

Mai 2008

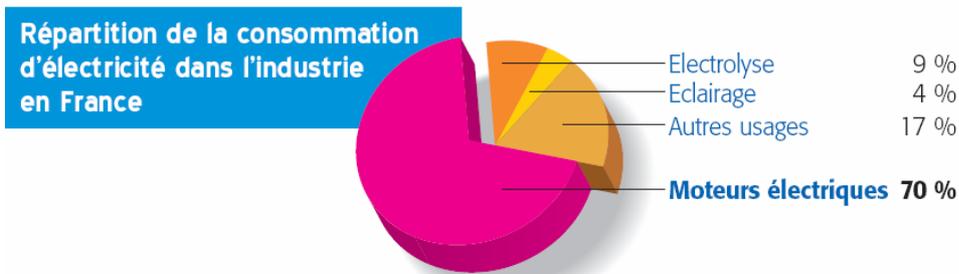
Fiche n°14

Comment réduire la consommation des moteurs électriques dans l'industrie

Rédigé par Olivier JUAN
CRCI Champagne-Ardenne

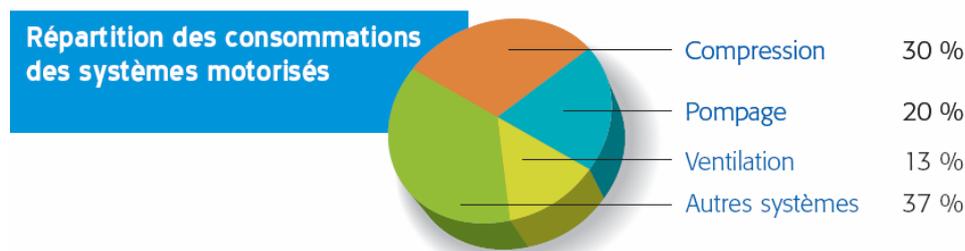


Dans l'industrie, 70 % de la consommation d'électricité est dédiée au fonctionnement des moteurs électriques.



Source : guide technique du programme européen Motor Challenge

30 % de ces 70 % sont utilisés pour la compression (que ce soit celle de l'air ou d'un fluide frigorigène), 20 % servent au pompage d'un fluide, 13 % sont dédiés aux systèmes de ventilation et les 37 % restant sont utilisés par les systèmes d'entrainements.



Source : guide technique du programme européen Motor Challenge

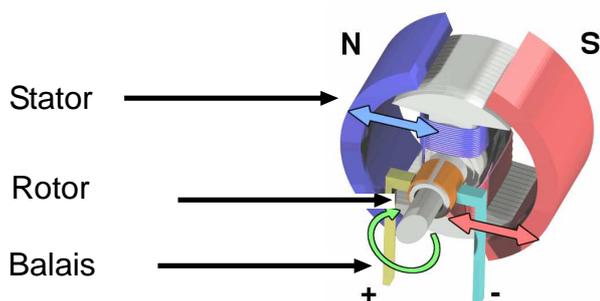
Les moteurs électriques constituent donc un poste consommateur d'électricité considérable. Or, il existe aujourd'hui des technologies de moteurs qui utilisent l'énergie de manière rationnelle et permettent par la même occasion de réduire la facture d'électricité.

Rappels sur les principes de fonctionnement des différents types de moteurs électriques

Le principe de base du fonctionnement de tout moteur électrique consiste à placer une boucle de courant dans une région où règne un champ magnétique pour provoquer la rotation de l'arbre du moteur. Son axe de rotation autour duquel se trouve la boucle de courant est toujours perpendiculaire aux lignes de champ magnétique. Les moteurs électriques qui permettent ainsi la conversion d'énergie électrique en énergie mécanique sont souvent classés suivant quatre catégories :

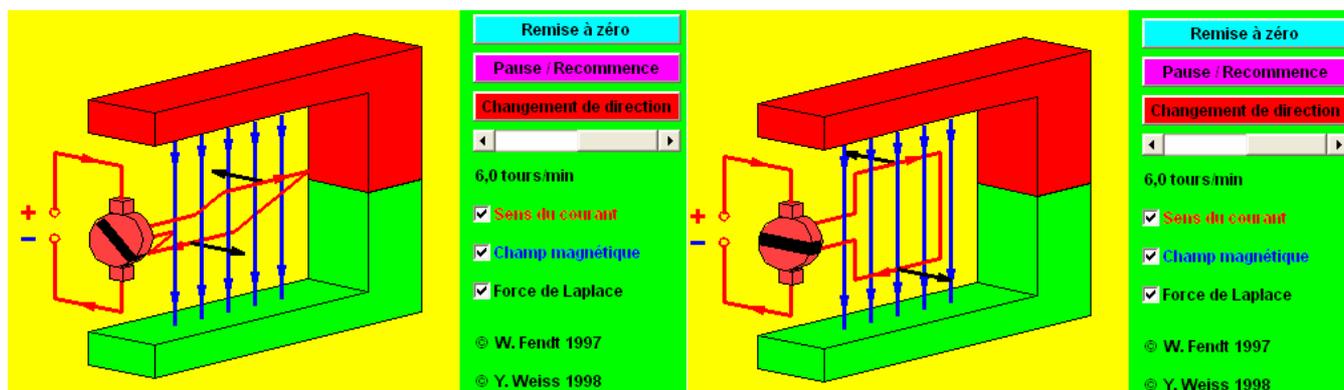
- ⇒ les moteurs à courant continu
- ⇒ les moteurs asynchrones
- ⇒ les moteurs synchrones
- ⇒ les moteurs Brushless

Moteurs à courant continu



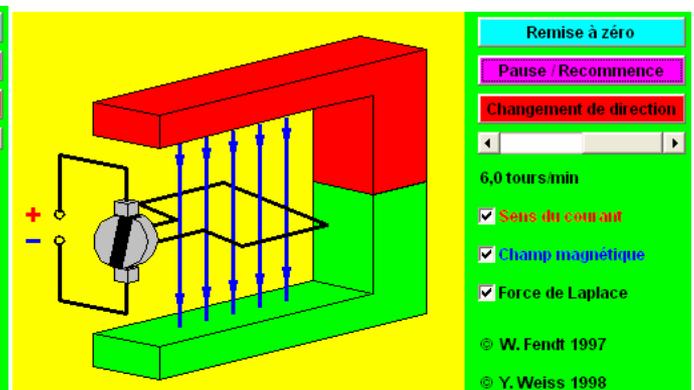
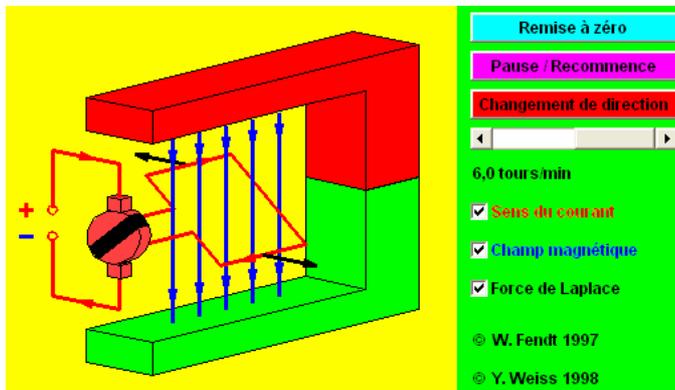
Source : <http://fr.wikipedia.org/>

Comme toutes les machines tournantes, les moteurs à courant continu sont constitués d'un stator (partie fixe) et d'un rotor (partie mobile en rotation). Le rôle du stator est de créer un champ magnétique longitudinal fixe par l'intermédiaire d'aimants permanents ou plus généralement d'enroulements dans lesquels circule un courant continu. Pour sa part, le rotor est constitué d'un ensemble de bobines reliées à un collecteur rotatif. Un courant continu circule dans ces bobines créant ainsi un second champ magnétique fixe dans le référentiel du rotor mais tournant dans celui du stator. Il s'exerce alors sur les conducteurs rectilignes du rotor des forces de Laplace dont l'orientation reste toujours perpendiculaire aux lignes de champ magnétique. Le moment de force qui s'exerce sur le rotor le fait donc tourner jusqu'à ce qu'il soit en position horizontale. En effet, le couple qui provoque la rotation de l'arbre est nul lorsque les champs statorique et rotorique sont colinéaires, et maximal quand ils forment un angle de 90°.



Source : <http://www.cegep-ste-foy.qc.ca/profs/rfoy/capsules/moteur/>

A ce moment, le commutateur inverse le sens du courant ce qui a pour effet d'inverser aussi le sens des forces s'exerçant sur les conducteurs. Grâce à ce dispositif, les champs magnétiques rotorique et statorique sont toujours en quadrature et provoquent ainsi la rotation continue du rotor.



Source : <http://www.cegep-ste-foy.qc.ca/profs/rfoy/capsules/moteur/>

Moteurs asynchrones

Les moteurs asynchrones fonctionnent en courant alternatif. Ils sont directement alimentés par le réseau électrique en monophasé (1 x 230 V) ou triphasé (3 x 230 V ou 3 x 380 V) et ne possèdent pas de connexion entre le stator et le rotor. Les courants statoriques provoquent la création d'un champ magnétique tournant dans le stator dont la vitesse de rotation est proportionnelle à la fréquence de l'alimentation électrique. La vitesse de ce champ tournant est appelée vitesse de synchronisme. Par conséquent, l'enroulement conducteur au rotor est soumis à des variations de flux du champ magnétique. C'est pourquoi une force électromotrice induite crée des courants rotoriques dans les enroulements.

Ces courants sont responsables de l'apparition des forces de Laplace qui font tourner le rotor dans le même sens que le champ statorique.

La machine est dite asynchrone car elle est dans l'impossibilité, d'atteindre la même vitesse que le champ statorique. En effet, dans ce cas, si l'on se place dans le référentiel du rotor, il n'y aurait pas de variation de champ magnétique et par conséquent ni forces de Laplace, ni rotation du rotor.

Moteurs synchrones

Le stator des moteurs asynchrone est identique à la machine asynchrone. Cependant, le rotor est bobiné et alimenté en courant continu par l'intermédiaire de balais et de bagues. Cette configuration permet de créer un champ magnétique fixe dans le référentiel du rotor. Celui-ci tourne donc à la vitesse du champ statorique d'où l'appellation de machine synchrone.

Moteurs Brushless ou sans balais

Ce type de moteur, qui est alimenté en courant continu, est en fait un moteur synchrone dont le rotor est constitué d'aimants permanents. Leur rotation est assurée par un système de commande électronique. Celui-ci transforme d'abord le courant continu en courant alternatif et assure la commutation de ce courant dans les enroulements du stator.

Cela entraîne l'inversion périodique du sens de rotation du champ magnétique statorique et par la même occasion le maintien de la quadrature des champs statorique et rotorique (fixe dans le référentiel du rotor mais tournant dans celui du stator) indispensable à la rotation de l'arbre.

Applications

D'une manière générale, quels que soient les domaines industriels et les puissances, les moteurs à courant continu sont sur le déclin. Aujourd'hui, la tendance générale pour les entraînements électriques consiste à utiliser des moteurs asynchrones. En effet, l'architecture des moteurs à courant continu en fait des machines sur lesquelles la maintenance est importante. Celle-ci est due principalement à l'usure et au coût de l'ensemble balais/collecteur rotatif. Les frottements des balais limitent le rendement ainsi que la vitesse de rotation et provoquent des bruits mécaniques, des perturbations électromagnétiques ou encore des échauffements au rotor. Ces derniers sont aussi provoqués par la superposition dans les conducteurs du rotor d'un courant continu avec un courant induit. Or, le refroidissement du rotor est une des problématiques importantes des constructeurs.

L'avantage principal des machines à courant continu résidait dans leur possibilité de faire varier leur vitesse par simple action sur la tension et sans grande perte de rendement. Cependant, aujourd'hui, les variateurs de fréquence qui permettent de faire varier la vitesse des moteurs asynchrones ont fortement évolué ces dernières décennies. Ils sont désormais d'une grande fiabilité et le couple nominal peut être disponible à vitesse réduite. Par ailleurs, avec l'avènement de l'électronique de puissance, on retrouve désormais la machine asynchrone dans une gamme de puissance très étendue et dans de très nombreux domaines d'applications comme l'électroménager, l'industrie mais aussi les systèmes de traction des métros et des trains, secteur où elle a longtemps été concurrencée par les moteurs synchrones.

Toutefois, pour des puissances inférieures à 30 kW les moteurs asynchrones sont en concurrence avec les Brushless. Comme leur nom l'indique, leur apparition sur le marché a supprimé les inconvénients liés à l'ensemble balais/collecteur des moteurs à courant continu et demandent par conséquent beaucoup moins d'entretien. De plus, sur le plan technique, le Brushless est plus performant que l'asynchrone. En effet, à puissance égale il est plus léger, plus précis, plus simple à régler, le changement de vitesse est plus rapide et les réglages sont moins sensibles que ceux d'un moteur asynchrone. Ces propriétés le rendent donc très intéressant pour les applications de précision. Par contre, le moteur Brushless est plus cher que l'asynchrone surtout pour des puissances comprises entre 1 et 30 kW.

Sources d'économies d'énergie

La plupart des moteurs électriques utilisés dans l'industrie sont surdimensionnés et un bon nombre d'entre eux sont soumis à une charge variable dans le temps. Cela signifie, dans la pratique courante, qu'ils fonctionnent généralement loin de leur capacité nominale, donc loin de leur rendement optimal et que leur consommation d'électricité est excessive par rapport aux besoins réels. Pour la réduire, trois solutions :

- ⇒ adapter la vitesse au besoin
- ⇒ optimiser le rendement
- ⇒ réaliser des opérations de maintenance

Variation Electronique de Vitesse (VEV)

Dans le cas d'un moteur à courant continu, le variateur de vitesse est de conception très simple. La vitesse de consigne est comparée à la vitesse de rotation effective du rotor et le système réagit de sorte que l'erreur de vitesse s'annule. Par exemple, si la consigne augmente, l'erreur augmente, la tension appliquée augmente et le moteur accélère.

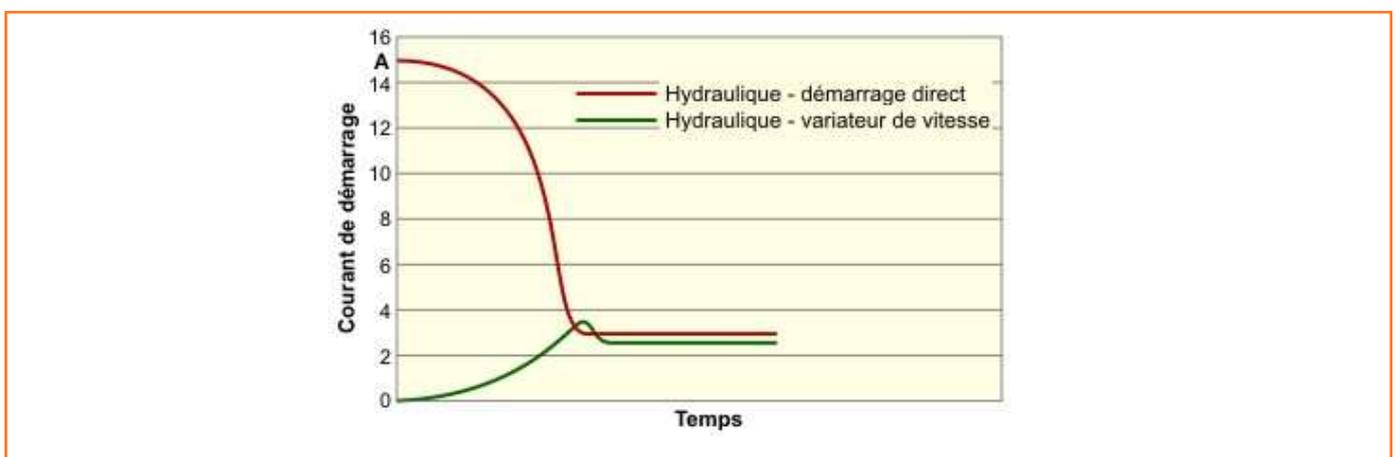
Pour un moteur à courant alternatif, la vitesse de rotation dépend de la fréquence de sa tension d'alimentation. Effectivement, la vitesse de synchronisme N_s (en tours par minute) d'un moteur alternatif est donnée par la relation $N_s = 60f/p$ où f est la fréquence en Hertz de la tension d'alimentation et p le nombre de paires de pôles. Un moteur synchrone tournera exactement à cette vitesse. En revanche, un moteur asynchrone tournera un peu plus lentement à cause de son glissement g (en %) qui est proportionnel à la charge et au carré de la tension d'alimentation : $g = 100 (N_s - N)/N_s$ où N est la vitesse réelle de l'arbre.

Un variateur de fréquence, nettement plus complexe qu'un variateur de tension continue, est constitué d'un redresseur combiné à un onduleur. Le réseau alternatif basse tension est d'abord redressé pour alimenter un circuit intermédiaire en courant continu qui alimente à son tour un onduleur qui génère un courant triphasé de fréquence variable.

Outre adapter la vitesse du moteur à l'application, la vitesse variable peut également permettre de réaliser des économies d'énergie considérables qui sont comprises entre 10 et 50 % de la consommation électrique du moteur. Ces économies sont fonction du temps de fonctionnement annuel du moteur, de la vitesse moyenne de rotation que nécessite l'application et de la fréquence des démarrages.

Lors du démarrage d'un moteur asynchrone, le courant peut atteindre 8 fois le courant nominal de la machine. Si un variateur est installé, celui-ci se chargera aussi d'adapter l'amplitude des tensions appliquées à la machine afin de limiter le courant donc la puissance active absorbée mais aussi la puissance réactive le $\cos \phi$ étant ajusté. Les courbes de démarrages ci-dessous montrent que l'appel de puissance du moteur hydraulique à démarrage direct est considérable par rapport à celui d'une motorisation hydraulique à variateur de fréquence.

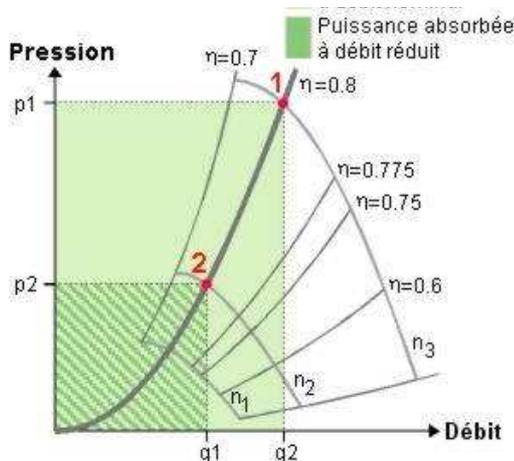
Courbes de démarrage d'une pompe avec et sans variateur de vitesse



Source : <http://www-energie.arch.ucl.ac.be/cdrom/ascenseurs/ameliorer/ascaperformanceenergetique.htm>

Ensuite, pendant le fonctionnement du moteur, le variateur adapte en permanence la puissance du moteur à la charge. Par exemple, dans le cas des pompes hydrauliques et des ventilateurs, la puissance absorbée est une fonction de la vitesse du fluide au cube. Or, bien souvent, le débit des réseaux hydrauliques est régulé par étranglement alors que la pompe qui assure la circulation du fluide tourne à plein régime.

Courbes de puissances absorbées par une pompe à débit variable



Source : <http://www-energie.arch.ucl.ac.be/CDRom/Ventilation/equipements/venequireglagedebitventi.htm>

Le rendement des convertisseurs de fréquence n'est pas de 100 %. Il est moins élevé à faible charge qu'à la puissance nominale où il peut dépasser 0,95. De plus, étant donnée la double conversion dans le redresseur puis l'onduleur, le rendement d'un variateur pour moteur asynchrone est légèrement moins bon que celui d'un variateur pour moteur à courant continu. Cependant, le bilan énergétique global prenant compte le variateur et le moteur ne désavantage pas le moteur asynchrone.

Enfin, les variateurs de fréquence peuvent également provoquer la création d'harmoniques et d'interférences radio ou une augmentation des pertes Joules du moteur. Toutefois, le marquage CE garantit l'absence de ces problèmes.

Rendement des moteurs électriques

Dans tout moteur électrique, une partie de la puissance électrique absorbée est dissipée sous forme de chaleur. Les pertes d'énergie au niveau des moteurs asynchrones sont constituées par :

- ⇒ des pertes par effet Joule dans les bobinages parcourus par le courant au niveau du stator,
- ⇒ des pertes par effet Joule dans l'induit au niveau du rotor,
- ⇒ des pertes mécaniques par frottement au niveau du rotor.

Le rendement d'un moteur électrique est le rapport de la puissance utile, c'est-à-dire la puissance mécanique P_m fournie à l'arbre sur la puissance électrique absorbée P_a par le moteur. La puissance mécanique exprimée en Watt est donnée par la formule $P_m = C \cdot \Omega$ où C est couple développé par l'arbre du moteur en Newton-mètre (N.m) et Ω la vitesse de rotation de l'arbre en radian par seconde ($\Omega[\text{rad/s}] = N[\text{tr/min}] \cdot 2 / 60 = n[\text{tr/s} \cdot 2]$). Pour un moteur asynchrone alimenté en courant triphasé, la puissance absorbée s'écrit $P_a = 3^{1/2} \cdot U \cdot I \cdot \cos \phi$.

Pour les moteurs à courant alternatif : les moteurs monophasés n'ont pas un bon rendement. Par contre, qu'ils soient asynchrones ou synchrones, celui des moteurs triphasés est bon. Mis à part pour des faibles puissances inférieures au kilowatt, le rendement des moteurs à courant continu qui peut atteindre 80 % est moins bon que celui des moteurs à courant alternatif. Par ailleurs, d'une manière générale, plus un moteur est puissant plus son rendement sera élevé. Par exemple, le rendement des moteurs asynchrone est compris entre 60 % pour des puissances de l'ordre de la centaine de Watt et atteint 96 % pour des puissances élevées (100 kW). De la même manière, pour tous les moteurs, le rendement diminue avec le taux de charge. **Pour choisir un moteur, il est donc important de connaître précisément la puissance nécessaire afin d'éviter un surdimensionnement ainsi que plusieurs rendements à charge partielle pour différents points de fonctionnement.**

Dans l'objectif de réduire la consommation énergétique des moteurs électriques, les fabricants européens ont signé une convention avec l'Union Européenne afin d'informer les acheteurs de la performance énergétique des moteurs. Les moteurs les plus économes sont ainsi labélisés EFF1. Les critères d'économie dépendent de la puissance des moteurs mais aussi de leur technologie.

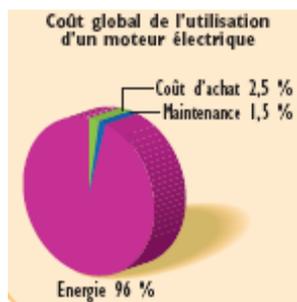
Efficacité énergétique des moteurs asynchrones 2 pôles et 4 pôles

2-polig kW	EFF3 η %	EFF2 η %	EFF1 η %
1,1	< 76,2	>= 76,2	>= 82,8
1,5	< 78,5	>= 78,5	>= 84,1
2,2	< 81,0	>= 81,0	>= 85,6
3	< 82,6	>= 82,6	>= 86,7
4	< 84,2	>= 84,2	>= 87,6
5,5	< 85,7	>= 85,7	>= 88,6
7,5	< 87,0	>= 87,0	>= 89,5
11	< 88,4	>= 88,4	>= 90,5
15	< 89,4	>= 89,4	>= 91,3
18,5	< 90,0	>= 90,0	>= 91,8
22	< 90,5	>= 90,5	>= 92,2
30	< 91,4	>= 91,4	>= 92,9
37	< 92,0	>= 92,0	>= 93,3
45	< 92,5	>= 92,5	>= 93,7
55	< 93,0	>= 93,0	>= 94,0
75	< 93,6	>= 93,6	>= 94,6
90	< 93,9	>= 93,9	>= 95,0

4-polig kW	EFF3 η %	EFF2 η %	EFF1 η %
1,1	< 76,2	>= 76,2	>= 83,1
1,5	< 78,5	>= 78,5	>= 85,1
2,2	< 81,0	>= 81,0	>= 86,1
3	< 82,6	>= 82,6	>= 87,1
4	< 84,2	>= 84,2	>= 88,1
5,5	< 85,7	>= 85,7	>= 89,1
7,5	< 87,0	>= 87,0	>= 90,1
11	< 88,4	>= 88,4	>= 91,1
15	< 89,4	>= 89,4	>= 91,1
18,5	< 90,0	>= 90,0	>= 92,1
22	< 90,5	>= 90,5	>= 92,1
30	< 91,4	>= 91,4	>= 93,1
37	< 92,0	>= 92,0	>= 93,1
45	< 92,5	>= 92,5	>= 93,1
55	< 93,0	>= 93,0	>= 94,1
75	< 93,6	>= 93,6	>= 94,1
90	< 93,9	>= 93,9	>= 95,1

Source : http://pdf.directindustry.fr/pdf/lenze/moteurs-electriques-industriels/8935-8980-_17.html

Sur la durée de vie moyenne, estimée à 10 ans, d'un moteur électrique, son prix d'achat et son coût de maintenance sont dérisoires par rapport à sa facture énergétique. Elle représente à elle seule 95% du coût global. Et pourtant, au moment du choix, c'est bien souvent la hauteur de l'investissement qui guide la décision même si celui-ci ne représente que 5 % du coût global.



(Source : guide technique du programme européen Motor Challenge)

Par exemple, un moteur asynchrone 4 pôles d'une puissance de 5,5 kW coûte approximativement 2 000 €. Le tableau ci-dessous permet de comparer les coûts énergétiques d'un moteur électrique de ce type en fonction de son classement (EFF1, EFF2 ou EFF3). Pour le calcul, un travail de 6000 heures/an et un prix du kWh de 0,07 € ont été retenus.

Moteur 4 pôles de 5,5 kW	Consommation énergétique	Coût énergétique	Surconsommation annuelle	Surcoût annuel
EFF1, = 89,2 %	36 996 kWh/an	2 590 €/an	0 kWh	0 € soit 0 %
EFF2, = 85,7 %	38 506 kWh/an	2 695 €/an	1 510 kWh	105 € soit 4 %
EFF3, = 80 %	41 250 kWh/an	2 888 €/an	4 254 kWh	298 € soit 11,5 %

Ces résultats sont relatifs à un seul et unique moteur. L'économie pour une entreprise qui possède un parc de 100 moteurs électriques est évidemment beaucoup plus élevée. De plus, **le coût supplémentaire d'un moteur haut rendement est compris entre 20 et 30 %**. Or, pour l'exemple considéré dans le tableau ci-dessus, les résultats révèlent une économie annuelle qui représente approximativement 15 % du prix d'achat, **soit un temps de retour inférieur à 2 ans**. Enfin, si **les économies générées par le choix de moteurs hauts rendements à la place de moteurs EFF3 sont comprises entre 2 et 8 %**, celles générées le remplacement de moteurs anciens peuvent être très largement supérieures.

Maintenance

Outre la variation électronique de vitesse et les moteurs hauts rendements, des opérations de maintenance peuvent aussi générer des économies d'énergie importantes sur les moteurs électriques :

- ⇒ **utiliser des transmissions à hautes efficacité pour réduire les pertes d'énergie pouvant atteindre 45 %**
- ⇒ **lubrifier les paliers régulièrement pour gagner de 1 à 5 % sur la consommation**
- ⇒ **ajuster la tension des courroies et les alignements des systèmes d'entraînement peut permettre un gain de 1 à 5 %**

Enfin, le rebobinage d'un moteur qui n'est pas réalisé dans les règles de l'art peut provoquer une perte de rendement considérable.

Sources :

Guide technique du programme européen Motor Challenge

<http://www.cegep-ste-foy.qc.ca/profs/rfoy/capsules/moteur/>

<http://www.seed.slb.com/fr/scictr/journal/engineering/motor.htm>

http://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_%C3%A9lectrique

[http://fr.wikipedia.org/wiki/Variateur_de_vitesse_\(%C3%A9lectricit%C3%A9\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Variateur_de_vitesse_(%C3%A9lectricit%C3%A9))

<http://www-energie.arch.ucl.ac.be/cdrom/ventilation/equipements/venequeumoteurventilateur.htm#vitesse>

<http://www-energie.arch.ucl.ac.be/cdrom/ascenseurs/ameliorer/ascaperformanceenergetique.htm>

<http://www-energie.arch.ucl.ac.be/CDRom/Ventilation/equipements/venequeglagedebitventi.htm>

<http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=3186>

http://www.mesures.com/archives/057_061_GDA.pdf

http://pdf.directindustry.fr/pdf/lenze/moteurs-electriques-industriels/8935-8980-_17.html

Contact:

Olivier JUAN

CRCI CHAMPAGNE-ARDENNE

10 rue de Chastillon

51000 CHALONS EN CHAMPAGNE

Tél : 03 26 69 33 50/Fax : 03 26 69 33 69

courriel : energie@champagne-ardenne.cci.fr

http://www.champagne-ardenne.cci.fr/fr/plate_forme/index.html

