

# Effacité Energétique des Machines : le choix judicieux de la motorisation

Mai 2010 / White paper

par Alexandre Perrat

Make the most of your energy

**Schneider**  
 Electric

# Sommaire

Avant-propos .....	I
Introduction.....	III
Le moteur asynchrone .....	1
Constitution.....	1
Fonctionnement et limitations .....	1
Le moteur synchrone .....	3
Constitution.....	3
Fonctionnement .....	3
Comparaison des moteurs.....	5
Exemple d'application .....	7
Transport de bagages d'aéroport.....	7
Conclusion.....	9

# Avant-propos

L'industrie et les infrastructures consomment plus de 31% de l'énergie et, à eux seuls, les moteurs électriques représentent plus de 60% de cette consommation.

La disparation inéluctable des réserves fossiles et l'augmentation inexorable des coûts qui en résulte obligent les industriels à utiliser au mieux l'énergie électrique.

Lors de la prise de décision d'acquérir une nouvelle machine, l'investisseur devrait être conduit à considérer l'énergie qui sera consommée par cette machine pendant sa durée de vie. En effet, on considère que depuis son acquisition jusqu'à son démantèlement, le prix d'achat représente 2 à 3% du coût global, le reste étant, principalement, la consommation d'énergie.

Cette énergie est nécessairement imputée au produit fini et impacte la compétitivité de l'entreprise.

Des solutions existent pour utiliser de manière intelligente l'énergie disponible :

- améliorer le rendement de la machine,
- choisir un mode de marche permettant de mettre en sommeil les machines peu sollicitées (exemple arrêter les convoyeurs à vide),
- utiliser la variation de vitesse,
- choisir des stratégies de mouvements moins énergivores,
- utiliser des moteurs à haut rendement.

# Introduction

Toute machine est définie en fonction de critères de performances et de productivité. Le concepteur s'ingénie à trouver les solutions les plus performantes, les plus économiques et les plus compétitives.

Le dimensionnement des moteurs découle de ces choix. Le plus souvent, il est finalisé quand la partie mécanique a été en grande partie étudiée, et l'énergie consommée sur le long terme n'est pas toujours prise en compte.

Cependant, le coût croissant de l'énergie impose de nouvelles approches et le choix du moteur devrait être le point de départ de toute réflexion de réduction de la consommation.

Sur le plan strictement mécanique, les moteurs qui équiperont la machine doivent répondre à plusieurs critères.

En premier, ils permettent le fonctionnement continu de la machine et fournissent le couple à la vitesse requise. Cette première considération détermine la puissance du moteur en régime permanent. Le concepteur doit également examiner le démarrage de la machine et déterminer le couple que le moteur devra développer pour mettre en mouvement la machine. Cela peut conduire à augmenter la puissance du moteur.

Le cycle de fonctionnement est également un point capital. En effet chaque démarrage conduit à un échauffement du moteur et il est indispensable de ne pas dépasser une température limite qui, à plus ou moins long terme, se traduira par une défaillance du moteur.

L'examen final portera sur les conditions ambiantes et prendra en considération la température et l'altitude à laquelle la machine fonctionnera.

Quand toutes ces évaluations ont été conduites, le moteur retenu sera le plus souvent d'une puissance bien supérieure à la celle nécessaire en régime continu. Le moteur ne fonctionne pas à sa puissance nominale et son rendement se détériore. Cela conduit inévitablement à une consommation d'énergie accrue. Le rendement du moteur et de la chaîne cinématique fera qu'une partie de cette énergie sera purement et simplement gaspillée.

Soucieuse de sauvegarder les ressources fossiles, l'Union européenne impose qu'en 2020, tous les moteurs utilisés soient de catégorie EFF1, c'est-à-dire à haut rendement.

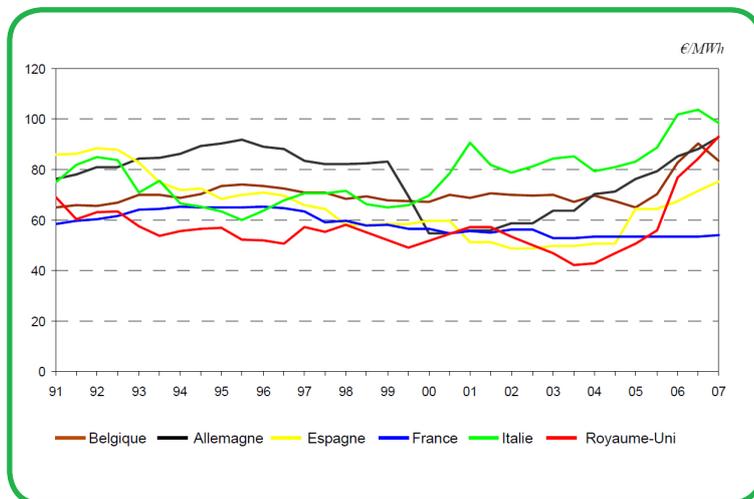
Avec l'utilisation de moteurs à haut rendement et de solutions déjà disponibles, les économies d'énergie pourraient atteindre en Europe 202 TWh par an. Ceci représente 45 centrales nucléaires de 1000 MW, ou 130 centrales utilisant un carburant fossile ou encore 3,8 fois la totalité des l'énergie produite par le parc éolien (valeur 2007).

# Introduction

Les effets sur l'environnement peuvent être évalués à une réduction de 79 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>, une diminution drastique des oxydes d'azote, oxydes de soufre.

Sur le plan financier, les courbes du coût de l'énergie (cf graphiques ci-contre de l'Observatoire de l'Energie d'après Eurostat – janvier 2007) montrent clairement, après 2004, une croissance continue.

L'appauvrissement des réserves d'énergie fossile ne fera qu'accentuer cette croissance.



Le choix du moteur est primordial pour les économies d'énergie. En effet, une fraction de l'énergie prélevée au réseau est gaspillée en échauffement. Suivant la technologie de moteur retenu, ces pertes sont plus ou moins importantes. Elles varient également entre les fournisseurs et une comparaison s'impose.

Le moteur majoritairement utilisé est le moteur asynchrone. Il est conçu pour fonctionner à vitesse constante. Cependant il est de plus en plus associé à un variateur ce qui permet d'améliorer la flexibilité des machines.

Le moteur synchrone est une autre possibilité extrêmement attractive.

Ce White Paper a pour objectif de comparer ces deux technologies, d'en estimer les limites et guider le choix du concepteur et de l'utilisateur.

Pour cette comparaison, les deux moteurs sont alimentés par un variateur de vitesse.

L'utilisation d'un variateur de vitesse élimine certaines faiblesses du moteur asynchrone :

- le courant de démarrage,
- le facteur de puissance (cosinus  $\varphi$ ),
- l'influence des variations de tension sur le couple moteur,
- avec des variateurs utilisant le contrôle vectoriel, la différence de vitesse entre vide et charge,
- le courant absorbé à vide.



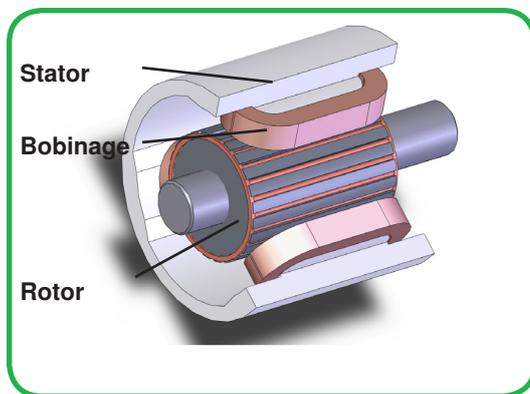
Le choix judicieux de la  
motorisation

# Le moteur asynchrone

## Constitution

Le moteur asynchrone ou moteur à induction comprend un stator avec un bobinage polyphasé dans une carcasse constituée de matériau magnétique et d'un rotor, lui aussi en matériau magnétique, dans lequel sont logés des conducteurs en court-circuit.

Le dessin très simplifié ci-dessous illustre la constitution de ce moteur



## Fonctionnement et limitations

Quelques soient les efforts des constructeurs, le moteur asynchrone a par nature des limitations physiques incontournables. Aujourd'hui la classe EFF1 atteint la limite des possibilités d'évolution réalisables de manière économique. Si des progrès restent toujours envisageables, le gain sera probablement extrêmement ténu.

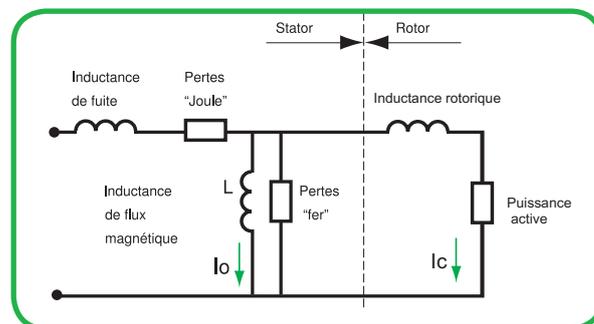
Les limites sont liées au principe même de ce moteur. Nous allons analyser celles qui subsistent dans le cas d'une alimentation à travers un variateur pour permettre d'évoquer des solutions plus prometteuses et aujourd'hui disponibles.

### PREMIÈRE LIMITE : LA CRÉATION DU CHAMP MAGNÉTIQUE ET LES CONSÉQUENCES

Comme pour toute machine électrique, la génération du couple repose sur l'existence d'un flux magnétique dans la machine.

Ce flux, noté  $\phi$  est produit par les bobinages du stator qui, lorsqu'ils sont soumis à une tension alternative polyphasée, créent un champ tournant.

Nous allons examiner ce qui se passe dans une machine théorique représentée par le schéma suivant.



En négligeant la résistance de l'enroulement, on voit que la tension appliquée à l'enroulement de magnétisation noté L, génère un courant que nous noterons  $I_0$ .

Le flux a pour expression  $\phi = k I_0$

Inévitablement, ce courant magnétisant produit des pertes dans le moteur.

La puissance transmise est, quant à elle, représentée par la tension appliquée à une résistance fictive qui simule la charge. En notant  $I_c$  le courant qui circule dans cette résistance, le couple peut s'écrire:

$$C = k I_0 I_c$$

# Le moteur asynchrone

On voit immédiatement que si la tension d'alimentation diminue, le flux et le courant le diminuent simultanément dans la même proportion et que le couple varie comme le carré de la tension. L'utilisation d'un variateur, qui régule cette tension permet d'éliminer cette faiblesse

## DEUXIÈME LIMITE : LE GLISSEMENT

Le couple électromagnétique a pour origine le courant induit dans le rotor. Ce courant obéit à la loi de Lenz suivant laquelle une spire plongée dans un champ magnétique sera l'objet d'un courant induit qui s'oppose par ses effets à la cause qui lui a donné naissance.

L'amplitude de ce courant, fonction de la différence de vitesse entre le champ tournant et la vitesse de rotation du rotor, détermine le couple. Cette différence entre la vitesse de synchronisme ( $N_s$ ) et la vitesse de rotation mesurée est appelée "glissement" ( $g$ ) et s'exprime en % de la vitesse de synchronisme.

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

Le glissement ne peut en aucun cas être nul, car dans ce cas le courant induit serait nul et il en serait de même pour le couple. Le glissement est donc un "mal nécessaire" générateur de pertes inévitables.

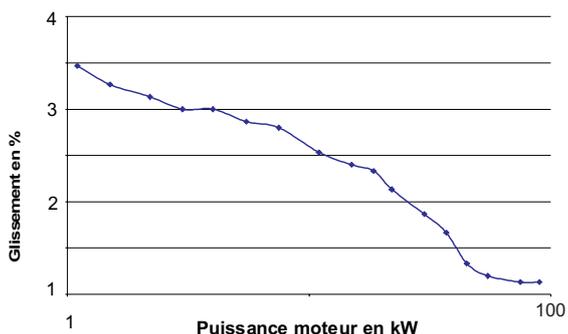
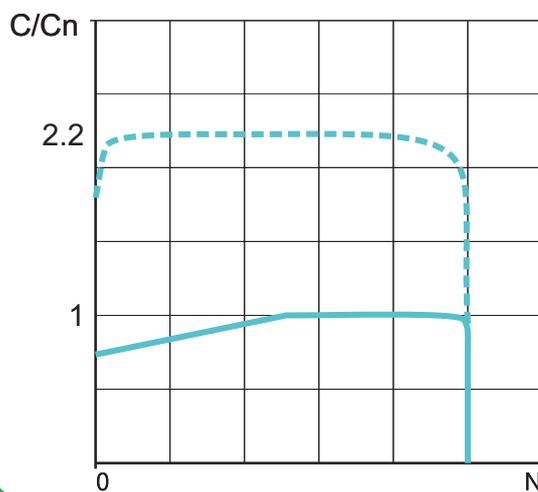
En soignant la machine, il est possible de le réduire, mais il est impossible de l'annuler. Il

varie de 4% à un peu plus de 1% comme sur diagramme qui suit représentant le glissement de machines EFF1 de 1 à 90kW.

## TROISIÈME LIMITE : LE COUPLE MAXIMUM DISPONIBLE

Les moteurs à induction ont des performances de couple limitées. Le diagramme suivant représente la caractéristique d'un moteur asynchrone associé à un variateur de vitesse.

La courbe en pointillés est le couple maximum utilisable en régime transitoire. Ce maximum (environ 2,2 fois le couple nominal du moteur) est une limite imposée par le moteur et non par le variateur. Cette réserve de couple permet de lancer les inerties de la machine et de vaincre les frottements statiques, mais il est évident que la performance dynamique de mise en vitesse est médiocre.

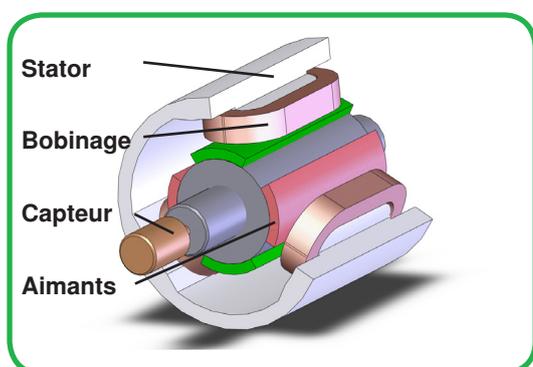


Le couple permanent, figuré en trait plein est limité en basse vitesse par les pertes du moteur et l'inefficacité de la ventilation.

# Le moteur synchrone

## Constitution

Le moteur synchrone est une autre approche de la motorisation dans les petites puissances. Comme le moteur asynchrone, il comprend un stator et un rotor séparés par l'entrefer.



Le dessin très simplifié ci-dessous représente une coupe d'un tel moteur.

Le stator comporte des enroulements triphasés. Le rotor, en matériau magnétique, porte des aimants permanents N et S représentés en vert et en rouge.

Le moteur synchrone est alimenté par un variateur électronique qui en assure l'autopilotage, c'est pourquoi nous avons représenté un capteur lié à l'arbre du moteur.

Le principe de ce contrôle dépasse le cadre de ce document et nous encourageons les lecteurs à consulter des ouvrages comme le « Guide des solutions d'automatisme » de Schneider Electric ou le « Motion Control » du Gimelec pour de plus amples informations.

Convenablement alimenté, il ne présente aucune des limitations du moteur asynchrone.

## Fonctionnement

### LA CRÉATION DU CHAMP MAGNÉTIQUE ET LES CONSÉQUENCES

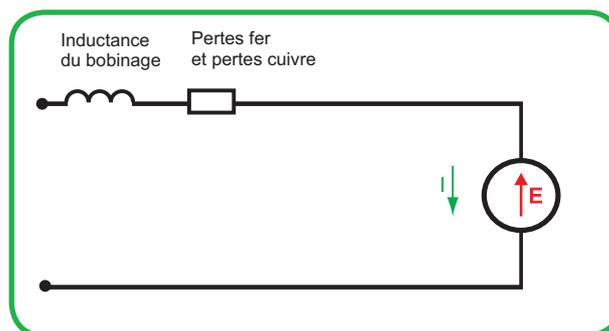
Le flux dans l'entrefer n'est pas dû à une composante du courant statorique, mais aux aimants permanents placés au rotor qui produisent un flux constant.

Avec des aimants à terre rare utilisant du néodymium ou du samarium on obtient des flux importants dans des volumes réduits, donc des moteurs très compacts.

Le couple a pour expression générale:  $C = kI\phi$

Il n'y a pas de courant magnétisant ni de pertes associées.

La machine synchrone peut être représentée comme suit :



$E$  représente la force électromotrice de la machine qui dépend du flux  $\phi$ , créé par les aimants et de la vitesse de rotation  $\omega$ .

La puissance a pour expression :

$$P = EI = k\phi\omega$$

# Le moteur synchrone

## LA CRÉATION DU COUPLE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Contrairement au moteur asynchrone, le couple électromagnétique n'est plus lié à un courant induit dans le rotor.

Le champ permanent créé par les aimants s'aligne sur le champ tournant du stator. Le couple est généré par le décalage angulaire entre la position du champ tournant et celle du rotor.

Le rotor, à la différence des machines asynchrones, tourne donc sans glissement, à la vitesse du champ tournant créée par le stator et donc sans perte ni échauffement au rotor. Il n'y a pas de risque de dilatation et l'entrefer peut être réduit, ce qui a une influence favorable sur le couple développé par la machine.

## LE COURANT ABSORBÉ

Le courant absorbé est celui nécessaire à la génération de la puissance au rendement près.

Comme il n'y a plus de pertes liées au glissement ni de pertes additionnelles liées au courant magnétisant, à puissance égale, le moteur synchrone consomme un courant sensiblement inférieur à celui d'un moteur asynchrone.

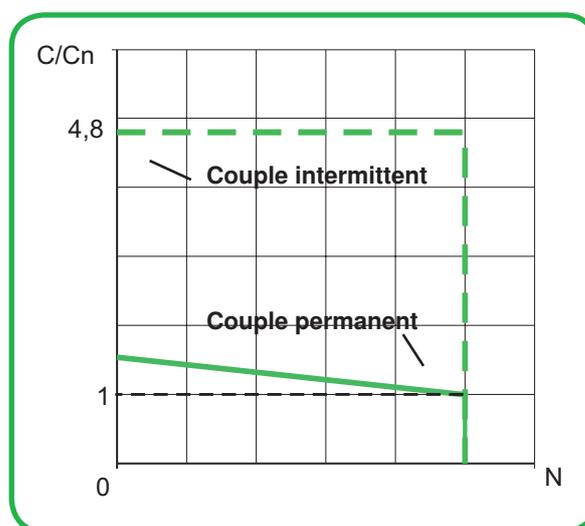
## LE COUPLE DE DÉMARRAGE ET LE COUPLE MAXIMUM DISPONIBLES

Le flux du moteur synchrone étant complètement découplé de la tension d'alimentation, les caractéristiques de couple sont très nettement améliorées.

La courbe qui suit est celle d'un moteur BMH1003P de Schneider Electric avec son variateur.

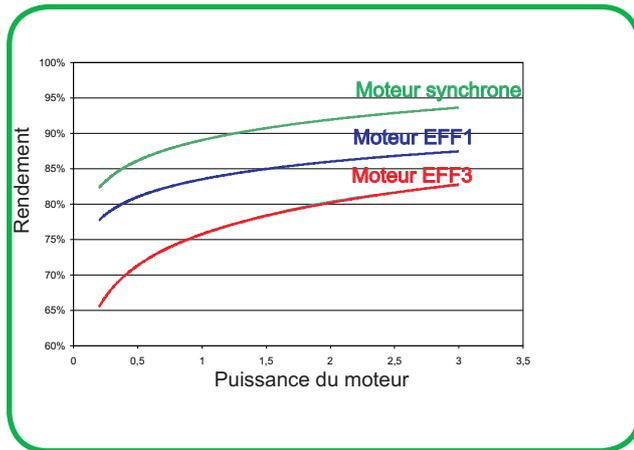
Son couple nominal est de 5,2 Nm à 3000 tr/mn soit sensiblement 1.6kW.

Le couple intermittent, utilisable pour le démarrage et le freinage est dans le rapport 4,8 du couple nominal.



# Comparaison des moteurs

Compte tenu de l'absence de glissement et d'un courant absorbé inférieur à puissance égale, le moteur synchrone surpasse le rendement du moteur asynchrone EFF1, comme figuré sur le graphe ci-dessous.



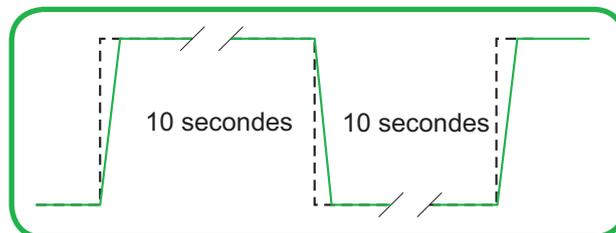
Une partie des faiblesses du moteur asynchrone disparaît, et en particulier le facteur de puissance.

Néanmoins, le couple maximum disponible est rarement supérieur à deux fois le couple nominal et le fonctionnement continu à basse vitesse est impossible en raison de l'échauffement du moteur mal ventilé.

Le couple maximum transitoire du moteur synchrone est nettement plus élevé, ce qui autorise des accélérations et décélérations plus rapides.

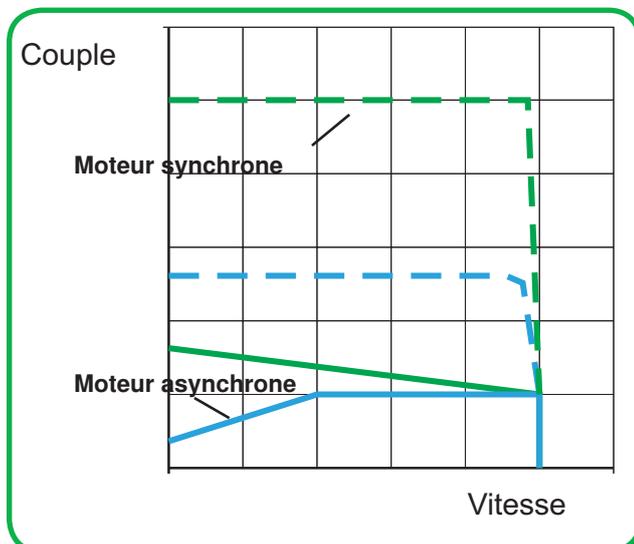
Pour illustrer cet avantage, nous avons pris l'exemple d'une machine fonctionnant selon le cycle reproduit ci-dessous.

Les variateurs de vitesse actuels dotés de contrôle vectoriel de flux, tels que l'Altivar 32 de Schneider Electric, permettent d'utiliser les moteurs asynchrone et synchrone dans des applications de plus en plus exigeantes et dans des plages de vitesse importantes.



Le diagramme qui suit représente à la même échelle les performances de deux moteurs de puissance voisine.

Les caractéristiques de la machine sont les suivantes:



- couple résistant 1,3 Nm,
- vitesse de rotation du moteur 3000 tr/mn
- inertie de la charge ramenée au moteur  $5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ kg}$

Avec ces données, la puissance absorbée est égale à 408 W.

Compte tenu du facteur de marche, dans notre exemple 0,5, nous pouvons choisir un moteur de puissance nominale égale à 350 W.

# Comparaison des moteurs

Nous avons deux choix possibles: un moteur synchrone ou un équivalent asynchrone et notre objectif sera d'obtenir des performances dynamiques sensiblement identiques. Le moteur synchrone retenu dans la gamme de mouvement Lexium est le BMHH0701P. Il peut invariablement être associé à un variateur de vitesse ATV 32H037N4 ou à un servovariateur LXM32•U60N4.

Ses caractéristiques principales sont les suivantes :

<b>Couple nominal</b>	1,1 Nm
<b>Couple crête</b>	4,2 Nm
<b>Puissance nominale</b>	350 W
<b>Vitesse nominale</b>	3000 tr/mn
<b>Inertie</b>	$3,2 \cdot 10^{-4} \text{ kg m}^2$
<b>Masse</b>	1,6 kg

Par le calcul nous obtenons les performances regroupées dans le tableau ci-dessous :

<b>Temps d'accélération</b>	88 ms
<b>Temps de décélération</b>	47 ms
<b>Energie de freinage</b>	40 joules

Pour essayer d'obtenir des performances dynamiques identiques, nous devons choisir un moteur asynchrone permettant de développer un couple crête d'au moins 4,2 Nm avec un variateur de vitesse, mais l'augmentation de l'inertie conduit inévitablement à surdimensionner le moteur. Dans le catalogue Leroy Somer, le moteur qui pourrait convenir est le LS EL 80 L. Avec un variateur de vitesse son couple maximum sera d'environ 8 Nm.

Ses caractéristiques principales sont les suivantes

<b>Couple nominal</b>	3,7 Nm
<b>Couple crête</b>	8 Nm
<b>Puissance nominale</b>	1,1 kW
<b>Vitesse nominale</b>	2877 tr/mn
<b>Inertie</b>	$11 \cdot 10^{-4} \text{ kg m}^2$
<b>Masse</b>	11,3 kg

Par le calcul nous obtenons les performances regroupées dans le tableau ci-dessous:

<b>Temps d'accélération</b>	75 ms
<b>Temps de décélération</b>	54 ms
<b>Energie de freinage</b>	79 joules

Dans la pratique, ce temps d'accélération sera un peu plus long, car cette évaluation ne prend pas compte le temps d'établissement du flux dans la machine, ni la réduction du couple moteur. Il faudra, en effet, l'alimenter à 52 Hz pour le faire tourner à 3000 tr/mn.

Nous pouvons considérer que notre objectif de performance est atteint.

Les variateurs n'étant pas réversibles, l'énergie de freinage est dissipée en intégralité dans une résistance de freinage..

Pour compléter la comparaison, le moteur asynchrone fonctionne à un peu moins du 1/4 sa puissance nominale et son rendement est d'environ 63%. Avec son variateur, le rendement est au mieux de 60%. Celui du moteur synchrone avec son variateur sera, quant à lui, d'environ 88%

L'avantage du moteur synchrone se passe de commentaires. Le tableau ci-dessous regroupe les ratios moteur asynchrone / moteur synchrone.

<b>Augmentation de la puissance nominale</b>	314%
<b>Accroissement de la masse</b>	706%
<b>Augmentation de l'énergie perdue</b>	197 %
<b>Détérioration du rendement</b>	-31%

Nota, la détérioration du rendement ne prend pas en compte l'énergie perdue au freinage.

# Exemple d'application

## Transport de bagages d'aéroport: utilisation d'un moteur synchrone

### DESCRIPTIF

Ce type de convoyeur est utilisé dans les aéroports pour charger les bagages sur un tapis transporteur défilant en continu derrière les comptoirs d'enregistrement.

Durant l'enregistrement des bagages, le transporteur est à l'arrêt. Il est ensuite rapidement mis en mouvement pour déplacer le bagage. Le fonctionnement est par nature discontinu avec des charges pouvant varier de quelques centaines de grammes à 50 kg.

Il est indispensable que la précision d'arrêt soit aussi fidèle que possible quelque soit la charge.

Pour assurer un fonctionnement convenable, le constructeur du convoyeur (Crisplant A/S Danemark) utilise un moteur asynchrone associé à un variateur de vitesse.

La machine est pilotée par un automate programmable qui gère les différents capteurs de position et transmet les consignes de vitesse au variateur.

La solution actuelle ne donne pas entièrement satisfaction, car le démarrage et l'arrêt du convoyeur varient sensiblement entre vide et charge.

### OBJECTIFS DU CONSTRUCTEUR

Le constructeur désire réaliser, sur une machine de test, une comparaison de fonctionnement avec un moteur synchrone sans changer le type de variateur. Le but est d'analyser la consommation d'énergie et la répétabilité des arrêts entre marche à vide et à pleine charge.

### MATÉRIEL

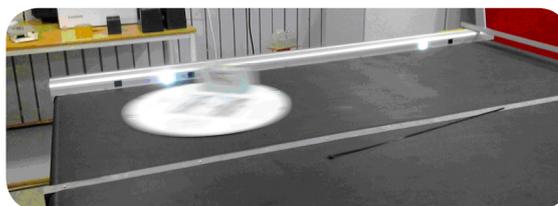
Le matériel est fourni par Schneider Electric.

Les caractéristiques des constituants sont indiquées dans le tableau suivant.

<b>Moteur</b>	<b>BMH1402P06A1A</b>
<b>Inertie</b>	$3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ kg}$
<b>Puissance</b>	4 kW
<b>Tension</b>	460 V
<b>Courant nominal</b>	9,8 A
<b>Vitesse</b>	3500 tr/mn
<b>Variateur de vitesse</b>	<b>ATV32BHU40N4</b>

### CONDITIONS D'ESSAIS

L'essai est conduit sur une machine de test, reproduisant fidèlement les conditions réelles d'utilisation.



La masse placée sur le convoyeur est ajustable jusqu'à 50 kg.

Le convoyeur est accéléré jusqu'à 67 Hz (3500 tr/mm) et arrêté.

Le mouvement est effectué dans les deux sens de déplacement, avant arrière, à vide et en charge.

# Exemple d'application

## DEROULEMENT DES ESSAIS

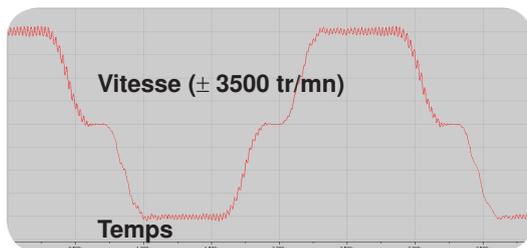
Après introduction des paramètres du moteur, il est procédé au lancement de la séquence d'auto-ajustage du variateur qui permet d'obtenir un réglage rapide et adapté.

Les enregistrements qui suivent représentent la vitesse de la machine en fonction du temps.

Essai à vide:

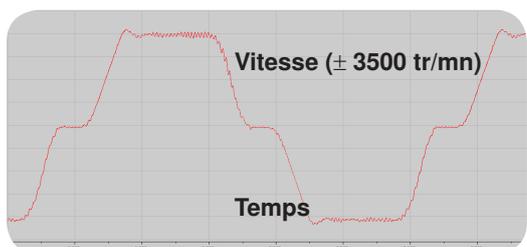
On note une légère oscillation de vitesse sans effet notable sur le déplacement du tapis.

La précision d'arrêt, un des points essentiels, est dans une fourchette de  $\pm 1$  mm



Essai avec une charge de 50kg.

L'oscillation est très fortement réduite, les pentes d'accélération et de décélération sont identiques entre vide et charge. On note un léger dépassement parfaitement acceptable pour le fonctionnement. La précision d'arrêt est dans une fourchette de  $\pm 2$  mm. La différence est insignifiante pour cette application.



Il est certain que l'utilisation d'un servovariateur adapté, de type Lexium 32, assurant l'autopilotage du moteur synchrone aurait donné une précision en position nettement supérieure, mais l'objectif fixé par le client est atteint

## ECONOMIE D'ENERGIE

Les valeurs qui suivent sont données par le constructeur qui a effectué des relevés de consommation sur deux convoyeurs d'un autre type, l'un équipé d'un moteur synchrone, l'autre d'un moteur asynchrone. Les puissances sont identiques (1,5 kW.)

Condition de fonctionnement	Synchrone	Asynchrone	Economie d'énergie
Fonctionnement continu dans une direction	320W	450W	29%
A vide	240 W	340W	29%
10 kg	280W	390W	28%
30 kg	370W	520W	29%
50 kg	460W	640W	28%

Ces relevés mettent en évidence un gain énergétique significatif en faveur du moteur synchrone.

# Conclusion

Dans ce White Paper, nous n'avons examiné que l'aspect d'efficacité de deux moteurs en nous basant seulement sur les différences technologiques.

Du deuxième exemple qui précède, il apparaît que le remplacement d'un moteur asynchrone de 1,5 kW par un moteur synchrone de puissance identique est capable de générer près de 30% d'économie d'énergie.

Ce seul gain permet un retour sur investissement rapide.

En complément, avec l'utilisation d'un variateur spécifique, les performances dynamiques seraient nettement améliorées.

Volontairement, nous n'avons pas évoqué d'autres pistes d'économies qui, selon les applications, peuvent être obtenues par des stratégies de commande ou des calculs de trajectoires entraînant un raccourcissement des cycles de fonctionnement.

Ces processus permettent d'accroître la productivité et de réduire les temps de production, ce qui, par effet domino, conduit, encore, à des gains énergétiques sur l'ensemble de la chaîne.

**Un examen approfondi de la machine, de ses modes de marche et des performances dynamiques est la meilleure démarche pour choisir la technologie de moteur la plus appropriée.**

**Le moteur synchrone permet avec des performances dynamiques supérieures de générer au minimum 20% d'économie d'énergie.**

**Schneider Electric SA**

35 rue Joseph Monier  
F-92500 Rueil Malmaison - France  
Phone: + 33 (0) 1 41 29 70 00  
Fax: + 33 (0) 1 41 29 71 00  
<http://www.schneider-electric.com>



This document has been  
printed on recycled paper