémécanique il complète sa formation aux Arts et Métiers de Paris.

Spécialiste de la commande des moteurs, il participe à l'évolution de la variation de vitesse vers la commande des moteurs alternatifs. Son expérience s'enrichit dans les différents postes qu'il occupe : plate-formiste système puis chef de produits variateurs pour machine-outil, chef de produit variateur pour moteur asynchrone (produits Altivar) et responsable de l'équipe marketing projet de VVD.

Actuellement, il est le spécialiste « applications » autour de la commande moteur au sein de l'équipe anticipation pour l'activité PCP (Protection et Commande de Puissance) de Schneider Electric.

Les moteurs électriques

... pour mieux les piloter et les protéger

Les moteurs électriques sont de nos jours, à l'exception des dispositifs d'éclairage, les récepteurs les plus nombreux dans les industries et les installations tertiaires. Leur fonction, de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique, leur donne une importance économique toute particulière qui fait qu'aucun concepteur d'installation ou de machine, aucun installateur et aucun exploitant ne peut les ignorer.

Parmi tous les types de moteurs existants, les moteurs asynchrones triphasés notamment les moteurs à cage sont les plus utilisés dans l'industrie et au-delà d'une certaine puissance dans les applications du bâtiment tertiaire. De plus, bien que leur commande par des équipements à contacteurs soit parfaitement adaptée pour un grand nombre d'applications, l'emploi de matériels électroniques en constante progression élargit leur champ d'application. C'est le cas pour contrôler le démarrage et l'arrêt avec les démarreurs-ralentisseurs progressifs, comme lorsqu'un réglage précis de la vitesse est également nécessaire avec les variateurs-régulateurs de vitesse.

Toutefois, les moteurs asynchrones à bagues sont utilisés pour certaines applications de forte puissance dans l'industrie et les moteurs asynchrones monophasés restent adaptés pour des applications de puissances limitées plutôt pour les applications du bâtiment.

L'utilisation des moteurs synchrones dits sans balais ou à aimants permanents associés à des convertisseurs se généralise dans les applications nécessitant de fortes performances, notamment en couple dynamique (au démarrage ou aux changements de régime), et en précision et plage de vitesse.

Ce Cahier Technique, après une présentation des divers types de moteurs électriques et de leur principe de fonctionnement, détaille plus particulièrement la technique et les particularités d'emploi des moteurs asynchrones, notamment les principaux dispositifs de démarrage, le réglage de vitesse et le freinage qui leur sont associés. Il est une base de connaissance minimale pour bien comprendre toute la problématique que représente le pilotage et la protection des moteurs.

Ce Cahier Technique aborde brièvement la variation de vitesse des moteurs électriques. Ce sujet est traité spécifiquement dans le Cahier Technique CT 208 « Démarreurs et variateurs de vitesse électroniques ». La protection des moteurs fait l'objet d'un Cahier Technique en cours de rédaction.

Sommaire

1 Les moteurs asynchrones triphasés	1.1 Principe de fonctionnement	p. 4
	1.2 Constitution	p. 6
	1.3 Les différents types de rotor	p. 6
2 Les autres types de moteurs électriques	2.1 Les moteurs asynchrones monophasés	p. 10
	2.2 Les moteurs synchrones	p. 10
	2.3 Moteurs à courant continu	p. 14
3 Exploitation des moteurs asynchrones	3.1 Moteurs à cage	p. 17
	3.2 Moteurs à bagues	p. 19
	3.3 Autres systèmes de variation de vitesse	p. 20
4 Conclusion		p. 22

1 Les moteurs asynchrones triphasés

Ce chapitre est consacré à la présentation des moteurs asynchrones triphasés, moteurs les plus utilisés pour l'entraînement des machines. Ces moteurs s'imposent en effet dans un grand nombre d'applications en raison des avantages qu'ils présentent : normalisés, ils sont robustes, simples d'entretien, faciles à mettre en œuvre et de faible coût.

La présentation des autres types de moteurs fait l'objet du chapitre 2.

La description et la comparaison des principaux dispositifs de démarrage, réglage de vitesse et freinage qui leur sont associés font l'objet du chapitre 3.

1.1 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone repose sur la création d'un courant induit dans un conducteur lorsque celui-ci coupe les lignes de force d'un champ magnétique, d'où le nom de « moteur à induction ». L'action combinée de ce courant induit et du champ magnétique crée une force motrice sur le rotor du moteur.

Supposons une spire ABCD en court-circuit, située dans un champ magnétique B , et mobile autour d'un axe xy (cf. **fig. 1**).

Si, par exemple, nous faisons tourner le champ magnétique dans le sens des aiguilles d'une montre, la spire est soumise à un flux variable et devient le siège d'une force électromotrice induite qui donne naissance à un courant induit i (loi de Faraday).

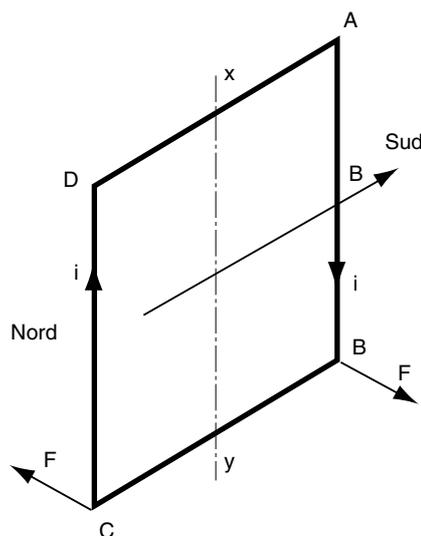


Fig. 1 : Création d'un courant induit dans une spire en court-circuit.

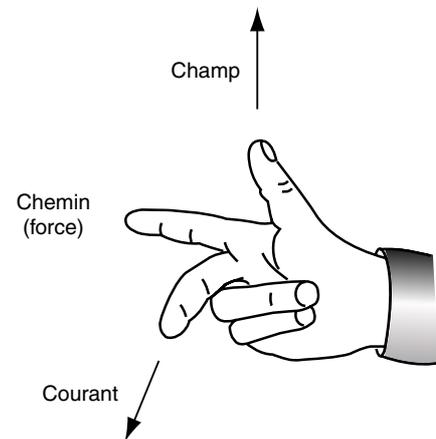


Fig. 2 : La règle des trois doigts de la main droite pour trouver la direction de la force.

D'après la loi de Lenz, le sens du courant est tel qu'il s'oppose par son action électromagnétique à la cause qui lui a donné naissance. Chacun des deux conducteurs est donc soumis à une force F de Laplace (de Lorentz, pour les Anglo-saxons), de sens opposé à son déplacement relatif par rapport au champ inducteur.

La règle des trois doigts de la main droite (action du champ sur un courant, cf. **fig. 2**) permet de définir facilement le sens de la force F appliquée à chaque conducteur.

Le pouce est placé dans le sens du champ de l'inducteur. L'index indique le sens de la force. Le majeur est placé dans le sens du courant induit. La spire est donc soumise à un couple qui provoque sa rotation dans le même sens que le champ inducteur, appelé champ tournant. La spire se met donc en rotation et le couple électromoteur produit équilibre le couple résistant.

Création du champ tournant

Trois enroulements, géométriquement décalés de 120°, sont alimentés chacun par une des phases d'un réseau triphasé alternatif (cf. **fig. 3**). Les enroulements sont parcourus par des courants alternatifs présentant le même décalage électrique, et qui produisent chacun un champ magnétique alternatif sinusoïdal. Ce champ, toujours dirigé suivant le même axe, est maximal quand le courant dans l'enroulement est maximal.

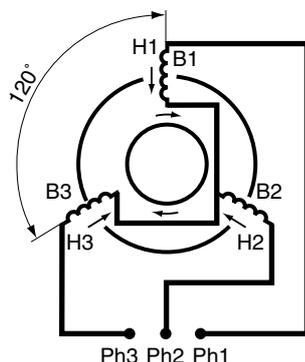


Fig. 3 : Principe d'un moteur asynchrone triphasé.

Le champ généré par chaque enroulement est la résultante de deux champs qui tournent en sens inverse et ayant chacun pour valeur constante la moitié de la valeur du champ maximal. A un instant t1 quelconque de la période (cf. **fig. 4**), les champs produits par chaque enroulement peuvent être représentés comme suit :

- le champ H1 diminue. Les 2 champs qui le composent ont tendance à s'éloigner de l'axe OH1,
- le champ H2 augmente. Les 2 champs qui le composent ont tendance à se rapprocher de l'axe OH2,

□ le champ H3 augmente. Les 2 champs qui le composent ont tendance à se rapprocher de l'axe OH3.

Le flux correspondant à la phase 3 est négatif. Le champ est donc dirigé dans le sens opposé à la bobine.

En superposant les trois diagrammes, nous constatons que :

- les trois champs tournant dans le sens inverse des aiguilles d'une montre sont décalés de 120° et s'annulent,
- les trois champs tournant dans le sens des aiguilles d'une montre se superposent. Ces champs s'additionnent pour former le champ tournant d'amplitude constante $3H_{max}/2$. C'est un champ à une paire de pôles.

Ce champ effectue un tour pendant une période du courant d'alimentation. Sa vitesse est fonction de la fréquence du réseau (f), et du nombre de paires de pôles (p). Elle est appelée « vitesse de synchronisme ».

Glissement

Le couple moteur ne peut exister que si un courant induit circule dans la spire. Ce couple est déterminé par le courant qui circule dans la spire et qui ne peut exister que s'il existe une variation de flux dans cette spire. Il faut donc qu'il y ait une différence de vitesse entre la spire et le champ tournant. C'est la raison pour laquelle un moteur électrique fonctionnant suivant le principe que nous venons de décrire est appelé « moteur asynchrone ». La différence entre la vitesse de synchronisme (N_s) et celle de la spire (N) est appelée « glissement » (g) et s'exprime en % de la vitesse de synchronisme.

$$g = [(N_s - N) / N_s] \times 100$$

En fonctionnement, la fréquence du courant rotorique s'obtient en multipliant la fréquence d'alimentation par le glissement. Au démarrage la fréquence du courant rotorique est donc maximale.

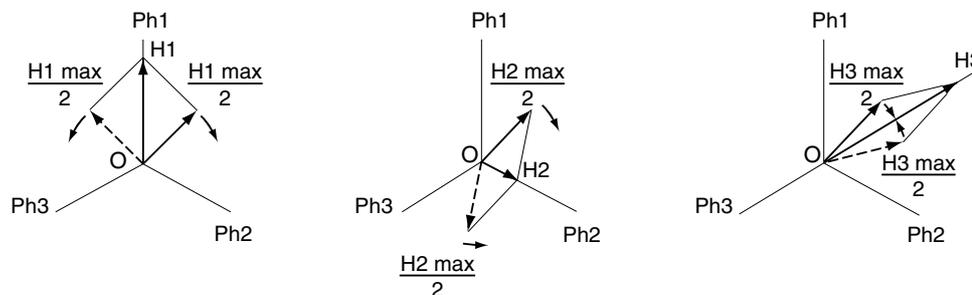


Fig. 4 : Champs générés par les trois phases.

Le glissement en régime établi est variable suivant la charge du moteur et selon le niveau de la tension d'alimentation qui lui est appliqué : il est d'autant plus faible que le moteur est peu chargé, et il augmente si le moteur est sous alimenté.

Vitesse de synchronisme

La vitesse de synchronisme des moteurs asynchrones triphasés est proportionnelle à la fréquence du courant d'alimentation et inversement proportionnelle au nombre de paires de pôles constituant le stator.

Par exemple :

$$N_s = 60 f/p$$

Avec :

□ N_s : vitesse de synchronisme en tr/min

□ f : fréquence en Hz,

□ p : nombre de paires de pôles.

Pour les fréquences industrielles de 50 Hz et 60 Hz et une autre fréquence (100 Hz), les vitesses de rotation du champ tournant, ou vitesses de synchronisme, en fonction du nombre de pôles, sont données dans le tableau de la **figure 5**.

Dans la pratique il n'est pas toujours possible d'augmenter la vitesse d'un moteur asynchrone

en l'alimentant sous une fréquence supérieure à celle pour laquelle il est prévu, même si la tension est adaptée. Il convient en effet de vérifier si ses conceptions mécanique et électrique le permettent.

A noter que compte tenu du glissement, les vitesses de rotation en charge des moteurs asynchrones sont légèrement inférieures aux vitesses de synchronisme indiquées dans le tableau.

Nombre de pôles	Vitesse de rotation en tr/min		
	50 Hz	60 Hz	100 Hz
2	3000	3600	6000
4	1500	1800	3000
6	1000	1200	2000
8	750	900	1500
10	600	720	1200
12	500	600	1000
16	375	540	750

Fig. 5 : Vitesses de synchronisme fonction du nombre de pôles et de la fréquence du courant.

1.2 Constitution

Un moteur asynchrone triphasé à cage comporte deux parties principales : un inducteur ou stator et un induit ou rotor.

Le stator

C'est la partie fixe du moteur. Une carcasse en fonte ou en alliage léger renferme une couronne de tôles minces (de l'ordre de 0,5 mm d'épaisseur) en acier au silicium. Les tôles sont isolées entre elles par oxydation ou par un vernis isolant. Le « feuilletage » du circuit magnétique réduit les pertes par hystérésis et par courants de Foucault.

Les tôles sont munies d'encoches dans lesquelles prennent place les enroulements statoriques destinés à produire le champ tournant (trois enroulements dans le cas d'un

moteur triphasé). Chaque enroulement est constitué de plusieurs bobines. Le mode de couplage de ces bobines entre elles définit le nombre de paires de pôles du moteur, donc la vitesse de rotation.

Le rotor

C'est l'élément mobile du moteur. Comme le circuit magnétique du stator, il est constitué d'un empilage de tôles minces isolées entre elles et formant un cylindre claveté sur l'arbre du moteur. Cet élément, de par sa technologie, permet de distinguer deux familles de moteurs asynchrones : ceux dont le rotor est dit « à cage », et ceux dont le rotor bobiné est dit « à bagues ».

1.3 Les différents types de rotor

Le rotor à cage

Plusieurs types de rotor à cage existent, ils sont tous conçus selon l'exemple de la **figure 6**.

En citant ces moteurs dans l'ordre du moins répandu au plus courant :

■ Rotor à cage résistante

Le rotor résistant existe surtout en simple cage (voir plus loin la définition du moteur simple

cage). La cage est fermée par deux anneaux résistants (alliage particulier, section réduite, anneaux d'incox ...).

Ces moteurs présentent un fort glissement au couple nominal.

Leur couple de démarrage est élevé et le courant de démarrage faible (cf. **fig. 7**).

En raison des pertes dans le rotor, leur rendement est faible.

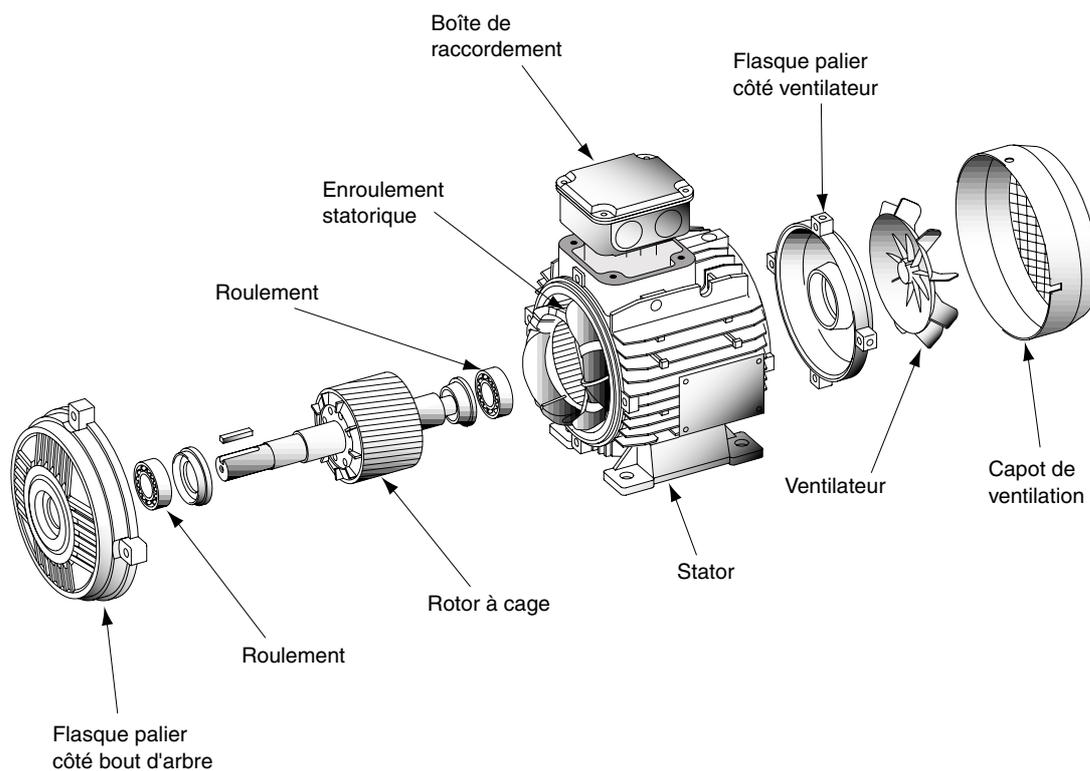


Fig. 6 : Eclaté d'un moteur à rotor à cage.

Ces moteurs sont en principe utilisés sur des applications pour lesquelles il est intéressant d'avoir du glissement afin d'adapter la vitesse en fonction du couple, par exemple :

□ cas de plusieurs moteurs liés mécaniquement sur lesquels doit être répartie la charge, tels que

train à rouleaux d'un laminoir, entraînement d'un portique de levage ;

□ fonction enrouleur-dérouleur à partir de moteurs Alquist ⁽¹⁾ prévus à cet effet ;

□ besoin d'un fort couple de démarrage avec un courant d'appel limité (palans de levage ou convoyeurs).

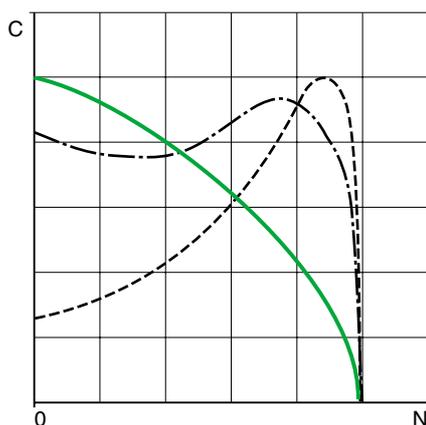


Fig. 7 : Courbes couple/vitesse suivant les types de rotors à cage (à U_n).

Ils permettent la variation de vitesse par modification de la seule tension, mais cette application tend à disparaître au profit des convertisseurs de fréquence. Si tous les moteurs sont auto-ventilés, certains moteurs avec rotor à cage résistante sont moto-ventilés (motorisation distincte de leur ventilateur).

■ Rotor à simple cage

Dans des trous ou dans des encoches disposés sur le pourtour du rotor (à l'extérieur du cylindre constitué par l'empilage de tôles) sont placés des conducteurs reliés à chaque extrémité par une couronne métallique et sur lesquels vient s'exercer le couple moteur généré par le champ tournant. Pour que le couple soit régulier, les

1. Ces moteurs asynchrones moto-ventilés à fort glissement sont utilisés en variation de vitesse, leur courant au calage est voisin de leur courant nominal ; leur caractéristique de couple/vitesse est très plongeante. Avec une alimentation variable il est possible d'adapter cette caractéristique et de régler le couple moteur en fonction de la traction souhaitée.

conducteurs sont légèrement inclinés par rapport à l'axe du moteur. L'ensemble a l'aspect d'une cage d'écureuil, d'où le nom de ce type de rotor. La cage d'écureuil est généralement entièrement moulée, (seuls les très gros moteurs sont réalisés à l'aide de conducteurs insérés dans des encoches). L'aluminium est injecté sous pression et les ailettes de refroidissement, coulées lors de la même opération, assurent la mise en court-circuit des conducteurs du stator.

Ces moteurs ont un couple de démarrage relativement faible et le courant absorbé lors de la mise sous tension est très supérieur au courant nominal (cf. fig. 7).

En contre partie ils ont un faible glissement au couple nominal.

Ces moteurs sont utilisés principalement en forte puissance pour améliorer le rendement des installations sur des pompes et ventilateurs. Ils sont également associés à des convertisseurs de fréquence en vitesse variable, les problèmes de couple et de courant de démarrage sont alors parfaitement résolus.

■ Rotor à double cage

Il comporte deux cages concentriques, l'une extérieure, de faible section et assez résistante, l'autre intérieure, de forte section et de résistance plus faible.

□ Au début du démarrage, les courants rotoriques étant à fréquence élevée, l'effet de peau qui en résulte fait que la totalité du courant rotorique circule à la périphérie du rotor et donc dans une section réduite des conducteurs. Au début du démarrage, le courant rotorique étant de fréquence élevée, le courant ne circule que dans la cage extérieure. Le couple produit par la cage extérieure résistante est important et l'appel de courant réduit (cf. fig. 7).

□ En fin de démarrage, la fréquence diminue dans le rotor, le passage du flux à travers la cage intérieure est plus facile. Le moteur se comporte alors sensiblement comme s'il était construit avec une seule cage peu résistante. En régime établi, la vitesse n'est que très légèrement inférieure à celle du moteur à simple cage.

■ Rotor à encoches profondes

C'est la réalisation standard.

Les conducteurs rotoriques sont moulés dans les encoches du rotor qui sont de forme trapézoïdale dont le petit coté du trapèze se situe à l'extérieur du rotor.

Le fonctionnement est analogue au moteur à double cage : l'intensité du courant rotorique varie en fonction inverse de sa fréquence.

Ainsi :

□ Au début du démarrage, le couple est élevé et l'appel de courant réduit.

□ En régime établi, la vitesse est sensiblement celle du moteur à simple cage.

Le rotor bobiné (rotor à bagues)

Dans des encoches pratiquées à la périphérie du rotor sont logés des enroulements identiques à ceux du stator (cf. fig. 8). Généralement le rotor est triphasé.

Une extrémité de chacun des enroulements est reliée à un point commun (couplage étoile). Les extrémités libres peuvent être raccordées sur un coupleur centrifuge ou sur trois bagues en cuivre, isolées et solidaires du rotor. Sur ces bagues viennent frotter des balais à base de graphite raccordés au dispositif de démarrage.

En fonction de la valeur des résistances insérées dans le circuit rotorique, ce type de moteur peut développer un couple de démarrage s'élevant jusqu'à 2,5 fois le couple nominal.

Le courant au démarrage est sensiblement proportionnel au couple développé sur l'arbre moteur.

Cette solution est de plus en plus abandonnée au profit de solutions électroniques associées à un moteur à cage standard. En effet ces dernières permettent de résoudre des problèmes de maintenance (remplacement des balais d'alimentation du rotor usés, entretien des résistances de réglage), de réduire l'énergie dissipée dans ces résistances et aussi d'améliorer de façon importante le rendement de l'installation.

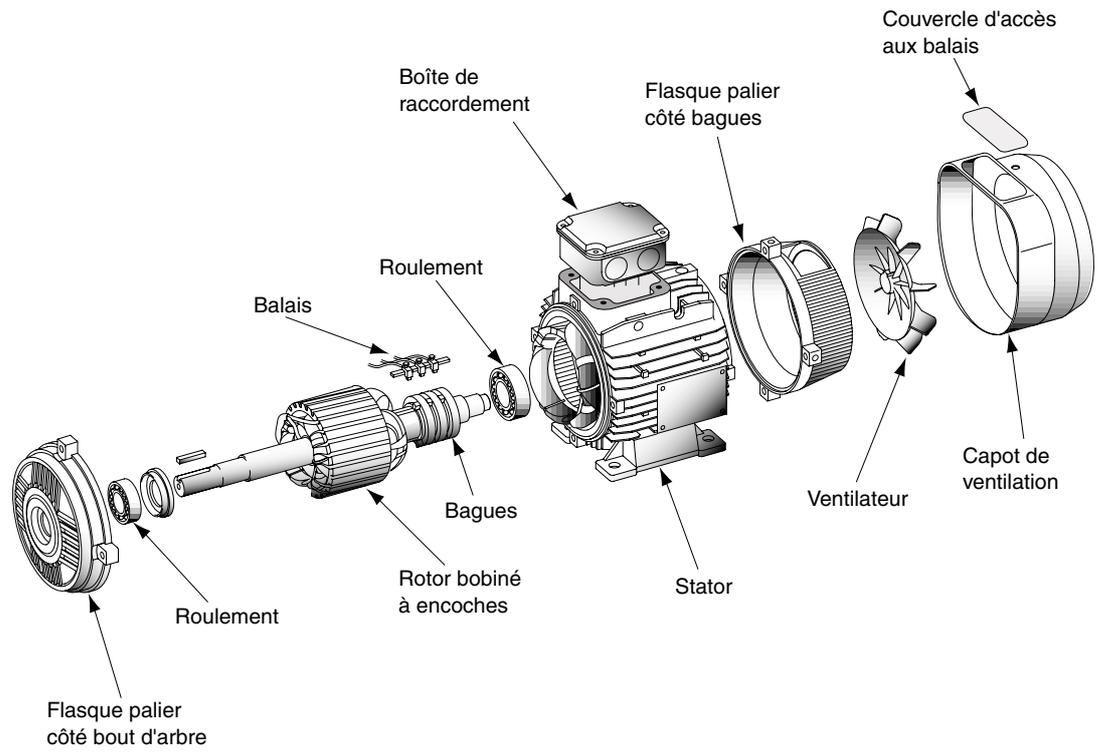


Fig. 8 : Eclaté d'un moteur à rotor à bagues.

2 Les autres types de moteurs électriques

2.1 Les moteurs asynchrones monophasés

Le moteur asynchrone monophasé, bien que moins utilisé dans l'industrie que son homologue triphasé, représente néanmoins une part d'applications non négligeable dans les petites puissances et dans les applications du bâtiment qui utilisent le réseau monophasé 230 V.

A puissance égale, il est plus volumineux qu'un moteur triphasé.

Par ailleurs, son rendement et son cosinus φ sont beaucoup plus faibles que dans le cas du triphasé et ils varient considérablement en fonction d'une part de la puissance, d'autre part du constructeur.

Les moteurs monophasés jusqu'à une dizaine de kW sont d'utilisation courante aux Etats Unis.

Constitution

Le moteur monophasé, comme le moteur triphasé, est composé de deux parties : le stator et le rotor.

■ Le stator

Il comporte un nombre pair de pôles et ses bobinages sont raccordés sur le réseau d'alimentation.

■ Le rotor

Il est le plus souvent à cage d'écurieil.

Principe de fonctionnement

Considérons un stator comprenant deux enroulements raccordés sur le réseau d'alimentation L1 et N (cf. **fig. 9**).

Le courant alternatif monophasé engendre dans le rotor un champ alternatif simple H qui est la superposition de deux champs tournants H1 et H2 de même valeur et de sens contraires.

A l'arrêt, le stator étant alimenté, ces champs présentent le même glissement par rapport au rotor et produisent par conséquent deux couples égaux et opposés. Le moteur ne peut démarrer. Une impulsion mécanique sur le rotor provoque une inégalité des glissements. L'un des couples diminue pendant que l'autre augmente. Le couple résultant provoque le démarrage du moteur dans le sens où il a été lancé.

Afin de résoudre ce problème de couple lors de la phase de démarrage, un deuxième bobinage décalé de 90° est inséré dans le stator. Cette phase auxiliaire est alimentée par un artifice de déphasage (condensateur ou inductance) ; une fois le démarrage effectué la phase auxiliaire peut être supprimée.

Nota : Un moteur triphasé peut être également utilisé en monophasé, le condensateur de démarrage est alors inséré en série ou en parallèle avec l'enroulement non utilisé.

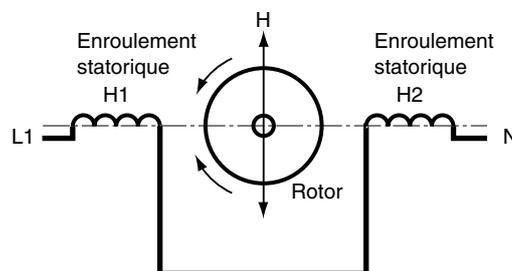


Fig. 9 : Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone monophasé.

2.2. Les moteurs synchrones

Constitution

Le moteur synchrone se compose, comme le moteur asynchrone, d'un stator et d'un rotor séparés par l'entrefer. Il s'en différencie par le fait que le flux dans l'entrefer n'est pas dû à une composante du courant statorique : il est créé par des aimants ou par le courant inducteur fourni par une source à courant continu extérieure qui alimente un enroulement placé dans le rotor.

■ Le stator

Le stator comprend une carcasse et un circuit magnétique généralement constitués de tôles

d'acier au silicium et d'un bobinage triphasé analogue à celui d'un moteur asynchrone alimenté en courant alternatif triphasé pour produire un champ tournant.

■ Le rotor

Le rotor porte des aimants ou des bobines d'excitation parcourues par un courant continu qui créent des pôles Nord et Sud intercalés. Le rotor, à la différence des machines asynchrones tourne sans glissement à la vitesse du champ tournant.

Il existe donc deux types distincts de moteurs synchrones : les moteurs à aimants et les moteurs à rotor bobiné.

□ Pour les premiers, le rotor du moteur est équipé d'aimants permanents (cf. **fig. 10**), en général en terre rare pour obtenir un champ élevé dans un volume réduit. Le stator comporte les enroulements triphasés.

Ces moteurs peuvent accepter des courants de surcharge importants pour réaliser des accélérations très rapides. Ils sont toujours associés à un variateur de vitesse et ces ensembles moto-variateurs sont destinés à des marchés spécifiques comme ceux des robots ou des machines-outils pour lesquels un moindre volume des moteurs, les accélérations et la bande passante sont des impératifs.

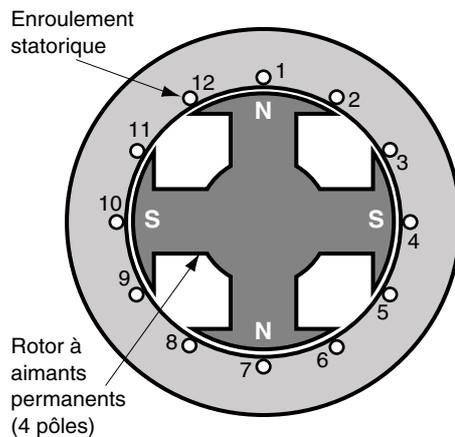


Fig. 10 : Coupe d'un moteur à aimants permanents.

□ Les autres machines synchrones sont à rotor bobiné, elles sont réversibles et peuvent fonctionner en générateurs (alternateurs) ou en moteurs. Pendant longtemps ces machines ont surtout été utilisées en alternateurs. Leur usage en moteur était pratiquement confiné aux applications où il était nécessaire d'entraîner des charges à vitesse fixe en dépit des variations relativement importantes de leur couple résistant.

Le développement des convertisseurs de fréquence directs (du type cycloconvertisseur) ou indirects fonctionnant en commutation naturelle grâce à l'aptitude des machines synchrones à fournir de la puissance réactive, a permis la réalisation d'entraînements électriques à vitesse variable performants, fiables et particulièrement compétitifs par rapport aux solutions concurrentes lorsque la puissance dépasse le mégawatt.

Bien que l'on puisse trouver des moteurs synchrones utilisés industriellement dans la gamme de puissance de 150 kW à 5 MW, c'est au-delà de 5 MW que les entraînements électriques utilisant des moteurs synchrones se sont pratiquement imposés, majoritairement associés à des variateurs de vitesse.

Caractéristiques de fonctionnement

Le couple moteur de la machine synchrone est proportionnel à la tension à ses bornes alors que celui de la machine asynchrone est proportionnel au carré de cette tension.

Contrairement au moteur asynchrone, il peut travailler avec un facteur de puissance égal à l'unité ou très voisin de celle-ci.

Le moteur synchrone, par rapport au moteur asynchrone, bénéficie donc d'un certain nombre de particularités avantageuses en ce qui concerne son alimentation par le réseau à tension et fréquence constantes :

- la vitesse du moteur est constante, quelle que soit la charge ;
- il peut fournir de la puissance réactive et permettre d'améliorer le facteur de puissance d'une installation,
- il peut supporter sans décrocher des chutes de tension relativement importantes (de l'ordre de 50 % en raison de ses possibilités de surexcitation).

Toutefois, le moteur synchrone alimenté directement par le réseau de distribution d'énergie à tension et fréquence constantes présente deux inconvénients :

- il a des difficultés de démarrage ; de fait, si le moteur n'est pas associé à un variateur de vitesse, le démarrage doit s'effectuer à vide, soit par démarrage direct pour les petits moteurs, soit à l'aide d'un moteur de lancement qui l'entraîne à une vitesse proche du synchronisme avant le couplage direct sur le réseau,
- il peut décrocher si le couple résistant dépasse son couple électromagnétique maximal et, dans ce cas, il faut reprendre tout le processus de démarrage.

Autres types de moteurs synchrones

Pour terminer le tour d'horizon des moteurs industriels citons les moteurs linéaires, les moteurs asynchrones synchronisés et les moteurs pas à pas.

■ Les moteurs linéaires

Leur structure est identique à celle des moteurs rotatifs de type synchrone : ils sont composés d'un stator (plateau) et d'un rotor (tige d'avance) développés en ligne. En général le plateau se déplace sur une glissière le long de la tige d'avance.

Ce type de moteur s'affranchit de toute cinématique intermédiaire pour la transformation du mouvement d'où l'absence de jeu et d'usure mécanique de cet entraînement.

■ Les moteurs asynchrones synchronisés

Ce sont des moteurs à induction. Lors de la phase de démarrage, le moteur fonctionne en mode asynchrone et lorsqu'il a atteint une vitesse proche du synchronisme, il passe en mode synchrone.

Si sa charge mécanique est importante, il ne peut plus tourner en mode synchrone et repasse en mode asynchrone.

Cette particularité est obtenue par une construction spéciale du rotor et en général pour des moteurs de faible puissance.

■ Les moteurs pas à pas

Le moteur pas à pas est un moteur qui tourne en fonction des impulsions électriques alimentant ses bobinages. Selon son alimentation électrique, il peut être de type :

- unipolaire si ses bobinages sont toujours alimentés dans le même sens par une tension unique, d'où le nom d'unipolaire ;
- bipolaire lorsque ses bobinages sont alimentés tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre sens. Ils créent une fois un pôle Nord, une fois un pôle Sud d'où le nom de bipolaire.

Les moteurs pas à pas peuvent être à réluctance variable, à aimants ou une combinaison des deux (cf. **fig. 11**).

L'angle de rotation minimal entre deux modifications des impulsions électriques s'appelle un pas. On caractérise un moteur par

le nombre de pas par tour (c'est-à-dire pour 360°). Les valeurs courantes sont 48, 100 ou 200 pas par tour.

La rotation du moteur se fait donc de manière discontinue. Pour améliorer la résolution, ce nombre de pas peut être augmenté de manière purement électronique (fonctionnement en micropas).

En faisant varier par échelon le courant (cf. **fig. 12**) dans les bobines, on crée un champ résultant qui glisse d'un pas à un autre, ce qui a pour résultat la réduction effective du pas. Les circuits pour micropas multiplient par 500 le nombre de pas d'un moteur qui passe ainsi, par exemple, de 200 à 100 000 pas.

L'électronique permet de piloter la chronologie de ces impulsions et d'en comptabiliser le nombre. Les moteurs pas à pas et leur circuit de commande permettent ainsi la rotation d'un axe avec beaucoup de précision en vitesse et en amplitude.

Leur fonctionnement s'apparente donc à celui d'un moteur synchrone quand l'arbre est en rotation continue, ce qui correspond à des

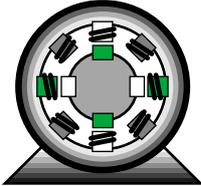
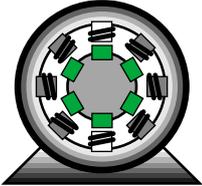
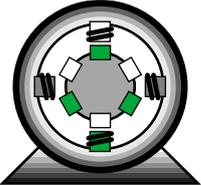
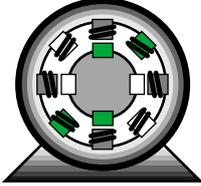
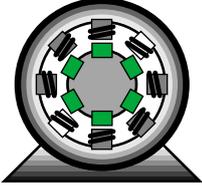
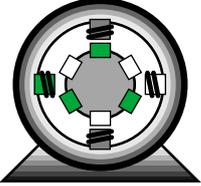
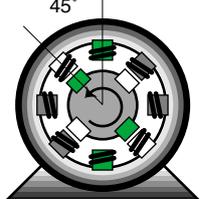
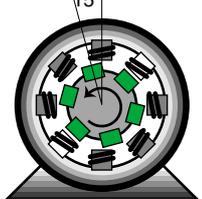
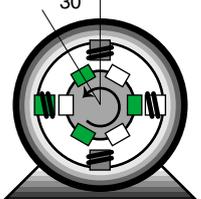
Type	Bipolaire à aimant permanent	Unipolaire à réluctance variable	Bipolaire hybride
Caractéristiques	2 phases, 4 fils	4 phases, 8 fils	2 phases, 4 fils
Nombre pas/tour	8	24	12
Etapes de Fonctionnement			
Pas 1			
Etat intermédiaire			
Pas 2			

Fig. 11 : Les trois types de moteur pas à pas.

limites spécifiées de fréquence, de couple et d'inertie de la charge entraînée (cf. **fig. 13**). Si ces limites sont dépassées, le moteur décroche ce qui se traduit par l'arrêt du moteur.

Un positionnement angulaire précis est possible sans boucle de mesure. Ces moteurs de puissance en général en dessous du kW, sont, pour les petits modèles alimentés en basse tension. Industriellement, ces moteurs sont utilisés pour des applications de positionnement telles que réglage de butées pour coupe à

longueur, commande de vannes, de dispositifs optiques ou de mesure, chargement déchargement de presses ou de machines outils etc.

La simplicité de cette solution la rend particulièrement économique (pas de boucle de retour). Les moteurs pas à pas à aimants présentent également l'avantage d'un couple à l'arrêt en l'absence d'alimentation. Par contre, la position initiale du mobile doit être connue et prise en compte par l'électronique afin d'assurer un pilotage efficace.

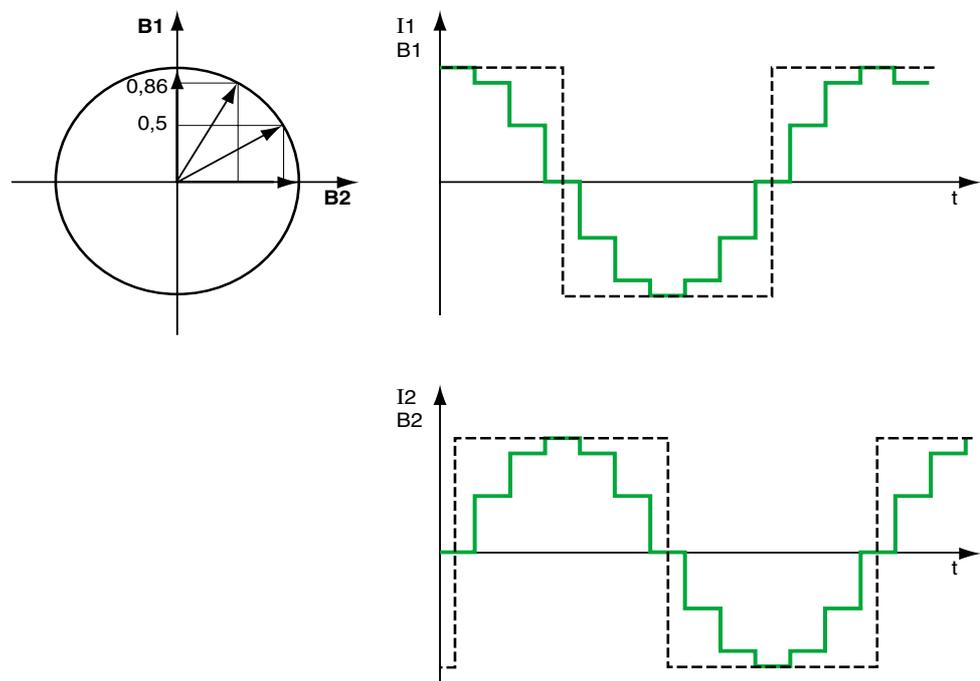


Fig. 12 : Echelons de courant appliqués aux bobines d'un moteur pas à pas pour réduire son pas.

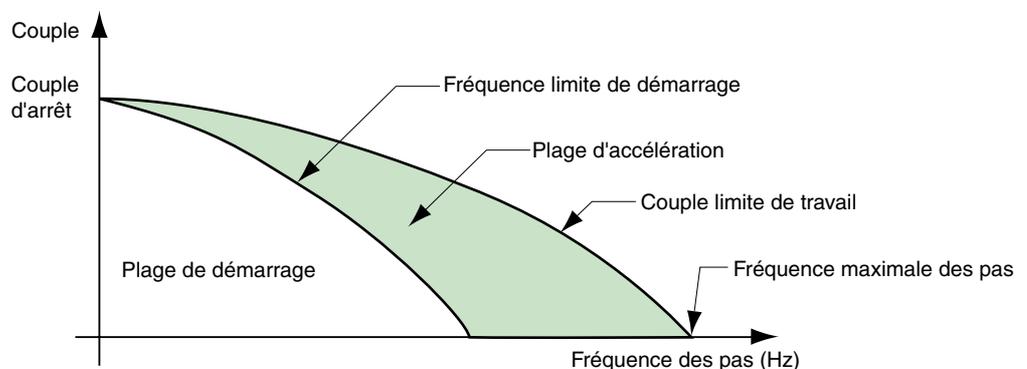


Fig. 13 : Couple maximal en fonction de la fréquence du pas.

2.3 Moteurs à courant continu

Les moteurs à courant continu à excitation séparée sont encore quelquefois utilisés pour l'entraînement à vitesse variable des machines. Très faciles à miniaturiser, ils s'imposent dans les très faibles puissances et les faibles tensions. Ils se prêtent également fort bien, jusqu'à des puissances importantes (plusieurs mégawatts), à la variation de vitesse avec des technologies électroniques simples et peu onéreuses pour des performances élevées (plage de variation couramment exploitée de 1 à 100).

Leurs caractéristiques permettent également une régulation précise du couple, en moteur ou en générateur. Leur vitesse de rotation nominale, indépendante de la fréquence du réseau, est aisément adaptable par construction à toutes les applications.

Ils sont en revanche moins robustes que les moteurs asynchrones et beaucoup plus chers, tant en coût matériel qu'en maintenance, car ils nécessitent un entretien régulier du collecteur et des balais.

Constitution

Un moteur à courant continu est composé des éléments suivants :

■ L'inducteur ou stator

C'est un élément du circuit magnétique immobile sur lequel un enroulement est bobiné afin de produire un champ magnétique. L'électro-aimant ainsi réalisé comporte une cavité cylindrique entre ses pôles.

■ L'induit ou rotor

C'est un cylindre en tôles magnétiques isolées entre elles et perpendiculaires à l'axe du cylindre. L'induit est mobile en rotation autour de son axe et est séparé de l'inducteur par un entrefer. A sa périphérie, des conducteurs sont régulièrement répartis.

■ Le collecteur et les balais

Le collecteur est solidaire de l'induit.

Les balais sont fixes, ils frottent sur le collecteur et ainsi alimentent les conducteurs de l'induit.

Principe de fonctionnement

Lorsque l'inducteur est alimenté, il crée un champ magnétique (flux d'excitation) dans l'entrefer, dirigé suivant les rayons de l'induit. Ce champ magnétique « rentre » dans l'induit du côté du pôle Nord de l'inducteur et « sort » de l'induit du côté du pôle Sud de l'inducteur.

Quand l'induit est alimenté, ses conducteurs situés sous un même pôle inducteur (d'un même côté des balais) sont parcourus par des courants de même sens et sont donc, d'après la loi de Laplace, soumis à une force. Les conducteurs situés sous l'autre pôle sont soumis à une force

de même intensité et de sens opposé. Les deux forces créent un couple qui fait tourner l'induit du moteur (cf. **fig. 14**).

Lorsque l'induit du moteur est alimenté sous une tension continue ou redressée U , il produit une force contre-électromotrice E dont la valeur est $E = U - RI$

RI représente la chute de tension ohmique dans l'induit.

La force contre-électromotrice E est liée à la vitesse et à l'excitation par la relation $E = k \omega \Phi$ dans laquelle :

- k est une constante propre au moteur,
- ω , la vitesse angulaire,
- Φ , le flux.

Cette relation montre qu'à excitation constante la force contre-électromotrice E , proportionnelle à ω , est une image de la vitesse.

Le couple est lié au flux inducteur et au courant dans l'induit par la relation :

$$C = k \Phi I$$

En réduisant le flux, le couple diminue.

Deux méthodes permettent de faire croître la vitesse.

■ Soit augmenter la force contre-électromotrice E , donc la tension d'alimentation à excitation constante : c'est le fonctionnement dit « à couple constant » ;

■ Soit diminuer le flux d'excitation, donc le courant d'excitation, en maintenant la tension d'alimentation constante : c'est le fonctionnement dit en régime « défluxé » ou « à puissance constante ». Ce fonctionnement impose que le couple soit décroissant avec l'augmentation de vitesse (cf. **fig. 15**). D'autre part, pour des rapports élevés de défluxage ce fonctionnement nécessite des moteurs

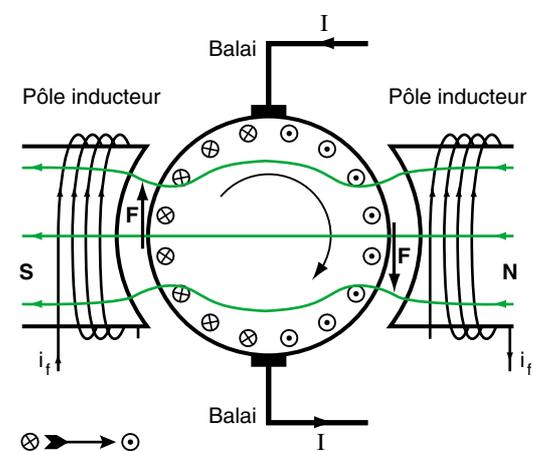


Fig. 14 : Production d'un couple dans un moteur à courant continu.

spécialement adaptés (mécaniquement et électriquement) pour s'affranchir des problèmes de commutation.

Le fonctionnement d'un tel appareil (moteur à courant continu) est réversible :

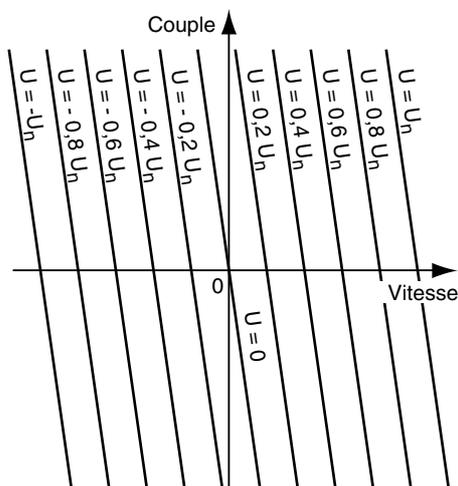
- si la charge s'oppose au mouvement de rotation (charge dite résistante), l'appareil fournit un couple et fonctionne en moteur,
- si la charge est telle qu'elle tend à faire tourner l'appareil (charge dite entraînante) ou qu'elle s'oppose au ralentissement (phase d'arrêt d'une charge présentant une certaine inertie), l'appareil fournit de l'énergie électrique et fonctionne en génératrice.

Différents types de moteurs à courant continu (cf. fig. 16)

■ A excitation parallèle (séparée ou shunt)
 Les bobinages, induit et inducteur, sont connectés en parallèle ou alimentés par deux sources de tensions différentes pour des questions d'adaptation aux caractéristiques de la machine (ex. : tension d'induit 400 volts et tension d'inducteur 180 volts).

L'inversion du sens de rotation s'obtient par l'inversion de l'un ou de l'autre des enroulements, en général par inversion de la tension d'induit en raison des constantes de temps beaucoup plus réduites. La majorité des

a : à couple constant



b : à puissance constante

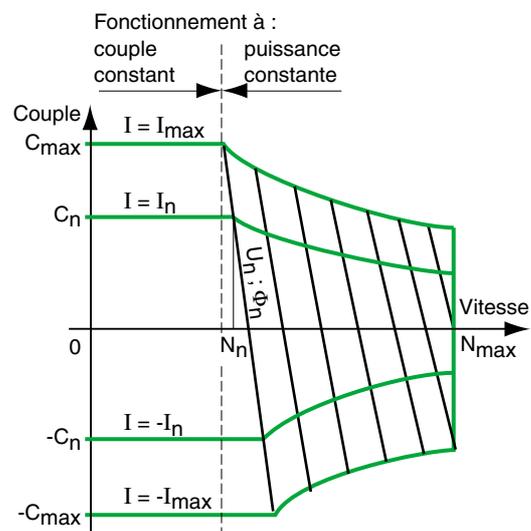
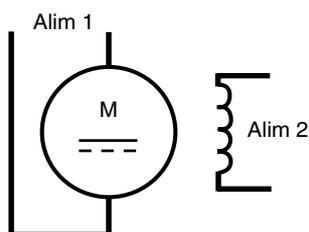
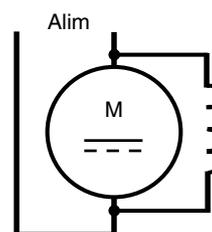


Fig. 15 : Courbes couple/vitesse d'un moteur à excitation séparée.

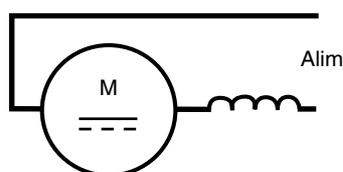
a : Moteur à excitation séparée



c : Moteur à excitation shunt



b : Moteur à excitation série



d : Moteur à excitation composée

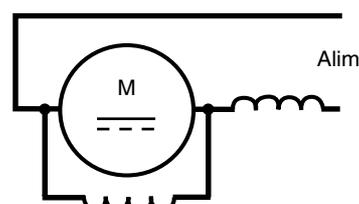


Fig. 16 : Schémas des différents types de moteurs à courant continu.

variateurs bidirectionnels pour moteur à courant continu travaillent de la sorte.

■ A excitation série

Ce moteur est de construction semblable à celle du moteur à excitation séparée. Le bobinage inducteur est connecté en série avec le bobinage induit, d'où son appellation.

L'inversion du sens de rotation est obtenue indifféremment par inversion des polarités de l'induit ou de l'inducteur. Ce moteur est essentiellement utilisé en traction, en particulier sur les chariots alimentés par batteries d'accumulateurs. En traction ferroviaire les anciennes motrices du TGV utilisaient ce type de moteur, les plus récentes utilisent des moteurs asynchrones.

■ A excitation série parallèle (composée ou « compound »)

Cette technologie permet de réunir les qualités du moteur à excitation série et du moteur à excitation parallèle.

Ce moteur comporte deux enroulements par pôle inducteur. L'un est en parallèle avec l'induit. Il est parcouru par un faible courant au regard du courant de travail. L'autre est en série.

Le moteur est à flux additif si les ampères-tours des deux enroulements ajoutent leurs effets. Il est à flux soustractif dans le cas contraire, mais ce mode de montage est très rarement utilisé car il conduit à un fonctionnement instable pour les fortes charges.

3 Exploitation des moteurs asynchrones

3.1 Moteurs à cage

Conséquences d'une variation de tension

■ Effet sur le courant de démarrage

Le courant de démarrage varie avec la tension d'alimentation. Si celle-ci est plus élevée pendant la phase de démarrage, le courant absorbé à l'instant de la mise sous tension augmente. Cette augmentation de courant est aggravée par la saturation de la machine.

■ Effet sur la vitesse

Lors des variations de tension, la vitesse de synchronisme n'est pas modifiée, mais sur un moteur en charge, une augmentation de la tension entraîne une légère diminution du glissement. Concrètement, cette propriété est inexploitable car en raison de la saturation du circuit magnétique du stator, le courant absorbé augmente fortement et un échauffement anormal de la machine est à craindre même sur un fonctionnement à faible charge. En revanche, si la tension d'alimentation décroît le glissement augmente et, pour fournir le couple le courant absorbé augmente, avec le risque d'échauffement qui en résulte. D'autre part, comme le couple maximum décroît comme le carré de la tension, un décrochage est possible en cas de diminution importante de tension.

Conséquences d'une variation de fréquence

■ Effet sur le couple

Comme dans toute machine électrique, le couple du moteur asynchrone est de la forme

$$C = K I \Phi$$

(K = coefficient constant dépendant de la machine)

Dans le schéma équivalent de la **figure 17**, le bobinage L est celui qui produit le flux et I_0 est le courant magnétisant.

En première approximation, en négligeant la résistance devant l'inductance magnétisante (c'est-à-dire pour des fréquences de quelques Hertz) le courant I_0 a pour expression :

$$I_0 = U / 2\pi L f$$

et le flux aura pour expression :

$$\Phi = k I_0$$

Le couple de la machine a donc pour expression :

$$C = K k I_0 I$$

I_0 et I sont les courants nominaux pour lesquels le moteur est dimensionné.

Pour ne pas dépasser les limites il faut maintenir I_0 à sa valeur nominale, ce qui ne peut s'obtenir que si le rapport U/f reste constant.

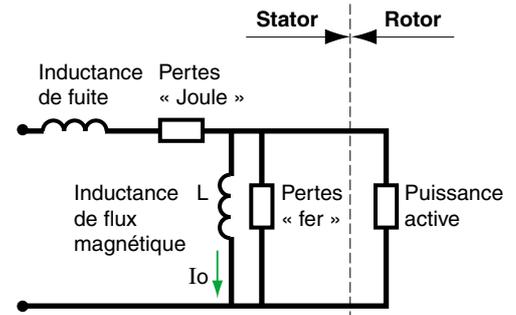


Fig. 17 : Schéma équivalent d'un moteur asynchrone.

Par conséquent, il est possible d'obtenir le couple et les courants nominaux tant que la tension d'alimentation U peut être ajustée en fonction de la fréquence.

Quand cet ajustement n'est plus possible, la fréquence peut toujours être augmentée, mais le courant I_0 diminue et le couple utile également car il n'est pas possible de dépasser de manière continue le courant nominal de la machine sans risque d'échauffement.

Pour obtenir un fonctionnement à couple constant quelle que soit la vitesse il faut maintenir le ratio U/f constant... ce que réalise un convertisseur de fréquence.

■ Effet sur la vitesse

La vitesse de rotation d'un moteur asynchrone est proportionnelle à la fréquence de la tension d'alimentation. Cette propriété est souvent utilisée pour faire fonctionner à très grande vitesse des moteurs spécialement conçus, par exemple avec une alimentation en 400 Hz (rectifieuses, appareils de laboratoire ou chirurgicaux, etc.) Il est aussi possible d'obtenir une vitesse variable par réglage de la fréquence, par exemple de 6 à 50 Hz (rouleaux transporteurs, appareils de levage, etc.).

Réglage de vitesse des moteurs asynchrones triphasés

(sujet détaillé dans le Cahier Technique n° 208)

Pendant longtemps, les possibilités de réglage de la vitesse des moteurs asynchrones ont été des plus réduites. Les moteurs à cage étaient la plupart du temps utilisés à leur vitesse nominale. Pratiquement seuls les moteurs à couplage de pôles ou à enroulements statoriques séparés,

encore fréquemment utilisés de nos jours, permettaient de disposer de plusieurs vitesses fixes.

Avec les convertisseurs de fréquence, les moteurs à cage sont aujourd'hui couramment commandés en vitesse variable, et peuvent ainsi être employés dans des applications jusqu'alors réservées aux moteurs à courant continu.

Moteurs à couplage de pôles

Comme nous l'avons vu précédemment, la vitesse d'un moteur à cage est fonction de la fréquence du réseau d'alimentation et du nombre de paires de pôles. Il est donc possible d'obtenir un moteur à deux ou plusieurs vitesses en créant dans le stator des combinaisons de bobinages qui correspondent à des nombres de pôles différents.

Ce type de moteur ne permet que des rapports de vitesses de 1 à 2 (4 et 8 pôles, 6 et 12 pôles, etc.). Il comporte six bornes (cf. **fig. 18**).

Pour l'une des vitesses, le réseau est connecté sur les trois bornes correspondantes. Pour la seconde, celles-ci sont reliées entre elles, le réseau étant branché sur les trois autres bornes.

Le plus souvent, aussi bien en grande qu'en petite vitesse, le démarrage s'effectue par couplage au réseau sans dispositif particulier (démarrage direct).

Dans certains cas, si les conditions d'exploitation l'exigent et si le moteur le permet, le dispositif de

démarrage réalise automatiquement le passage en petite vitesse avant d'enclencher la grande vitesse ou avant l'arrêt.

Suivant les courants absorbés lors des couplages Petite Vitesse -PV- ou Grande Vitesse -GV-, la protection peut être réalisée par un même relais thermique pour les deux vitesses ou par deux relais (un pour chaque vitesse).

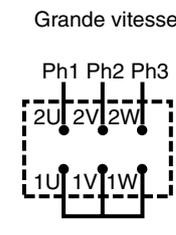
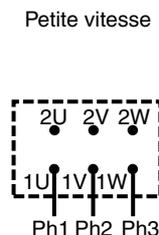
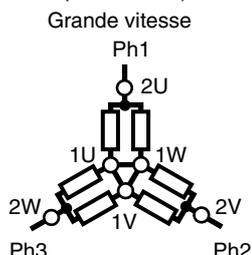
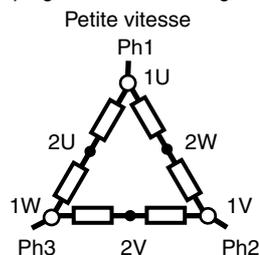
Généralement, ces moteurs ont un rendement peu élevé et un facteur de puissance assez faible.

Moteurs à enroulements statoriques séparés

Ce type de moteurs, comportant deux enroulements statoriques électriquement indépendants, permet d'obtenir deux vitesses dans un rapport quelconque. Cependant leurs caractéristiques électriques sont souvent affectées par le fait que les enroulements PV doivent supporter les contraintes mécaniques et électriques résultant du fonctionnement du moteur en GV. Ainsi, de tels moteurs fonctionnant en PV absorbent parfois un courant plus important qu'en GV.

Il est également possible de réaliser des moteurs à trois ou quatre vitesses en procédant au couplage des pôles sur l'un des enroulements statoriques ou sur les deux. Cette solution exige des prises supplémentaires sur les bobinages.

Couplage Dahlander triangle/étoile (pour couple constant)



Couplage Dahlander étoile/étoile-étoile (pour couple quadratique)

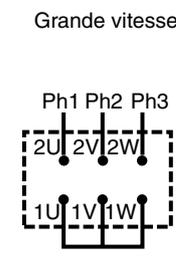
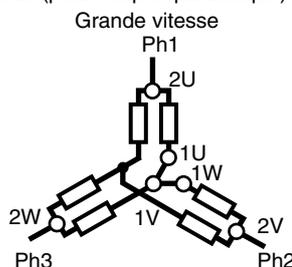
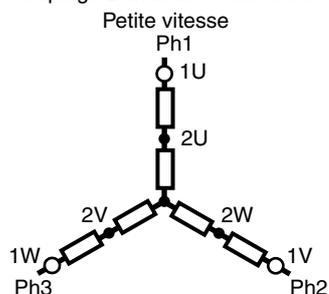


Fig. 18 : Différents types de couplage Dahlander.

3.2 Moteurs à bagues

Utilisation de la résistance rotorique

La résistance rotorique pour ce type de moteur permet de définir :

- son couple de démarrage (cf. chap. 1),
- et sa vitesse.

En effet, le raccordement d'une résistance permanente aux bornes du rotor d'un moteur à bagues abaisse sa vitesse, et cela d'autant plus que la résistance est de valeur élevée. C'est une solution simple pour faire varier la vitesse.

Réglage de vitesse par glissement

Ces résistances rotoriques ou « de glissement » peuvent être court-circuitées en plusieurs crans pour obtenir soit un réglage discontinu de la vitesse, soit l'accélération progressive et le démarrage complet du moteur. Elles doivent supporter la durée du fonctionnement, surtout quand elles sont prévues pour faire varier la vitesse. De ce fait, leur volume est parfois important et leur coût élevé.

Ce procédé extrêmement simple est de moins en moins employé car il présente deux inconvénients importants :

- pendant la marche à vitesse réduite, une grande partie de l'énergie prise au réseau est dissipée en pure perte dans les résistances,
- la vitesse obtenue n'est pas indépendante de la charge, mais varie avec le couple résistant

appliqué par la machine sur l'arbre du moteur (cf. **fig. 19**). Pour une résistance donnée, le glissement est proportionnel au couple. Ainsi par exemple, la baisse de vitesse obtenue par une résistance peut être de 50 % à pleine charge et 25 % seulement à demi-charge, alors que la vitesse à vide reste pratiquement inchangée.

Si un conducteur surveille en permanence la machine, il peut, en modifiant à la demande la valeur de la résistance, fixer la vitesse dans une certaine zone pour les couples relativement importants, mais tout réglage est pratiquement impossible pour les faibles couples. En effet, si pour obtenir un point « faible vitesse à faible couple », il insère une très forte résistance, la moindre variation du couple résistant fait passer la vitesse de zéro à près de 100 %. La caractéristique est trop instable.

Pour des machines à variation particulière du couple résistant en fonction de la vitesse, le réglage peut s'avérer également impossible. Exemple de fonctionnement en glissement. Pour une machine qui applique au moteur un couple résistant de 0,8 Cn, il peut être obtenu des vitesses différentes représentées par le signe ● sur le diagramme de la **figure 19**.

A couple égal, la vitesse diminue lorsque la résistance rotorique augmente.

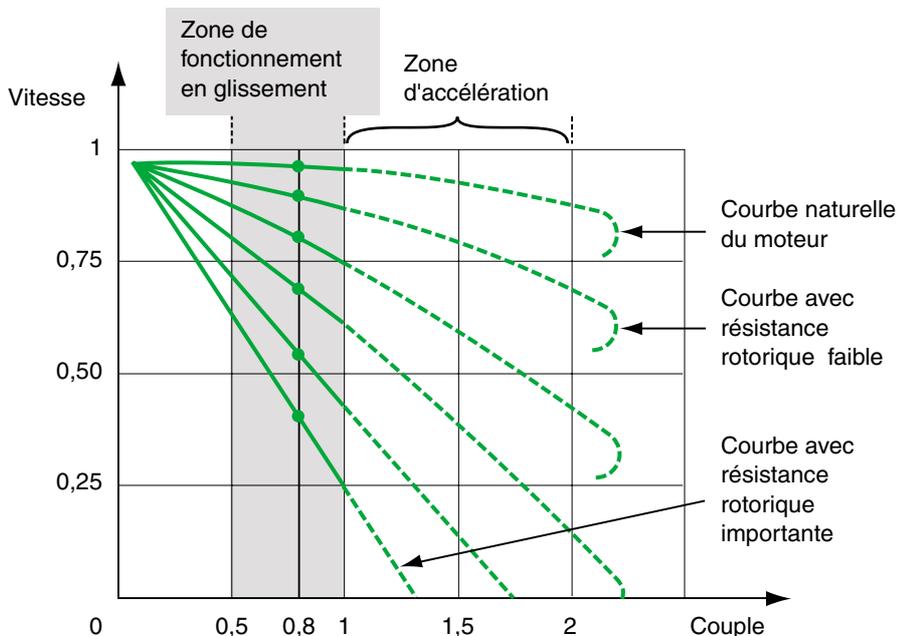


Fig. 19 : Courbe vitesse/couple avec résistance « de glissement ».

3.3 Autres systèmes de variation de vitesse

Le variateur de tension

Ce dispositif n'est utilisé que pour des moteurs asynchrones de petite puissance. Il nécessite un moteur à cage résistante.

La variation de vitesse s'obtient en augmentant le glissement du moteur consécutif à la diminution de tension.

Son utilisation est assez répandue dans les systèmes de ventilation, de pompes et de compresseurs, applications pour lesquelles sa caractéristique du couple disponible permet un fonctionnement satisfaisant. Les convertisseurs de fréquence devenant très compétitifs remplacent progressivement cette solution.

Autres systèmes électromécaniques

Les systèmes électromécaniques de réglage de vitesse, cités ci-après pour mémoire, sont d'un emploi moins fréquent depuis la généralisation des variateurs de vitesse électroniques.

■ Moteurs alternatifs à collecteur (Schrage)

Il s'agit de moteurs spéciaux. La variation de vitesse est obtenue en faisant varier, par rapport à la ligne neutre, la position des balais sur le collecteur.

■ Variateurs à courant de Foucault

Il se compose d'une cloche connectée directement au moteur asynchrone tournant à vitesse constante, et d'un rotor comportant un bobinage alimenté par du courant continu (cf. **fig. 20**).

Le mouvement est transmis à l'arbre de sortie par couplage électromagnétique. En ajustant l'excitation de ce bobinage, il est possible d'ajuster le glissement de cet ensemble. Une génératrice tachymétrique incorporée permet de contrôler la vitesse avec une bonne précision.

Un système de ventilation permet d'évacuer les pertes dues au glissement.

Ce principe a été largement utilisé dans des engins de levage et en particulier les grues de chantier. Sa constitution en fait un système robuste, sans pièces d'usure et peut convenir pour des fonctionnements intermittents et pour des puissances jusqu'à une centaine de kW.

■ Groupe Ward Léonard

Ce dispositif, autrefois très répandu, est constitué d'un moteur et d'un générateur de courant continu lequel alimente un moteur à courant continu (cf. **fig. 21**).

La variation de vitesse s'obtient en réglant l'excitation de la génératrice. Un faible courant de contrôle permet de maîtriser des puissances de plusieurs centaines de kW dans tous les quadrants couple vitesse. Ce type de variateur a été utilisé sur les laminoirs ainsi que sur les ascenseurs de mines.

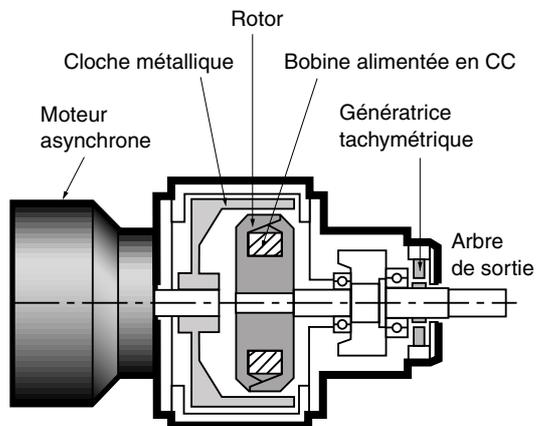


Fig. 20 : Coupe schématique d'un variateur de vitesse à courant de Foucault.

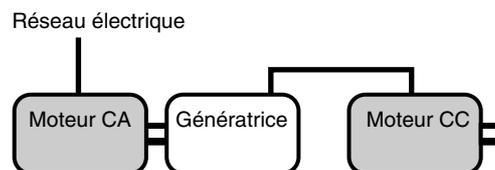


Fig. 21 : Schéma d'un groupe Ward Léonard.

Cette solution de variation de vitesse était la plus économique et la plus performante avant l'apparition des semi-conducteurs qui l'a rendu obsolète.

Variateurs de vitesse mécaniques et hydrauliques

Les variateurs mécaniques et hydrauliques sont toujours utilisés.

En ce qui concerne les variateurs mécaniques de multiples solutions ont été imaginées (poulies / courroies, billes, cônes ...). Ces variateurs ont pour désavantage de réclamer une maintenance soignée et se prêtent difficilement aux asservissements. Ces variateurs sont fortement concurrencés par les convertisseurs de fréquence...

Les variateurs hydrauliques sont toujours très répandus pour des applications particulières.

Ils sont caractérisés par des puissances massives considérables et la capacité de développer des couples importants à vitesse nulle de manière continue. Dans les applications

industrielles, on les trouvera principalement dans des applications de servo-commande. Nous ne détaillerons pas ce type de variateurs qui n'entre pas dans le cadre de cet ouvrage.

4 Conclusion

Le tableau ci-après permet de visualiser très rapidement l'ensemble des moteurs électriques disponibles, leurs principales caractéristiques et leurs domaines d'emploi.

Il faut souligner la place tenue par les moteurs asynchrones à cage triphasés dont le qualificatif

de « standard » est de nos jours renforcé par une parfaite adaptation à l'emploi consécutive au développement des dispositifs électroniques qui autorisent la variation de vitesse.

Type de moteur	Asynchrone à cage		Asynchrone à bague	Synchrone à rotor bobiné	rotor terres rares	Pas à pas	A courant continu
	triphasé	monophasé					
Coût du moteur	Faible	Faible	Elevé	Elevé	Elevé	Faible	Elevé
Moteur étanche	Standard	Possible	Sur demande, coûteux	Sur demande, coûteux	Standard	Standard	Possible Très coûteux
Démarrage direct sur le réseau	Aisé	Aisé	Dispositif de démarrage particulier	Impossible à partir de quelques kW	Non prévu	Non prévu	Non prévu
Variation de vitesse	Facile	Très rare	Possible	Fréquent	Toujours	Toujours	Toujours
Coût de la solution variation de vitesse	De plus en plus économique	Très économique	Economique	Très économique	Assez économique	Très économique	Très économique
Performance en variation de vitesse	De plus en plus élevée	Très faible	Moyenne	Elevée	Très élevée	Moyenne à élevée	Elevée à très élevée
Emploi	Vitesse constante ou variable	En majorité, vitesse constante	Vitesse constante ou variable	Vitesse constante ou variable	Vitesse variable	Vitesse variable	Vitesse variable
Utilisation industrielle	Universelle	Pour les petites puissances	En diminution	Dans les grandes puissances en moyenne tension	Machines outils, forte dynamique	Positionnement en boucle ouverte, pour les petites puissances	En diminution

Schneider Electric

Direction Scientifique et Technique,
Service Communication Technique
F-38050 Grenoble cedex 9
Télécopie : 33 (0)4 76 57 98 60
E-mail : fr-tech-com@schneider-electric.com

Réalisation : SEDOC
Edition : Schneider Electric
- 20 € -

* *Construire le nouveau monde de l'électricité*

06-04