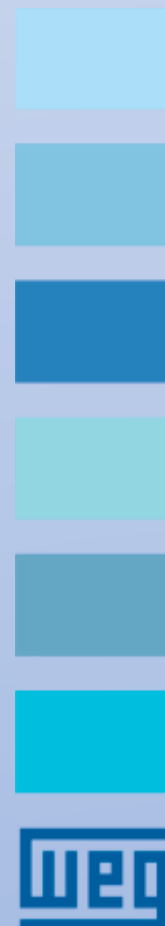


## NOTE D'INFORMATION WEG France N°06/2020



Faire des économies sur votre consommation.  
Comment déterminer les 2 paramètres liés à  
l'efficacité énergétique d'un moteur : rendement  
et charge

---

## NOTE D'INFORMATION SUR LA DETERMINATION DU RENDEMENT ET DE LA CHARGE D'UN MOTEUR ELECTRIQUE

### 1. Rappel théorique

Définition des pertes :

Elles apparaissent lors de la conversion d'énergie électrique en mécanique

Elles s'expriment en Joule :  $\sum \text{pertes} = P_{\text{abs}} - P_{\text{util}}$



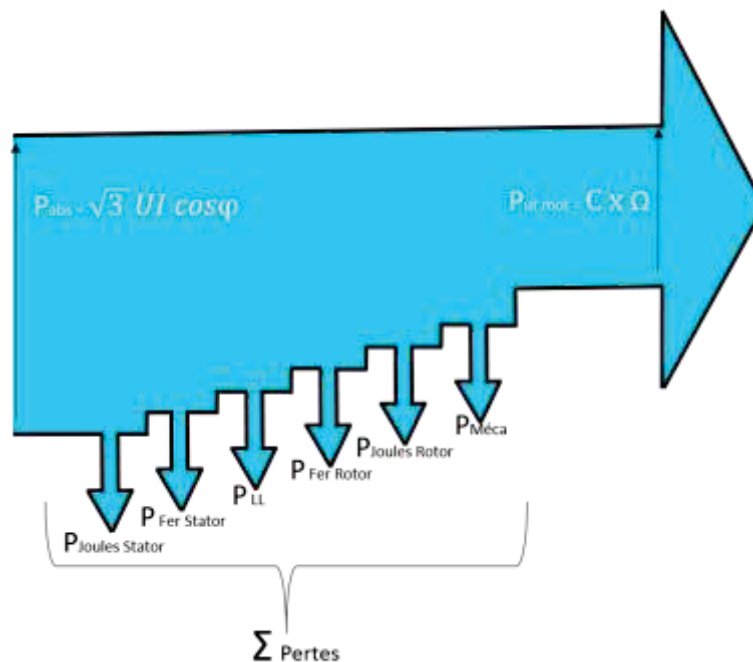
Répartition des pertes d'un moteur WEG W22 P = 30 kW, 4 pôles, IE4

Définition du rendement :

Le rendement d'un moteur est égal au rapport de la puissance utile (puissance mécanique délivrée en bout

d'arbre) sur la puissance absorbée sur le réseau électrique :  $\eta = \frac{P_{\text{ut mot}}}{P_{\text{abs}}} = \frac{P_{\text{abs}} - \sum \text{Pertes}}{P_{\text{abs}}}$ .

Le rendement est donc une grandeur sans unité et peut s'exprimer en %. Cette valeur relative permet de d'avoir une indication sur la performance d'un système ou d'un moteur.



## NOTE D'INFORMATION SUR LA DETERMINATION DU RENDEMENT ET DE LA CHARGE D'UN MOTEUR ELECTRIQUE

Les pertes d'un moteur 30 kW, 4 pôles sont décrites dans le tableau ci-dessous :

<b>Nom</b>	<b>% des pertes totales</b>	<b>Description</b>	<b>Evolution en fonction de la charge</b>	<b>Paramètres</b>
Pjs : Pertes Joule au stator	# 43,7 %	Pertes par effet Joule dans les bobinages statoriques	Variables. Pertes égales à $3/2 RI^2$ . Elles varient en fonction de la charge (proportionnelles au carré du courant).	Résistivité du conducteur utilisé : aluminium, cuivre etc...Section, volume des conducteurs utilisés dans les bobinages statoriques.
Pfe : Pertes fer	# 26,7%	Pertes essentiellement situées au stator et liées au courant induit circulant dans les tôles magnétiques et au cycle d'hystérésis. Energie requise pour la magnétisation du circuit magnétique statorique. Les pertes fer au rotor sont négligeables devant les autres pertes car la pulsation de rotation du champ au rotor est faible devant celle du champ statorique : $\Omega r = g \Omega s$ .	Constantes, indépendantes de la charge. Elles se mesurent à vide.	Perméabilité magnétique des tôles, longueur du circuit magnétique, épaisseur et isolation des tôles.
PLL : Pertes supplémentaires en charge	# 5,67%	Difficilement cernables : flux de fuite induits par les courants de charge et diverses autres pertes mineures. Pertes supplémentaires en charge dans le fer et les autres parties métalliques autres que les conducteurs.	Variables. Elles varient en fonction de la charge.	Conception des encoches, des têtes de bobines, inclinaison des barres rotoriques.
Pjr : Pertes Joule au rotor	# 20,4%	Pertes dissipées dans les barres conductrices du rotor à cage d'écureuil.	Variables	Taille des barres conductrices et des anneaux de court-circuitage de la cage d'écureuil.
Pmec : Pertes mécaniques	# 3,53%	Pertes dues au frottement (palier, roulement) et à la ventilation (frottement visqueux du rotor et du ventilateur mécanique de refroidissement dans l'air)	Constantes, indépendantes de la charge. Elles se mesurent à vide.	Qualité de la lubrification des roulements, forme du ventilateur, débit de l'air.

**Tableau 1 - Bilan des puissances d'un moteur WEG gamme W22 P = 30 kW, 4 pôles**

## NOTE D'INFORMATION SUR LA DETERMINATION DU RENDEMENT ET DE LA CHARGE D'UN MOTEUR ELECTRIQUE

Certaines pertes, telles les pertes par effets Joule et les pertes supplémentaires, sont variables tandis que d'autres sont constantes, la valeur du rendement pourra être différente suivant les valeurs de la charge.

La norme CEI 60034-30 puis ensuite sa dernière révision publiée en 2014 CEI 60034-30 partie 1 a standardisé des classes de rendement International Efficiency : Code IE1 à IE4 pour les moteurs à courant alternatif (mono et triphasés) basse tension (50 à 1000 V) alimentés par le réseau. Cette norme définit les valeurs limites de rendement assigné qui correspond à la valeur indiquée sur la plaque signalétique et la fiche de données pour le point de fonctionnement nominal. Cette classe de rendement IE est définie par la valeur du rendement mesurée à 100% de couple et 100% de la fréquence du réseau électrique.

Le point de fonctionnement du moteur sera défini par l'intersection des deux courbes (moteur et charge).

Malheureusement dans la pratique le moteur ne fonctionne jamais à son de point de fonctionnement nominal théorique et donc son rendement peut varier grandement en fonction de sa charge.

### 2. Problématique sur site et préconisation de la norme CEI 60034-2-1

Certaines méthodes, préconisées par la norme CEI 60034-2-1, sont prévues pour être réalisées en plateforme d'essais mais ne sont pas applicables sur site. Par exemple il n'est pas envisageable de réaliser la méthode de la mesure directe du couple en bout d'arbre moteur lorsque ce dernier est accouplé à sa machine. La difficulté est de trouver une méthodologie qui ne soit pas trop imprécise et tienne compte des contraintes liées à l'utilisation du moteur sur un site de production.

La norme CEI 60034-2-1 fixe les règles de mesure du rendement et des pertes des moteurs. 3 règles peuvent s'appliquer :

- a) La mesure directe est réalisée en charge : la puissance absorbée est mesurée et la puissance utile est déterminée à partir de la vitesse et du couple mesurés en bout d'arbre. Cette méthode est limitée aux petites puissances.
- b) Mesure de la puissance d'entrée et de sortie sur deux machines identiques accouplées mécaniquement en opposition. Cela permet de supprimer la mesure de puissance mécanique difficile à réaliser.
- c) La mesure indirecte (méthode des pertes séparées) : La puissance absorbée est mesurée puis ensuite on détermine la puissance utile en bout d'arbre à partir des pertes du moteur :  
$$P_{\text{ut mot}} = P_{\text{abs}} - (P_{\text{js}} + P_{\text{fe}} + P_{\text{ll}} + P_{\text{jr}} + P_{\text{mec}})$$
. Pour cette dernière méthode il faut déterminer chaque poste de pertes.

Les pertes fer et mécanique sont définies à partir d'essais à vide, il est donc nécessaire de désaccoupler la machine du moteur.

Les pertes dans le bobinage au stator et dans la cage au rotor sont déterminées à partir d'essais en charge pour 6 points de fonctionnement qui sont 125%, 100%, 75%, 50% et 25 % de charge. Pour les puissances élevées ces essais peuvent être réalisés à tension réduite. Cela demande de maîtriser et de mesurer la charge avec du matériel spécifique de manière à reproduire ces charges. Malheureusement sur un site de production cela n'est pas possible.

Les pertes supplémentaires de par leur nature sont plus difficiles à mesurer.

La norme CEI 60034-2-1 définit 3 méthodes préférentielles avec une faible incertitude dans la gamme d'application fournie au tableau 2.

La méthode à utiliser dépend de la nature ou des caractéristiques assignées du moteur en essai.

Malheureusement et pour les raisons précédemment évoquées ces trois méthodes sont quasiment inapplicables pour des essais sur le terrain.

## NOTE D'INFORMATION SUR LA DETERMINATION DU RENDEMENT ET DE LA CHARGE D'UN MOTEUR ELECTRIQUE

Réf	Méthode	Description	Application	Dispositifs requis
2-1-1A	Mesure directe : Puissances entrée- sortie	Mesure du couple	Moteurs monophasés	Dynamomètre pour la pleine charge
2-1-1B	Sommation des pertes : Pertes résiduelles	PLL déterminées à partir des pertes résiduelles	Moteurs triphasés avec puissance de sortie assignée jusqu'à 2 MW	Dynamomètre pour 1,25 x la pleine charge
2-1-1C	Sommation des pertes : Valeur assignée	PLL à partir d'une valeur assignée	Moteurs triphasés avec puissance de sortie assignée supérieure à 2MW	

**Tableau 2 – Méthodes d'essai préférentielles des moteurs asynchrones selon la norme CEI 60034-2-1**

La norme CEI 60034-2-1 préconise d'autres méthodes pour des essais sur le terrain ou individuels de série (voir tableau 3).

Réf	Méthode	Description	Dispositifs requis
2-1-1D	Opposition à double alimentation	Essai en opposition à double alimentation	Ensemble de deux machines identiques pour la pleine charge
2-1-1F	Rotation inverses	PLL à partir de l'essai avec rotor retiré et de l'essai en rotation inverse	Moteur auxiliaire avec puissance assignée jusqu'à 5 x pertes totales
2-1-1G	Eh-star	PLL à partir de l'essai Eh-star	L'enroulement doit être couplé en connexion étoile
2-1-1H	Circuit équivalent	Courants, puissances et glissement à partir de la méthode du circuit équivalent, PLL à partir d'une valeur assignée	

**Tableau 3 – Autres méthodes d'essais pour moteur asynchrones selon la norme CEI 60034-2-1**

Toutes ces méthodes ont l'avantage d'être normalisées. L'inconvénient principal est que leur mise en œuvre sur site est difficile et demande une très grande disponibilité de l'installation ainsi que des moyens de mesures importants. Il faut pouvoir désaccoupler la machine (essai à vide), réaliser des essais à tension variable, pouvoir faire varier la charge du moteur etc....

### 3. Estimation de la charge réelle du moteur sur site

Il existe des méthodes plus faciles à appliquer sur site pour estimer le rendement du moteur. Il ne faut pas oublier qu'il existe une corrélation entre rendement et charge du moteur.

#### 3.1. L'importance de déterminer au préalable la charge du moteur :

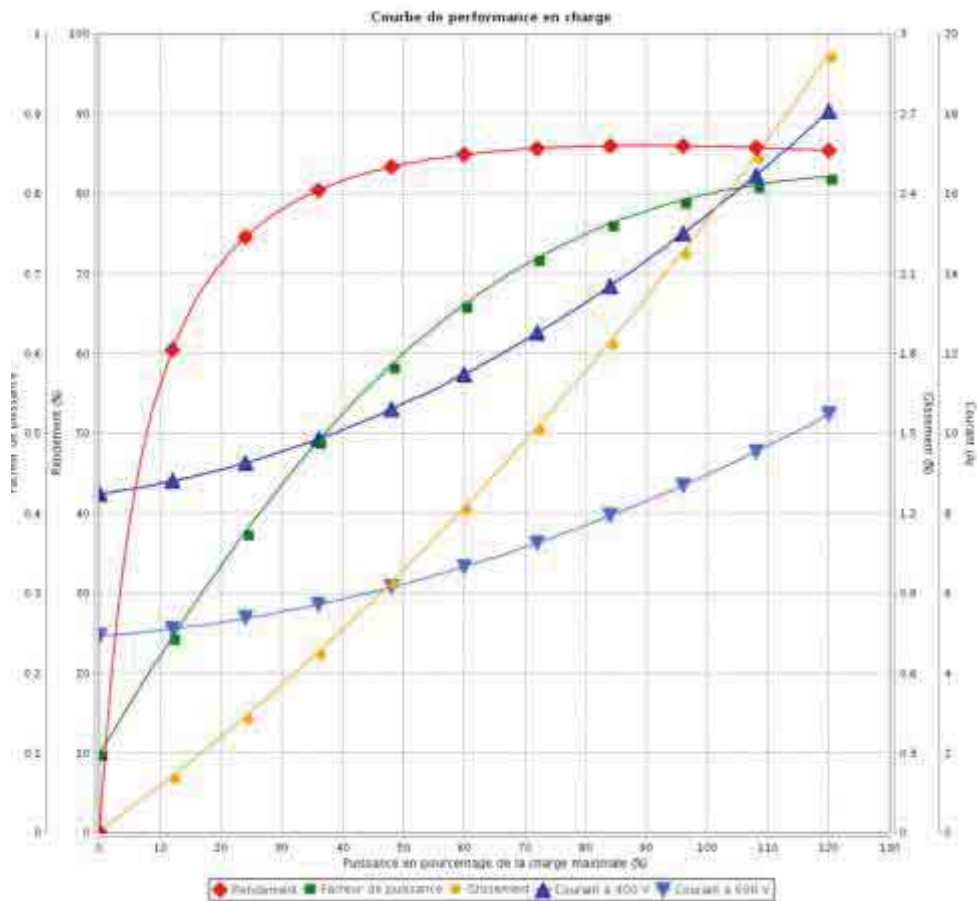


Figure 1 - Courbes de performance en charge d'un moteur asynchrone

La courbe de rendement en rouge de la figure 1 montre que le rendement optimal est atteint entre 75 et 90% de la charge nominale. Dans l'exemple ci-dessus l'efficacité énergétique du moteur décroît de manière significative en deçà des 50 % de charge. De même que la surcharge du moteur entraîne également, outre un échauffement exagéré et une diminution de la durée de vie, une baisse du rendement. Autre phénomène à souligner : la sous charge du moteur entraîne la chute du facteur de puissance et donc l'augmentation de l'énergie réactive. Cet exemple nous montre qu'un moteur efficient est un moteur convenablement dimensionné. La dernière génération de moteurs asynchrones W22 présente en règle générale un niveau de rendement maximum entre 75 et 100 % de la charge. Cela permet d'avoir un moteur efficient jusqu'à 70% de la charge nominale. Avec l'évolution des technologies la R&D de WEG a permis d'avoir sur certains modèles des rendements optimisés jusqu'à 50% de charge ! cette performance reste exceptionnelle et n'est pas la règle des moteurs fabriqués il y a encore quelques années.

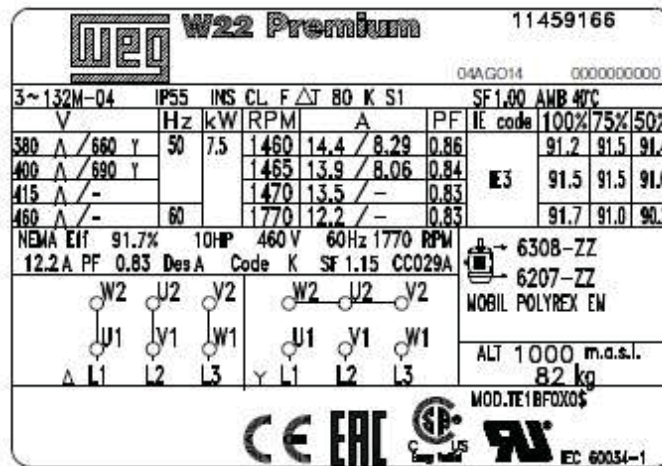
L'estimation de la charge du moteur permettra dans le cadre d'un audit énergétique de déterminer le

## NOTE D'INFORMATION SUR LA DETERMINATION DU RENDEMENT ET DE LA CHARGE D'UN MOTEUR ELECTRIQUE

rendement réel du moteur et sera également avec le temps de fonctionnement l'un des paramètres significatifs pour décider de son changement éventuel avec un moteur neuf convenablement dimensionner.

### 3.2. Comment déterminer la charge partielle d'un moteur sur site :

Lors de l'audit énergétique d'un moteur il est important de lire sa plaque signalétique et/ou récupérer toutes informations techniques sur les fiches de données relatives à ses performances.



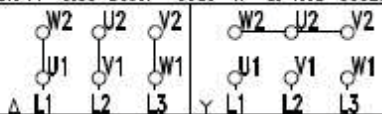

3~132M-04		IP55	INS	CL	F	ΔT	80	K	S1	SF1.00	AMB	40C
V	Hz	kW	RPM	A	PF	IE	code	100%	75%	50%		
380 Δ / 660 Y	50	7.5	1460	14.4 / 8.29	0.86	IE3		91.2	91.5	91.4		
400 Δ / 690 Y			1465	13.9 / 8.06	0.84			91.5	91.5	91.0		
415 Δ / -			1470	13.5 / -	0.83							
460 Δ / -	60		1770	12.2 / -	0.83			91.7	91.0	90.2		
NEMA EFF 91.7% 10HP 460V 60Hz 1770 RPM										6308-ZZ		
12.2A PF 0.83 Des A Code K SF 1.15 CC029A										6207-ZZ		
										MOBIL POLYREX EM		
										ALT 1000 m.a.s.l.		
										82 kg		
										MOD. TE1BFDX05		
										EC 60034-1		

Figure 2 – Plaque signalétique

Pour comparer les coûts de fonctionnement liés à la consommation électrique du moteur en fonctionnement avec ceux d'un moteur neuf de remplacement vous devez déterminer le nombre d'heures de fonctionnement, les valeurs de rendement et la charge. La charge partielle est une valeur relative utilisée pour décrire la charge réelle du moteur par rapport à la charge nominale du moteur qui est définie au point de fonctionnement assigné.

Les charges partielles peuvent être estimées à partir de la mesure de puissance absorbée sur le réseau du moteur, de l'intensité ou de la vitesse. Nous abordons ci-après ces trois méthodes d'estimation de la charge réelle du moteur.

#### 3.2.1. 1<sup>ère</sup> méthode : Mesure de la puissance absorbée en entrée par le moteur

Lorsque que cette mesure est réalisable cette méthode sera privilégiée pour calculer la charge réelle  $CH_{réelle}$ .

$$P_{abs} = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos \varphi \text{ où}$$

$P_{abs}$  est la puissance absorbée triphasée

$U$  est la valeur moyenne des 3 tensions efficaces entre phase

$I$  est la valeur moyenne du courant efficace dans chaque phase

$\cos \varphi$  est le facteur de puissance

## NOTE D'INFORMATION SUR LA DETERMINATION DU RENDEMENT ET DE LA CHARGE D'UN MOTEUR ELECTRIQUE

Ensuite il faut calculer la puissance absorbée pour la charge nominale du moteur  $P_{absn}$  à partir de la lecture de la plaque signalétique du moteur.

$$P_{absn} = \frac{P_{plaquée}}{\eta} \text{ où}$$

$P_{plaquée}$  est la puissance utile mécanique nominale indiquée sur la plaque signalétique  
 $\eta$  est le rendement nominal du moteur indiqué sur la plaque signalétique ou dans les fiches de données du moteur.

Ensuite la charge réelle du moteur  $CH_{réelle}$  est égale à :

$$CH_{réelle} = \frac{P_{abs}}{P_{absn}} \times 100\%$$

### 3.2.2. 2<sup>ème</sup> méthode : Mesure des intensités en ligne

Cette méthode s'applique lorsque seules sont disponibles les mesures d'intensité.

L'imprécision de cette méthode provient du fait que le courant évolue linéairement jusqu'à 50 % de la charge nominale. Pour des charges plus faibles le courant devient un indicateur moins fiable du fait du courant magnétisant.

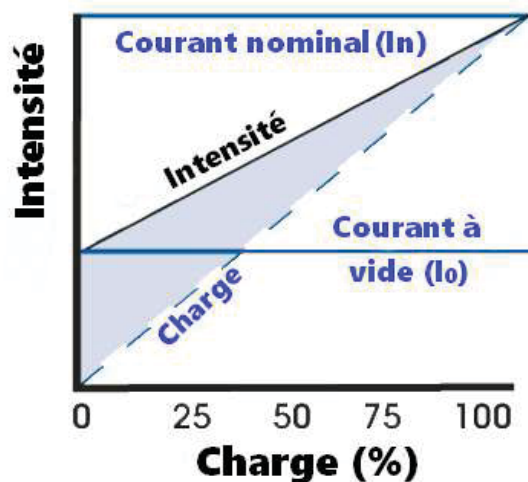


Figure 3 – Evolution du courant en fonction de la charge

La figure 3 est une représentation théorique de l'évolution de l'intensité en fonction de la charge bien qu'au-delà de 50 % de charge, l'intensité du moteur soit approximativement linéaire la relation n'est pas directement proportionnelle. En effet pour 50 % de charge vous n'aurez pas 50 % du courant nominal ( $I_n$ ) mais une valeur supérieure. Cela provient du fait que pour 0% de charge vous avez un courant à vide  $I_0$  qui n'est pas nul. Afin d'améliorer la précision de l'estimation de la charge il est recommandé d'utiliser une interpolation linéaire entre la valeur de l'intensité à mi-charge et celle à pleine charge ( $I_n$ ). Vous pouvez obtenir la valeur du courant à 50% de charge dans les documents techniques du moteur, vous aurez la valeur de  $I_n$  en lisant la plaque signalétique. Ces valeurs de courant assignées sont données pour la tension nominale du moteur, les valeurs d'intensité mesurées doivent être corrigées par rapport à la valeur réelle de la tension lors de la mesure. L'équation de la charge réelle du moteur devient pour cette méthode :

$$CH_{réelle} = 0,5 + 0,5 \left( \frac{I_{mesurée} \times \left( \frac{U_{mesurée}}{U_{n\text{ plaquée}}} \right) - I_{50\% \text{ de charge}}}{I_n \text{ plaquée} - I_{50\% \text{ de charge}}} \right) \times 100\%$$



## NOTE D'INFORMATION SUR LA DETERMINATION DU RENDEMENT ET DE LA CHARGE D'UN MOTEUR ELECTRIQUE

$U_{mesurée}$  est la valeur moyenne des 3 tensions efficaces mesurées entre phase

$I_{mesurée}$  est la valeur moyenne du courant efficace mesurée dans chaque phase

$U_{n\text{ plaquée}}$  est la valeur de la tension nominale notée sur la plaque signalétique

$I_{n\text{ plaquée}}$  est la valeur du courant nominal notée sur la plaque signalétique

$I_{50\% \text{ de charge}}$  est la valeur du courant à 50% de charge notée dans la fiche de données ou qui est communiquée par le fabricant du moteur.

Dans la pratique pour les faibles charges inférieures à 50% le courant n'évolue plus linéairement. Dans cette zone, la méthode de détermination de la charge par mesure de courant devient trop imprécise pour être utilisée.

### 3.2.3. 3<sup>ème</sup> méthode : Mesure de la vitesse, méthode dite « du glissement »

Cette méthode permet d'avoir une estimation de la charge du moteur par mesure de la vitesse de ce dernier. La vitesse de synchronisme dépend du nombre de pôles et de la fréquence du réseau électrique. Le tableau 4 indique pour les réseaux 50 et 60 Hz les vitesses de synchronismes les plus usitées.

Nombre de pôles	Vitesse de synchronisme $N_s$ (rpm)	
	50 Hz	60 Hz
2	3000	3600
4	1500	1800
6	1000	1200
8	750	900
10	600	720
12	500	600

**Tableau 4 – Vitesse de synchronisme des moteurs**

Quelques formules :

$$N_s = \frac{f}{p}$$

$N_s$ : Vitesse de synchronisme (Tours/seconde)

$f$ : fréquence du réseau électrique en Hertz

$p$ : nombre de paires de pôles

La vitesse réelle d'un moteur asynchrone  $N$  est inférieure à sa vitesse de synchronisme  $N_s$ .

La différence relative entre la vitesse de synchronisme et la vitesse réelle du moteur est le glissement  $g$ .

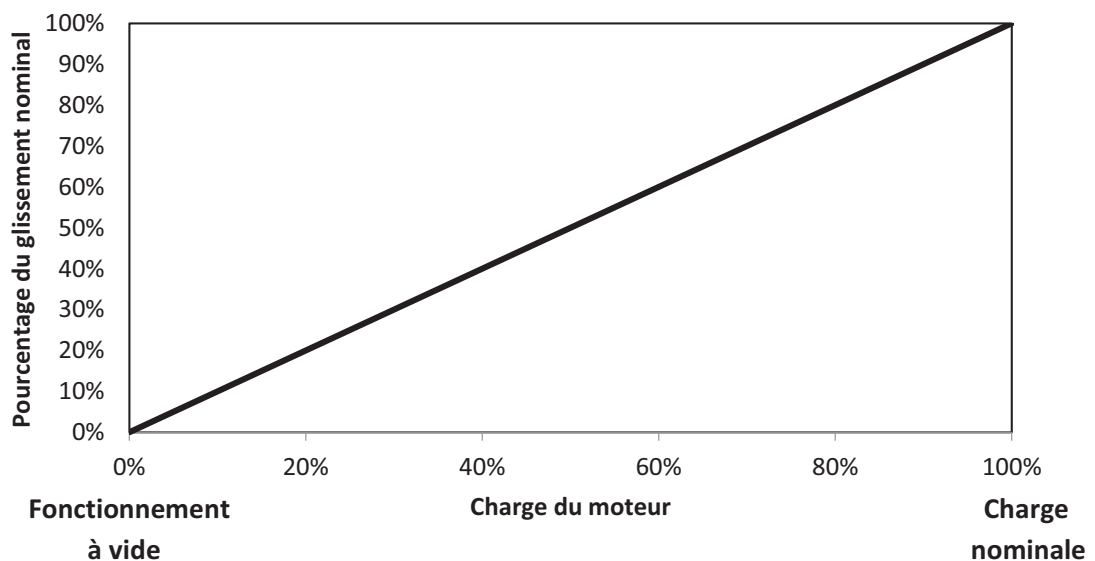
$$g \text{ en } \% = \frac{N_s - N}{N_s} \times 100\%$$

## NOTE D'INFORMATION SUR LA DETERMINATION DU RENDEMENT ET DE LA CHARGE D'UN MOTEUR ELECTRIQUE

En utilisant un tachymètre pour mesurer la vitesse du moteur il est possible d'estimer la charge du moteur.

Donc pour 100% de la charge le glissement est égal à 100% du glissement nominal du moteur. 0% de charge correspond à un glissement égal à 0% du glissement nominal en effet lorsqu'il n'y a pas de charge couplée au moteur on considère que sa vitesse de rotation  $N$  est égale à la vitesse de synchronisme  $N_s$ .

La droite de la figure 5 montre que le glissement est proportionnel à la charge du moteur.



**Figure 4 – Glissement en fonction de la charge du moteur**

Cette méthode est assez imprécise, la plus grande incertitude provient de la tolérance de  $\pm 20\%$  octroyée par la norme CEI 60034-1 sur la valeur du glissement nominal et donc de la vitesse nominale.

Une autre incertitude est liée à la tension d'alimentation dont la tolérance admise est égale à  $\pm 10\%$ , le glissement est inversement proportionnel au carré de la valeur de la tension. La mesure de la tension moyenne  $U_{mesurée}$ , la valeur moyenne des 3 tensions efficaces mesurées entre les 3 phases, est recommandée et permet d'avoir un facteur de correction comme il est indiqué dans la formule suivante de la charge réelle :

$$CH_{réelle} = \frac{N_s - N}{N_s - N_{n\text{ plaquée}}} \times \left( \frac{U_{n\text{ plaquée}}}{U_{mesurée}} \right)^2 \times 100\%$$

Cette méthode du glissement a le mérite de la simplicité mais malheureusement elle est assez imprécise et ne peut donner qu'une indication de la charge si les autres méthodes ne peuvent être appliquées.

### 4. Détermination du rendement du moteur

Le rendement du moteur à la charge réelle partielle est égal à :

$$\eta_{réel} = \frac{P_{plaquée} \times CH_{réelle}}{P_{abs}} \text{ où}$$

$P_{plaquée}$  est la puissance utile mécanique nominale indiquée sur la plaque signalétique.

$CH_{réelle}$  est la charge réelle du moteur lors de la mesure

$P_{abs}$  est la puissance absorbée triphasée

La détermination du rendement à charge partielle nécessite d'avoir la valeur du rendement nominal du moteur et celle de la puissance utile. En principe la lecture de la plaque signalétique permet d'avoir la valeur de la puissance utile et depuis quelques années celle du rendement nominal. A partir de ces informations et de la charge il est possible de calculer le rendement à charge partielle à partir de la formule ci-dessus.

Par contre si le rendement n'est pas indiqué sur la plaque signalétique il faut obtenir la valeur du rendement à charge nominal. Pour ce faire vous pouvez contacter WEG qui, à partir du numéro de fabrication, pourra retrouver les principales caractéristiques du moteur.

Une autre problématique peut se poser pour des moteurs anciens qui ont eu un ou plusieurs rebobinages. Lorsque le moteur est rebobiné le stator est passé au four afin de casser les vernis isolants. Si cette opération n'est pas maîtrisée et n'est pas réalisée dans les règles de l'art la chaleur du four peut altérer les propriétés ferromagnétiques des tôles du circuit magnétique. Dans ce cas on estime que les petits moteurs de puissance inférieure ou égale à 30 kW perdent 1 à 2 points de rendement à chaque passage au four. Cette perte de rendement est estimée à 1 % pour les moteurs dont la puissance excède les 30 kW.

### 5. Dimensionnement des moteurs électriques

Lorsque vous avez déterminé la charge de votre moteur, il faut, le cas échéant, après un calcul d'une puissance permettant une meilleure charge, procéder au changement du moteur. La puissance nominale d'un moteur est une valeur assignée qui définit le couple de puissance utile disponible en bout d'arbre.

Par défaut les caractéristiques d'un moteur sont fournies par son constructeur pour une utilisation continue permettant d'atteindre l'équilibre thermique (Service S1). Par exemple un moteur de 2,2 kW pourra effectivement fournir cette puissance mécanique en fonctionnement permanent et à charge constante sans échauffement excessif préjudiciable à sa durée de vie.

Par contre, si la même charge est entraînée avec de nombreuses accélérations et freinages, le moteur risque d'être prématurément détérioré suite à un échauffement excessif. Afin de dissiper correctement l'énergie calorifique, il faudra, dans ce cas choisir un moteur de puissance supérieure à 2,2 kW.

Par contre si le moteur entraîne une charge de 1,5 kW sur une durée très courte avec très peu de démarrages horaires et/ou des temps de démarrages courts, le moteur aura suffisamment de temps pour se refroidir entre chaque cycle. Le moteur sera dimensionné avec un modèle de puissance inférieure à 2,2 kW.

Le calcul de la puissance équivalente en service S1 permet de déterminer le moteur.

Pour rappel la définition du service S1 est selon la norme CEI 60034-1 :

## NOTE D'INFORMATION SUR LA DETERMINATION DU RENDEMENT ET DE LA CHARGE D'UN MOTEUR ELECTRIQUE

Fonctionnement à charge constante maintenue pendant une durée suffisante pour que la machine atteigne l'équilibre thermique (voir figure 5).

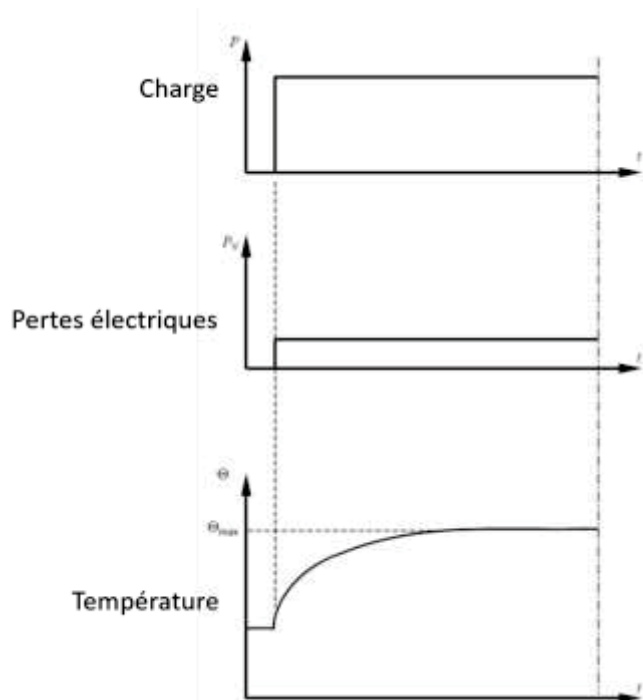


Figure 5 - Service S1 – Service continu

L'utilisation réelle d'un moteur diffère bien souvent des types de service S1 à S10 décrits au préalable car la puissance requise  $P$  ou le couple résistant et donc l'intensité  $I$  ne sont pas constantes. Etant donné que les pertes électriques  $P_v$  évoluent comme le carré de la charge, il est possible de remplacer les valeurs unitaires (puissances, couples et intensités) par une puissance moyenne.

**Le dimensionnement sera fonction du type de service et des caractéristiques liées à la charge.**

Pour le service S1 la définition du moteur est simple : la charge est constante et maintenue jusqu'à ce que le moteur atteigne l'équilibre thermique. Le facteur de marche est égal à 1,  $n$  (nombre de démarrages) est par défaut celui exigé par la norme CEI 60034-12 à savoir : 2 démarrages consécutifs à partir de l'état froid (avec retour à l'arrêt entre les deux démarrages), 1 démarrage à chaud (avec les bobinages à température stabilisée de fonctionnement). Pour les autres services cela est plus complexe, selon le type de service une augmentation ou une diminution de la puissance en S1 sera possible.

### 5.1. Méthodologie pour les charges variables et vitesse fixe

Dans le cas d'un moteur dont la charge est variable il faut déterminer le niveau moyen de cette charge.

#### **Puissance équivalente :**

Dans le cas d'un régime de fonctionnement avec un moteur entraînant des charges variables bien définies et répétitives il faut définir la puissance moyenne quadratique ou valeur efficace (RMS) de la puissance (Services S6 ou S10).

Si la puissance absorbée par la machine est variable au cours d'un cycle, on détermine la puissance moyenne efficace  $P_e$  par la relation :

## NOTE D'INFORMATION SUR LA DETERMINATION DU RENDEMENT ET DE LA CHARGE D'UN MOTEUR ELECTRIQUE

$$Pe^2 = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^t P(t)^2 \Delta t$$

$Pe$  : Puissance utile équivalente du moteur

$P(t)$  : Puissance variable dans le temps absorbée par la charge et  $T$  : Durée totale du cycle

Cette méthode se base sur le fait que la charge réellement appliquée au moteur provoque la même contrainte thermique qu'une charge équivalente générée par une puissance moyenne  $Pe$  délivrée en continu.

Service périodique à charge variable et vitesse fixe :

La figure 6 représente un cycle type d'un tel fonctionnement.

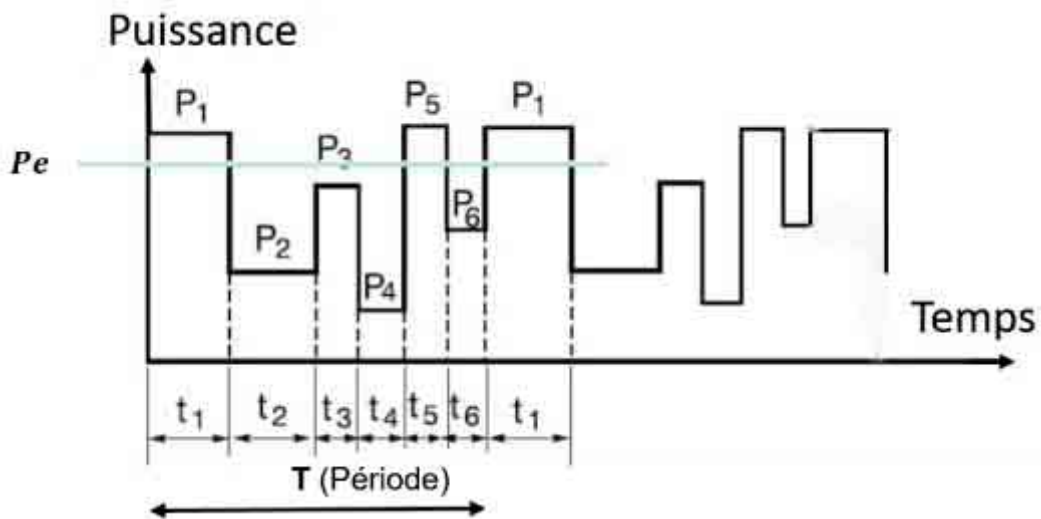


Figure 6 – Cycle de fonctionnement à charge variable

Le moteur peut fournir occasionnellement plus ou moins de puissance.

$$Pe = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + P_3^2 \cdot t_3 + P_4^2 \cdot t_4 + P_5^2 \cdot t_5 + P_6^2 \cdot t_6}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6}}$$

Exemple numérique :

$$P_1 = 2,3 \text{ kW} ; t_1 = 8 \text{ s} - P_2 = 0,9 ; t_2 = 8 - P_3 = 1,7 ; t_3 = 4$$

$$P_4 = 0,5 ; t_4 = 4 - P_5 = 2,3 ; t_5 = 8 - P_6 = 1,3 ; t_6 = 4$$

On obtient une puissance moyenne équivalente  $Pe$  en service S1

$$Pe = \sqrt{2,79} = 1,67 \text{ kW}$$

Conditions de validité du calcul de  $Pe$  :

- La puissance maximale du cycle n'excède pas 2 fois la puissance moyenne :  $\frac{P_i}{Pe} \leq 2$ .
- Valable pour des charges de faible inertie : pompe, vis...  $t_d \leq 5$  secondes
- Le couple accélérateur reste toujours suffisant pendant le démarrage pour démarrer la charge.

## 6. Calcul des économies d'énergie et du ROI

Une fois que le nouveau moteur a été défini avec un niveau de rendement supplémentaire et éventuellement une nouvelle puissance optimisée, vous pouvez estimer les économies d'énergies et financières.

Une première formule permet de calculer l'économie sur la puissance :

$$(1) \quad Economies \text{ en } kW = \frac{CH_{réelle \text{ MotorOld}}}{100} \times \frac{P_{plaquée \text{ MotorOld}}(kW)}{\left(\frac{\eta_{réel \text{ MotorOld}}}{100}\right)} - \frac{CH_{réelle \text{ MotorNew}}}{100} \frac{P_{plaquée \text{ MotorNew}}(kW)}{\left(\frac{\eta_{réel \text{ MotorNew}}}{100}\right)}$$

$CH_{réelle \text{ MotorOld}}$  : Charge en % du moteur en place

$CH_{réelle \text{ MotorNew}}$  : Charge en % du moteur de remplacement

$P_{plaquée \text{ MotorOld}}$  : Puissance utile plaquée en kW du moteur en place

$P_{plaquée \text{ MotorNew}}$  : Puissance utile plaquée en kW du moteur de remplacement

$\eta_{réel \text{ MotorOld}}$  : Rendement en % au point de fonctionnement réel de l'ancien moteur

$\eta_{réel \text{ MotorNew}}$  : Rendement en % au point de fonctionnement réel du nouveau moteur (Assimilable au rendement nominal après dimensionnement correct).

La deuxième formule sert à estimer l'énergie économisée annuellement :

$$(2) \quad Energie \text{ économisée } (kWh/an) = Economies \text{ en } kW \times Nb \text{ de jours} \times Nb \text{ d'heures par jour}$$

$Nb \text{ de jours}$  : Nombre de jours de fonctionnement dans une année

$Nb \text{ de d'heures par jour}$  : Nombre d'heures de fonctionnement journalier

La troisième formule permet le calcul de l'économie financière annuelle :

$$(3) \quad \text{€}_{annuelle} (\text{€}/an) = Energie \text{ économisée } (kWh/an) \times Coût \text{ de l'énergie } (\text{€}/kWh)$$

Enfin la quatrième et dernière formule permet de calculer le retour sur investissement (ROI) :

$$(4) \quad ROI \text{ (années)} = \frac{\text{€}_{\text{MotorNew}} + \text{€}_{\text{instMotorNew}} - \text{€}_{\text{prime}}}{\text{€}_{\text{annuelle}}}$$

$\text{€}_{\text{MotorNew}}$  = Coût à l'achat du nouveau moteur

$\text{€}_{\text{instMotorNew}}$  = Coût de l'installation et montage du nouveau moteur et éventuellement démontage de l'ancien

$\text{€}_{\text{prime}}$  = Prime suite à certificat d'économie d'énergie (CEE)