Introduction

Le moteur asynchrone est actuellement le moteur électrique dont l'usage est le plus répondu dans l'industrie. Son principal avantage réside dans l'absence de contacts électrique glissants ce qui conduit a une structure simple est robuste facile a construire. Son domaine de puissance va de quelque watts a plusieurs mégawatts, relie directement au réseau industriel a tension et fréquence constantes.

Le terme asynchrone provient de fait que la vitesse du rotor et la vitesse du champ magnétique tournant ne sont pas égale, le moteur asynchrone est dite a induction puisque l'énergie transférée du stator au rotor ou du rotor au stator se par induction électromagnétique. Ces machines couvèrent l'essentiel de besoins de la transformation énergie électrique en énergie mécanique.

En effet, plus de la moitié de l'énergie électrique produite dans les pays industrialisés est transformée en énergie mécanique, par des moteurs. La plupart de ceux-ci appartiennent à l'un des types suivants : à courant continu, asynchrone, synchrone, à courant alternatif à collecteur. On estime généralement que les moteurs asynchrones représentent 70 % de la puissance installée, et qu'ils absorbent 40 à 50 % de l'énergie totale consommée, [1].

Avec l'augmentation continue du coût de l'énergie et de la pression causée par le souci de la protection de l'environnement, les fabricants des machines électriques ainsi que les consommateurs s'intéressent à la réduction de la consommation d'énergie des systèmes électriques. Ce qui conduit au lancement d'importants travaux à travers le monde, particulièrement pour l'amélioration du rendement des machines asynchrones. Cela est principalement due à la place qu'elles occupent, [2].

Dans les dernières décennies, une nouvelle génération des moteurs sont proposés sur le marché mondial, sont connues sous le nom moteur de rendement élevé (Hi-E-M) ou comme moteurs efficaces d'énergie (E-E-Ms). Ces nouveaux types de moteurs sont plus chers que les classiques, dans la gamme de 20-40%, de plus grand à la gamme inférieure de puissance respectivement. L'utilisation de cette nouvelle génération des moteurs électriques et leur dépendance d'exploitation annuelle mènent, en particulier, pour des investissements lourds, à un amortissement plus rapide dans certains cas moins de deux ans, [3].

Dans cette partie, on présentera le moteur asynchrone et asynchrone à haut rendement et leur caractéristique, la procédure d'économies d'énergie, en suite on situera les méthodes d'évaluation, les normes les plus usagées pour déterminer le rendement après on terminera par les possibilités de l'augmenter .

I. Généralités

I.1. Rôle

Dans les machines électriques peuvent être trouvées deux catégories:

- Générateurs : qui transforment l'énergie mécanique en énergie électrique.
- Moteurs : qui transforment l'énergie électrique en énergie mécanique.

Le moteur asynchrone est une machine transformant l'énergie électrique apportée par le courant alternatif monophasé ou triphasé en énergie mécanique. C'est un convertisseur d'énergie ; Il est caractérisé par des grandeurs d'entrées qui sont électriques et des grandeurs de sorties qui sont mécaniques, [4].

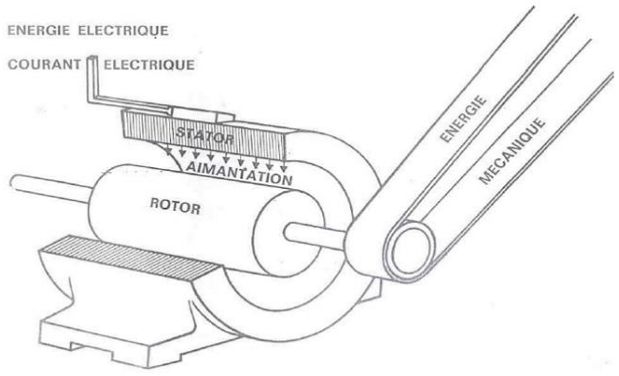


Figure I.1: Rôle de la machine asynchrone, [4].

I.2. Constitution de la machine asynchrone

La machine à induction comprend un stator et un rotor constitués de tôles d'acier au Silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements. Le stator est fixe; on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor est monté sur un axe de rotation sur lequel sont placés les enroulements qui seront accessibles de l'extérieur, [5].

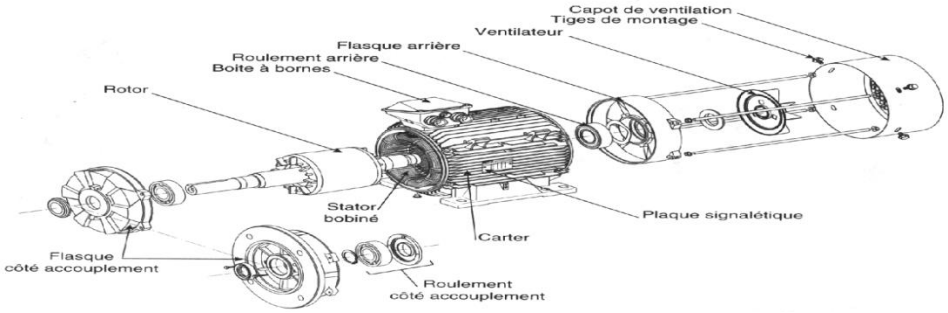


Figure I.2 : Les différents éléments d'un moteur asynchrone.

On classe les différentes pièces rencontrées dans toutes machines tournantes selon les trois grandes fonctions réalisées.

I.2.1. Rôles des organes

1. *Organes électriques*
   a) produire le flux électromagnétique (champ tournant);
   b) assurer la continuité de l'énergie entre le réseau et la machine;
2. *Organes magnétiques*
   a) canaliser le flux électromagnétique avec un minimum de pertes;
3. *Organes mécaniques*
   a) D'assurer la transmission de l'énergie mécanique;
   b) D'assurer le support et le guidage des masses tournantes;
   c) D'assurer la protection des parties actives;
   d) D'assurer la fixation de la machine;

Ces différents organes peuvent être regroupés en 2 parties :

- ✓ La partie fixe : Le stator
- ✓ La partie mobile : le rotor

I.2.2. Stator

Le stator de la machine asynchrone est constitué de tôles d'acier dans lesquelles sont placés les bobinages statoriques. Ces tôles sont pour les petites machines, découpées en une seule pièce alors qu'elles sont pour les machines de puissance plus importante, découpées par sections. Elles sont habituellement recouvertes de vernis pour limiter l'effet des courants de Foucault. Au final, elles sont assemblées les unes aux autres à l'aide de boulons ou de soudures pour former le circuit magnétique statorique. Une fois cette étape d'assemblage terminée, les enroulements statoriques sont placés dans les encoches prévues à cet effet. Ces enroulements peuvent être insérés de manière imbriqués, ondulés ou encore

concentriques. L'enroulement concentrique est très souvent utilisé lorsque le bobinage de la machine asynchrone est effectué mécaniquement. Pour les grosses machines, les enroulements sont faits de méplats de cuivre de différentes sections insérés directement dans les encoches. L'isolation entre les enroulements électriques et les tôles d'acier s'effectue à l'aide de matériaux isolants qui peuvent être de différents types suivant l'utilisation de la machine asynchrone. Le stator d'une machine asynchrone est aussi pourvu d'une boîte à bornes à laquelle est reliée l'alimentation électrique.



Figure I.3 : Photo du stator d'une machine asynchrone.

Le choix du type d'encoches pour une machine dépend de la tension de service de la puissance et du type de bobinage, [4].

Le stator des petites et moyennes machines, à basse tension, est exécuté avec des encoches Trapézoïdales semi-ouvertes. Ce type d'encoches est d'assurer une meilleure insertion des conducteurs et obtenir un meilleur coefficient de remplissage de l'encoche. Les bobine sont formés sur gabarit.

Les encoches de type ouvert sont généralement utilise pour les machines de grande puissance ou l'enroulement sont constitués de barres de couvres, [6].



Figure I.4 : Encoche ouverte (avec l'espace pour la clavette) et semi-ouverte trapézoïdale, [7].

I.2.3. Rotor

Le rotor du moteur asynchrone n'est fixé à aucune alimentation électrique. Il est constitué de conducteurs en court-circuit qui sont parcourus par des courants induits : les courants

rotoriques. Ces conducteurs peuvent être constitués par un ensemble de bobinages (Rotor bobiné) ou bien une cage d'écureuil, [4].

a. Rotor Bobiné

Les enroulements rotoriques sont localisés dans les encoches situées à la périphérie du rotor. Ces enroulements sont bobinés de manière à obtenir un enroulement triphasé à « p » paires de pôle. Les bobinages rotoriques sont toujours couplés en étoile, et les trois bornes accessibles sont reliées à la carcasse du stator à l'aide d'un système constitué de trois bagues tournants et de trois balais fixes, [4].

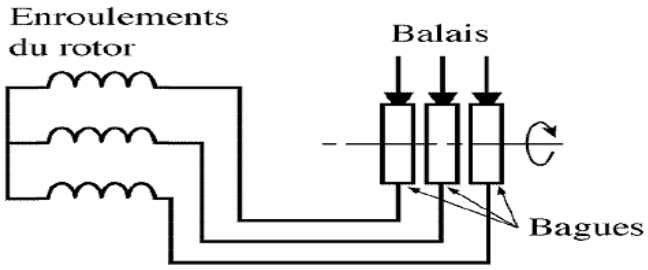


Figure I.5 : Rotor bobiné, [4].

b. Rotor à cage

La grande majorité des moteurs sont à cages. Dans chaque encoche rotorique est placée une barre. Ces barres sont en cuivre pour les moteurs de forte puissance, et en alliage d'aluminium pour les machines de faible et moyenne puissance. Elles sont réunies à chaque extrémité du rotor par des anneaux réalisant le court-circuit. L'enroulement rotorique ainsi réalisé n'est pas accessible à partir du stator, [4].

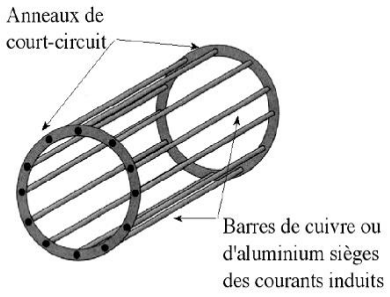


Figure I.6 : Rotor à cage d'écureuil, [4].

✓Classification des moteurs à cage d'écureuil

Selon le critère de la NEMA (www.nema.org), on peut classifier les moteurs à cage d'écureuil selon la variation de la résistance et de la réactance des enroulements du rotor. Au démarrage, la réactance d'un conducteur est d'autant plus grande que ce dernier est loin de l'entrefer. La résistance dépend de la longueur du rotor, de la section des conducteurs et du matériau utilisé. Plus cette résistance est grande, plus le courant de démarrage est grand, selon NEMA, on peut classifier le moteur asynchrone comme suit, [7]:

Classe A: Moteurs à couple normal et à courant de démarrage normal;
Classe B: Moteurs à couple normal et à faible courant de démarrage;
Classe C: Moteurs à fort couple et à faible courant de démarrage;
Classe D: Moteurs à fort glissement;
Classe F: Moteurs à faible couple et à faible courant de démarrage;

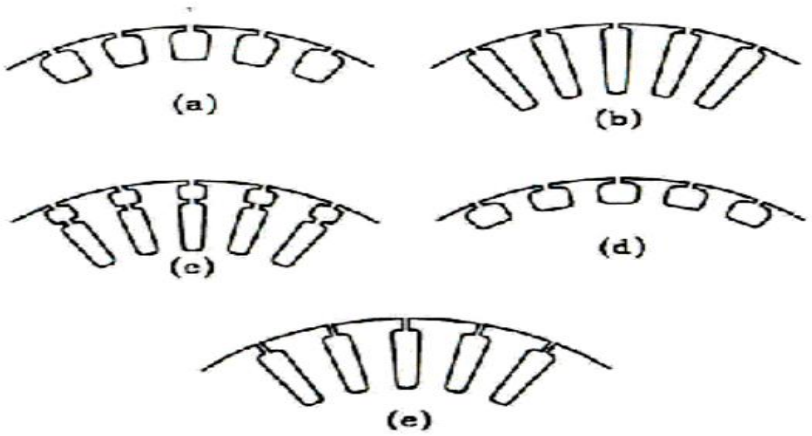


Figure I.7 : Les différents types d'encoches rotorique. Classement de la NEMA, [4].

De ce classement on peut déduire que le choix d'une encoche appropriée nous aide à donner au moteur les caractéristiques souhaitées. Il existe cependant des configurations plus complexes que celles que nous venons de voir, [7].

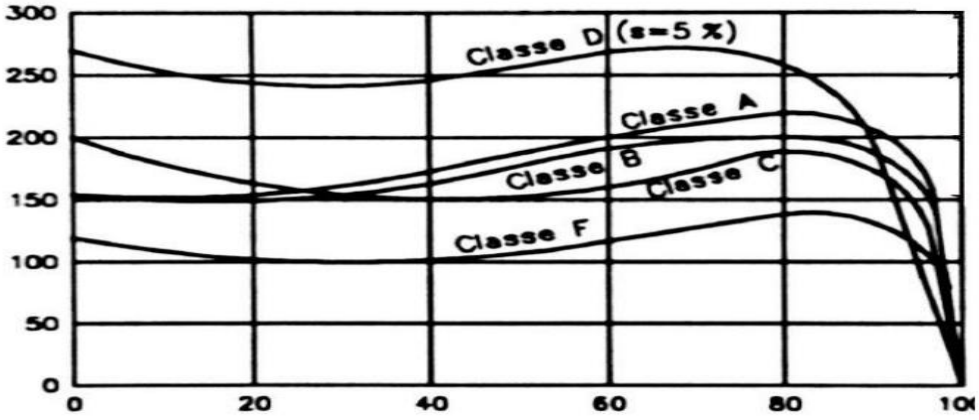


Figure I.8 : Courbes couple/vitesse en fonction de la classe du moteur, [8].

I.2.4. Bobinage

On peut effectuer le bobinage d'une machine tournante de plusieurs façons, mais on utilise habituellement trois types d'enroulements :

l'enroulement imbriqué, l'enroulement concentrique et l'enroulement ondulé. Chaque type présente des avantages dans certaines applications.

L'enroulement imbriqué s'emploie généralement pour le bobinage des stators de moteurs de quelques dizaines de kilowatts et plus, [7].

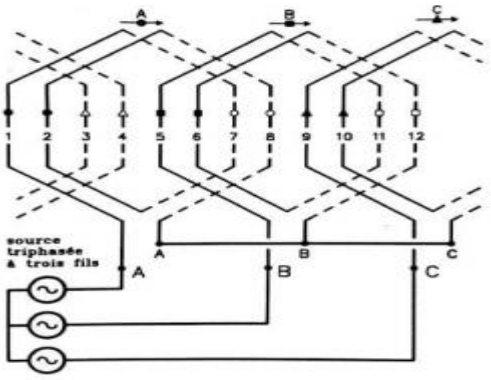


Figure I.9 : Enroulement imbriqué à une couche, une paire dipôles, 12 encoches, [7].

Dans le cas de petits moteurs asynchrones, particulièrement lorsque le bobinage est mécanisé, on utilise généralement l'enroulement concentrique, [7].

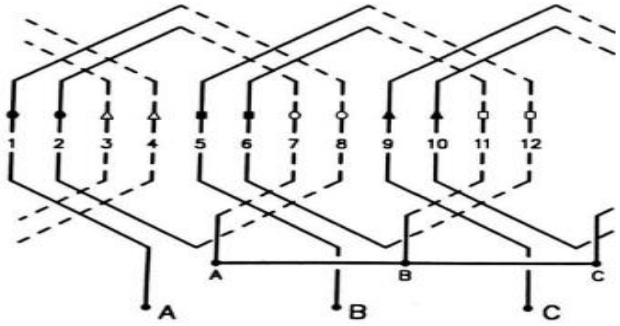


Figure I.10 : Enroulement concentrique pour un moteur à une paire de pôles, 12 encoches, [7].

L'enroulement concentrique est un bobinage obligatoirement à couche unique, de telle sorte que chaque encoche contient un seul côté de bobine.

L'enroulement ondulé est idéal pour les rotors des moteurs asynchrones à bagues. Leur disposition dans les encoches différencie ces différents types d'enroulements, [7].

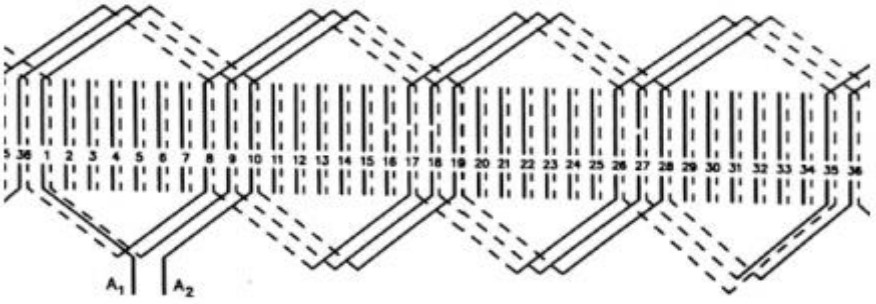


Figure I.11 : Enroulement ondulé d'une phase Moteur à 4 pôles et 36 encoches, [7].

Si tel est le cas, chaque encoche contient deux côtés de bobine et le nombre de conducteurs par encoche doit nécessairement être un nombre pair, [7].

Il est possible de relier en série toutes les bobines de l'enroulement pour une même phase; on obtient alors un moteur qui ne peut opérer que sous une seule tension. Par contre, on peut répartir les bobines en un certain nombre de groupes à l'intérieur desquels elles sont connectées en série.

Les groupes ainsi formés peuvent se relier en série ou en parallèle et permettre d'utiliser le moteur sous plusieurs tensions, [7].

Lorsque les bobines sont faites de fils carrés ou rectangulaires d'assez forte section, elles sont formées sur des gabarits et insérées globalement dans des encoches ouvertes.

Dans le cas d'encoches de type semi-ouvert, on utilise habituellement plusieurs fils ronds, vernis et de faible section pour former les conducteurs des bobines. Comme les bobines faites de fils carrés, elles sont généralement formées sur des gabarits, mais introduites fil par fil ou quelques fils à la fois dans les encoches, [7].

I.3. Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone

Le fonctionnement d'une machine asynchrone est basé sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant crée par le courant triphasé fourni à l'enroulement statorique par le réseau, et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs de ce dernier sont coupés par le champ tournant.

De cette façon le fonctionnement d'une machine asynchrone est analogue à celui d'un transformateur : le stator étant comparable à l'enroulement primaire et le rotor à l'enroulement secondaire qui, dans le cas général, peut tourner à la vitesse de rotation donnée par le rapport suivant, [5]:

$$\omega = \frac{f*60}{P} \qquad \text{(I 1)}$$

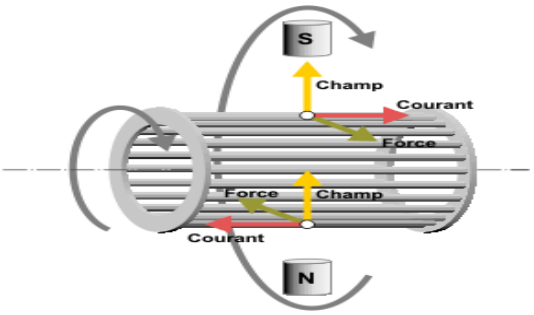


Figure I.12 : L'interaction électromagnétique du champ tournant crée par le courant, [5].

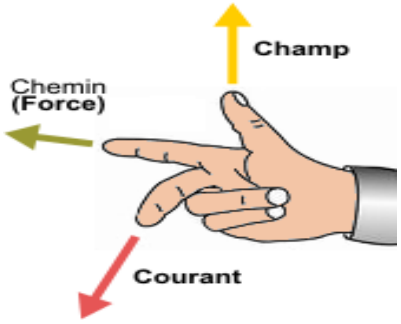


Figure I.13 : La règle de la main Droit, [5].

L'interaction électromagnétique des deux parties d'une machine asynchrone (sans collecteur) n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant (ns) diffère de celle du rotor (n), c'est-à-dire, lorsque n ≠ ns, car dans le cas contraire, c'est-à-dire lorsque n = ns, le champ serait immobile par rapport au rotor et aucun courant ne serait induit dans l'enroulement rotorique.

Le rapport :

$$g = \frac{ns-n}{ns} \qquad \text{(I.2)}$$

Est appelé glissement d'une machine asynchrone, [8].

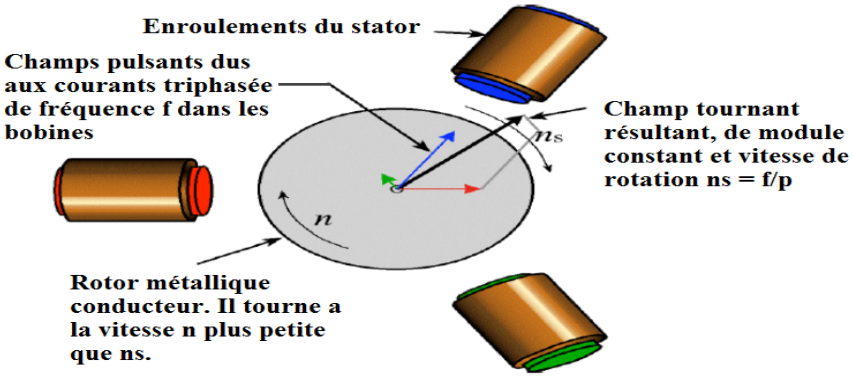


Figure I.14 : Interaction rotor stator, [5].

I.4. Présentation physique du MAS

I.4.1. Plaque à bornes

C'est le dispositif permettant de raccorder le moteur à son alimentation. On n'y retrouve chacune des deux extrémités de chacun des trois enroulements.

Lorsque le moteur comporte des accessoires (protection thermique ou résistance de réchauffage), ceux-ci sont raccordés sur des dominos à vis ou des planchettes par des fils repérés, [9].

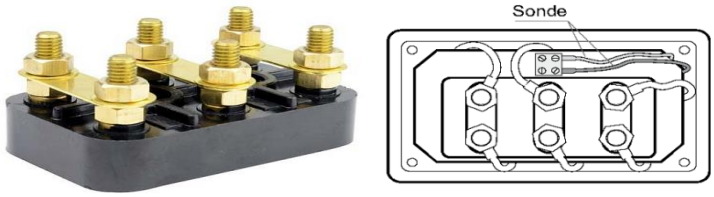


Figure I.15 : Plaque à bornes, [9].

I.4.2. Plaque signalétique ou plaque d'identification

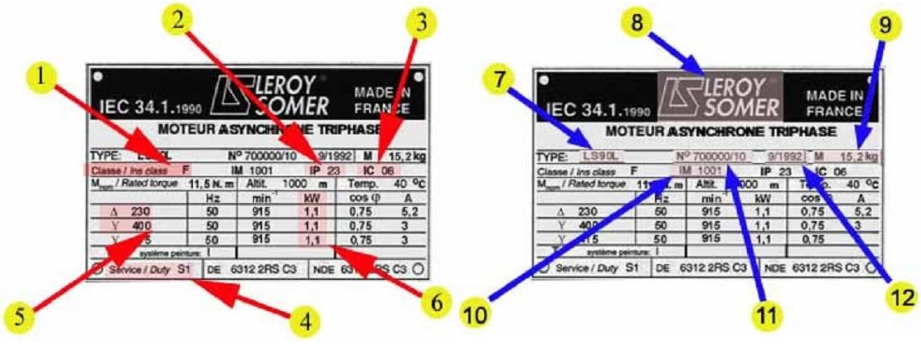


Figure I.16 : Plaque signalétique ou plaque d'identification, [9].

C'est la carte d'identité du moteur, on y retrouve fréquemment :

1. La classe de température ou classe d'isolant. Elle est repérée par une lettre (ex : B, E ou F) et contient deux renseignements;
   - ✓la température maximum du moteur : θ_{MAX}
   - ✓l'échauffement maximum du moteur : $\Delta\theta_{MAX}$
   - ✓Si on note θ_A la température ambiante, on peut écrire $\theta_{MAX} = \Delta\theta_{MAX} + \theta_A$
   - ✓L'échauffement $\Delta\theta$ est dû aux pertes joules, donc au courant, un déclassement du moteur Permettra de diminuer l'échauffement en limitant la puissance utile, qui est alors inférieure à sa Valeur nominale.
2. L'indice de protection IP sur deux chiffres;
   - ✓1er chiffre : protection contre la pénétration des corps solides.
   - ✓ 2ème chiffre : protection contre la pénétration des corps liquides.
3. Le mode de refroidissement;
4. Le type de service (ex : S1, le service continu) pour lequel les valeurs inscrites sont « données nominales » ;
5. Les caractéristiques d'alimentation électrique (ex : 230/400V 9/5.2A 50Hz). Le MAS accepte en général une variation de plus ou moins 10% au tour de ces valeurs nominales. Les conséquences de ces variations sont illustrées ci-dessous :

	Variation de la tension en %				
	U_n-10%	U_n-5%	U_n	U_n+5%	U_n+10%
Courbe de couple	0.81	0.90	1	1.10	1.21
Glissement	1.28	1.11	1	0.91	0.83
Courant nominal	1.10	1.05	1	0.98	0.98
Rendement nominal	0.97	0.98	1	1.00	0.98
Cos φ nominal	1.03	1.02	1	0.97	0.94
Courant de démarrage	0.90	0.95	1	1.05	1.10
Echauffement nominal	1.18	1.05	1	1	1.10
P(Watt) à vide	0.85	0.92	1	1.12	1.25
Q (var) à vide	0.81	0.9	1	1.1	1.21

Tableau I.1: Le supplément d'échauffement selon la norme CEI 60034-1, [9].

6. La puissance utile (on indique toujours ce type de puissance, sauf dans le cas d'une pompe où la puissance absorbée est indiquée) => puissance mécanique (ex : 2.2kW - 3ch);
7. Le type et 11 le numéro de série du moteur;
8. Le nom du constructeur;
9. La masse du moteur;

10 La position du montage;

✓l'indice de résistance aux chocs : IK

✓le rendement nominal: η = Pu / Pa

Pu : Puissance utile (mécanique)

Pa : Puissance absorbée (électrique)

✓le facteur de puissance : cos φ (déphasage en sinusoïdal entre V et J). Au démarrage, sa valeur est faible (0,35 environ) puis croît jusque environ 0,8.

✓La fréquence nominale de rotation en tr.min-1, voire de plus en plus fréquemment en « min-1 »Avec le marquage IE obligatoire depuis juin 2011 (CEI60034-30), voici la nouvelle présentation des plaques signalétiques :

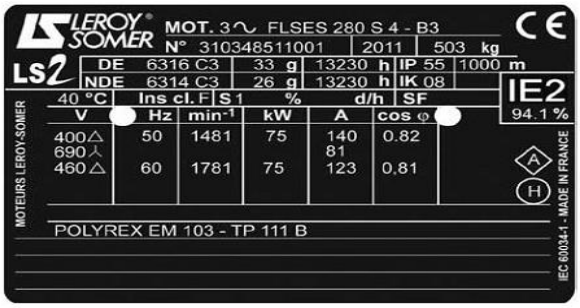


Figure I.17 : Nouvelle présentation des plaques signalétiques, [9].

I.4.3. Tensions et couplage

-tension entre phases (composée) : U

-tension simple : V -courant en ligne : I -courant dans les enroulements : J

a. Etoile

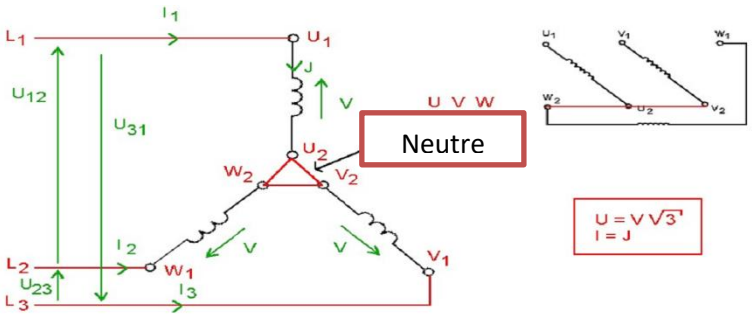


Figure I.18 : Couplage Etoile.

b. Triangle

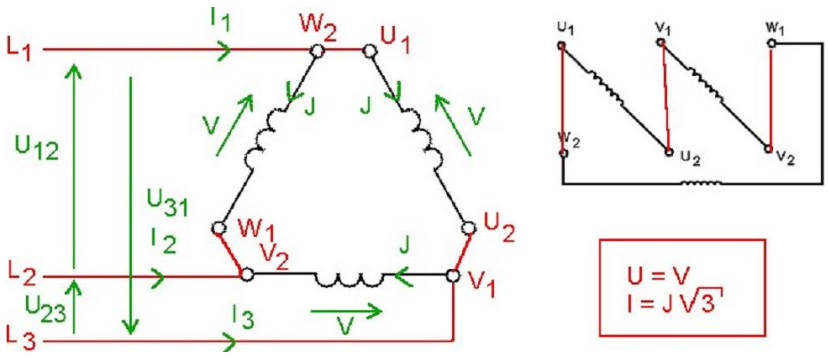


Figure I.19 : Couplage Triangle.

Donc selon la tension du réseau, chaque enroulement devra être alimenté soit entre deux phases (couplage triangle) soit entre phase et neutre (couplage étoile), sachant que pour le réseau, la tension que l'on précise est systématiquement la tension composée, [9].

Moteur / Réseau	127 V/230 V	230 V / 400 V	400 V / 690 V
127 V/230 V	**Etoile**	**Triangle**	**Aucun**
230 V / 400 V	**Aucun**	**Etoile**	**Triangle**
400 V / 690 V	**Aucun**	**Aucun**	**Etoile**

Tableau I.2 : Couplage du moteur asynchrone étoile ou triangle.

I.5. Les avantages et les inconvénients des machines asynchrones

❖ **Avantages**

Il y a plusieurs avantages pour le moteur asynchrone :

- Structure simple;
- Robuste et facile à construire;
- Utilisé dans la puissance moyenne et élevés;
- Relié directement aux réseaux industriels à tension et fréquence;
- Il tourne à vitesse variable différente de la vitesse synchrone;
- Il est utilisé pour la réalisation de la quasi-totalité de l'entraînement à vitesse;

❖ **Inconvénients**

Parmi les inconvénients de la machine asynchrone :

- Le couple de démarrage très élevé que les couples nominales;
- La vitesse dépend de la charge;
- Variation de vitesse (nécessité d'un variateur de vitesse);
- La structure dynamique est fortement non linéaire et l'existence d'un fort couplage, [4].

I.6. Schéma équivalent du moteur asynchrone

La constitution d'un moteur triphasé à rotor bobiné (aussi appelé moteur à bagues) est similaire à un transformateur triphasé. Ainsi, le moteur possède 3 enroulements identiques montés sur le stator, et 3 enroulements sur le rotor, soit un enroulement par phase. A cause de cette symétrie parfaite, on peut comme pour le transformateur, analyser le comportement du moteur en considérant seulement un enroulement primaire et un enroulement secondaire. Lorsque le rotor ne tourne pas, le moteur fonctionne exactement comme un transformateur conventionnel.

Afin de simplifier les calculs, nous supposons que les enroulements du stator sont branchés en étoile et que le rapport de transformation est de 1 : Le moteur est au repos et les bagues sont raccordées à une résistance extérieure Rext, [10].

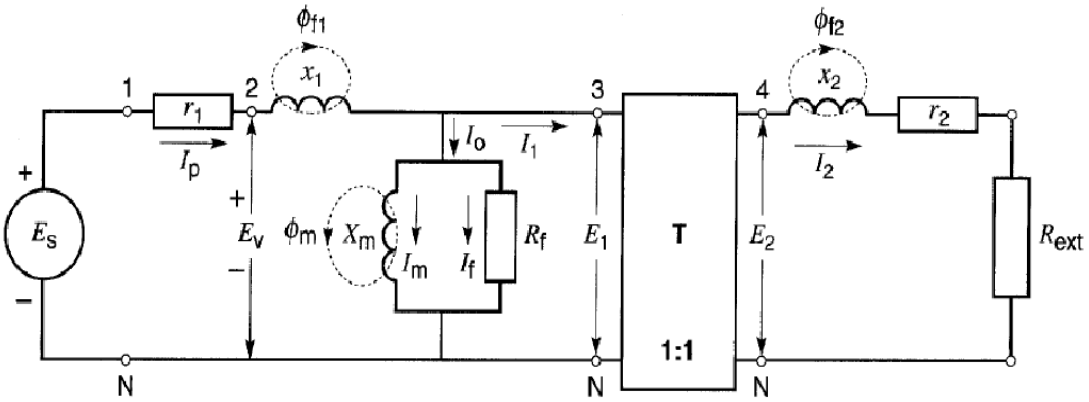


Figure I.20 : Circuit équivalent d'un moteur à rotor bobiné à l'arrêt
Les bagues sont connectées à une résistance extérieure, [10].

Les paramètres du circuit son comme suit :

Es : Tension de la source d'alimentation, ligne à neutre [V].

$r1$: Résistance du stator [Ω].

$r2$: Résistance du rotor [Ω].

$x1$: Réactance de fuite du stator [Ω].

$x2$: Réactance de fuite du stator [Ω].

Xm : Réactance de magnétisation [Ω].

Rf : Résistance représentant les pertes dans le fer et par frottement et aération [Ω].

T : Transformateur idéal ayant un rapport de transformation 1 : 1.

f : Fréquence de la source [Hz].

ns : vitesse synchrone du moteur [tr/mn].

Xm : Flux mutuel dans le rotor [Wb].

ns : vitesse synchrone du moteur [tr/mn].

$Øm$: Flux mutuel dans le rotor [Wb].

$Øf1$: Flux de fuite du stator [Wb].

$Øf2$: Flux de fuite du rotor [Wb].

$Øs = Øm + Øf1$: Flux total accroché par le stator [Wb].

$E1$: Tension induite dans le stator par le flux mutuel [V].

$E2$: Tension induite dans le rotor par le flux mutuel [V].

Ev : Tension induite dans le stator par $Ø_m$ et Øf1 [V].

La Figure I. 21 Représente le circuit du moteur lorsque le rotor est bobiné, avec les bagues sont en Court-circuit.

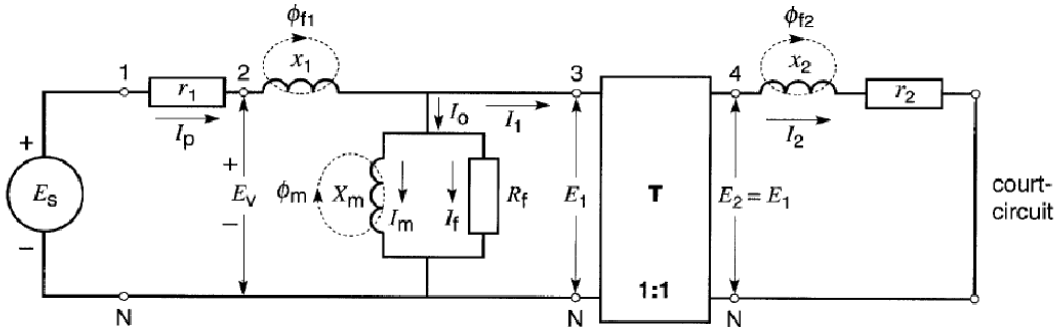


Figure I.21 : Circuit équivalent d'un moteur à rotor bobiné lorsque le rotor est bloqué Les bagues sont en court-circuit, [10].

Supposons que le rotor tourne avec un glissement g de sorte sa vitesse n soit :

$$n = ns\,(1 - g) \tag{I.3}$$

Si le moteur était au repos, la tension E2 induite au secondaire du transformateur idéal T serait égale À la tension E1 au primaire (Figure I. 22). Mais comme le moteur tourne avec un glissement g, la Tension efficace au secondaire est :$E2 = gE1$

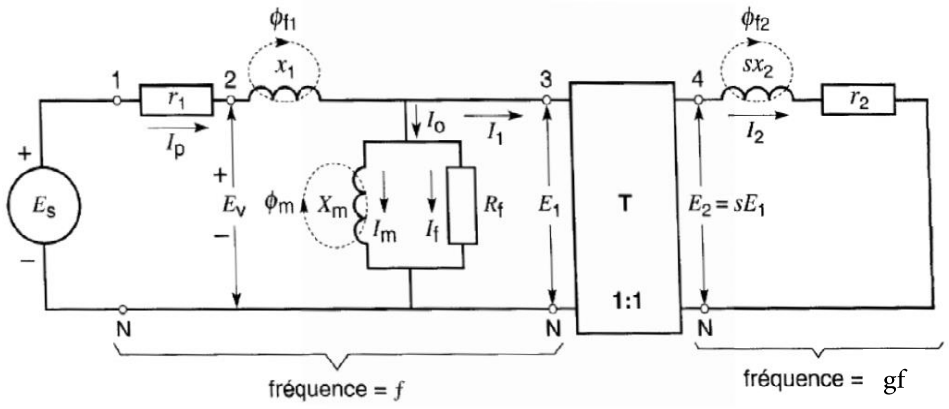


Figure I.22 : Circuit équivalent d'un moteur à rotor bobiné pour un glissement g
La fréquence au primaire est f, mais celle au secondaire est gf, [10].

De plus la fréquence du coté secondaire devient gf , où f est la fréquence de la source, Cela a pour effet de changer la réactance de fuite du rotor de x_2 à $g.x_2$. La valeur de r2 n'est évidemment pas affectée par ce changement de fréquence, [10].

I.7. Diagramme du cercle

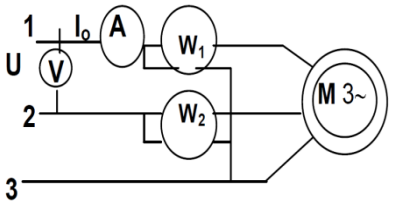
- **Intérêt du diagramme du cercle**

Pour les moteurs de grande puissance, les essais en charge ne sont pas toujours possibles. Grâce au diagramme de cercle normalisé UTE on peut déduire :

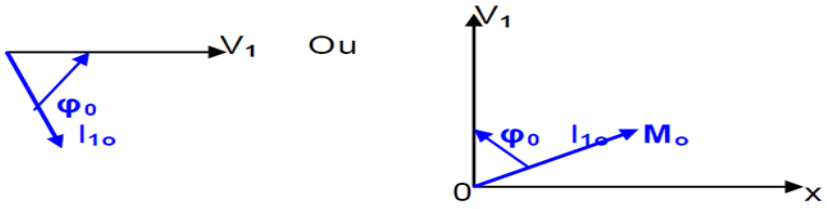
- ✓ La puissance utile, les intensités primaire et secondaire, le facteur de puissance, le rendement, le glissement, le couple transmis;
- ✓ On peut ainsi prédéterminer les paramètres du fonctionnement en charge, [11].

I.7.1. Essai à vide

On fait tourner le moteur à vide alimenté sous sa tension nominale:



On mesure ainsi $P0$, Io et U ; on peut alors calculer $cos\varphi_0 = P0\sqrt{3}VI0 = P0/\sqrt{3}UI0$ à une échelle donnée les valeurs $I0$ et $cos\varphi 0$ donne un premier point $M0$ du cercle correspondant au point de fonctionnement à vide$I0$, [11].



I.7.2. Essai en court-circuit à rotor bloqué

L'alimentation sous tension nominale ne peut se faire à rotor bloqué pour les moteurs très puissants car les intensités seraient très élevées. On alimente le moteur donc sous une tension réduite U_{cc} après avoir court-circuité et bloqué le rotor de telle sorte que le courant de court-circuit ne dépasse pas le courant nominal du moteur. On mesure ainsi sous tension réduite : $P'cc, I'cc, Ucc$

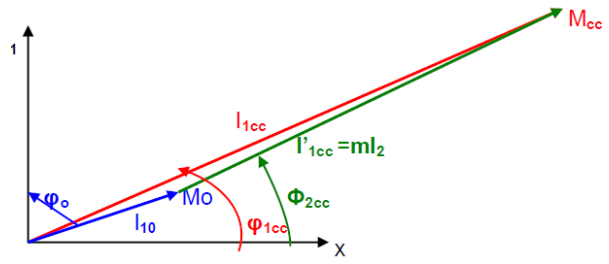
On peut déterminer les valeurs de court-circuit que l'on aurait trouvées sous la tension nominale, [11].

$$Pcc = (U/Ucc)^2 . P'cc \quad (I.4)$$

$$I1cc = I'cc . U/Ucc \quad (I.5)$$

$$Cos\,\varphi Icc = P'cc/\sqrt{3}Ucc . I'Icc = Pcc/\sqrt{3} . U . IIcc \quad (I.6)$$

On obtient ainsi un second point M_{cc} du cercle, celui du moteur au démarrage ou à l'arrêt (g=1) sous tension nominale ; φ_{1cc} étant constant, le point M_{cc} est fixe par rapport à V_1, [11].



I.8. Bilan des puissances

a. Puissance absorbée P_a:

Quelque-soit le couplage le moteur reçoit la puissance électrique:

$$Pa = U . I . \sqrt{3} \cdot cos\varphi \quad (I.7)$$

Cette puissance est transmise au stator de la machine qui est le siège de deux types de pertes.

1. Pertes par effet Joule au stator PJS:

Les deux types de pertes au stator sont :

Les pertes par effet Joule PJS : Si on appelle r la résistance d'un enroulement et I l'intensité en ligne;

- Si le moteur est couplé en étoile, $PJS = 3.r.I^2$ (I.8)
- Si le moteur est couplé en triangle, $PJS = r \cdot I^2$ (I.9)
- Si on appelle R, la résistance mesurée entre deux bornes du stator, quel que soit le couplage du stator, les pertes par effet Joules sont : $P = \frac{3}{2} R.I^2$ (I. 10)

2. Les pertes fer au stator Pfs :

Ces pertes ne dépendent que de la tension U et de la fréquence f, elles sont considérées comme constantes si le moteur est branché sur le réseau triphasé.

b. Puissance transmise au rotor Ptr :

La puissance transmise au rotor est : $P_{tr} = P_a\text{-}P_{JS}\text{-}P_{fS}$ (I.11)

Cette puissance Ptr crée le couple électromagnétique $Tem = Ptr.\Omega S$ (I.12)

Avec : P_{tr} : $en\ [W]$, ΩS : $en\ [rad/s]$, Tem : $en\ [N.m]$

Cette puissance est transmise du stator au rotor. Le rotor est lui aussi soumis au couple Tem mais tourne à la vitesse **Ω**.

Pertes par effet Joule P_{jr} et pertes fer P_{fr} au rotor :

Les pertes fer au rotor sont souvent négligeables : Pfr≈0

On montre alors que les pertes par effet Joule au rotor sont $Pjr = g \cdot Ptr$ (I.13)

On ne peut calculer ces pertes, elles ne sont pas mesurables car le rotor est court-circuité

c. Puissance disponible au rotor P_r :

$$Pr = Tem.\Omega \quad \text{(I.14)}$$

Et $$Tem = \frac{Ptr}{\Omega S} \quad \text{(I.15)}$$

D'où

$$Pr = \frac{Ptr \cdot \Omega}{\Omega S} \quad \text{(I.16)}$$

Soit. $$Pr = (1\text{-}g) \cdot Ptr \quad \text{(I.17)}$$

Le rotor étant constitué de conducteurs qui possèdent une résistance, ils sont le siège de pertes par effet Joule ainsi que de pertes magnétiques.

d. Pertes mécanique P_m et puissance utilePu.

Le rotor est fixé à l'arbre du moteur par l'intermédiaire de roulements, il y à donc des pertes mécanique Pm et

$$Pu = Pr\text{-}Pm \tag{I.18}$$

e. Pertes collectives P_c :

Lors d'un essai à vide,

Le moteur absorbe la puissance:

$$Pa_0 = U\, I_0\sqrt{3}.cos\varphi \; = \Delta Pjs + \Delta Pfs + \Delta Pm \tag{I.19}$$

Or, à vide : g ≈ 0 ⇒Pjr = 0 ⇒ Pu = 0 Et Pfr ≈ 0

$$Pjs = \frac{3}{2}R.{I_0}^2 \tag{I.20}$$

Le bilan des puissances à vide s'écrit:

$$Pa_0 = \frac{3}{2}\, R{I_0}^2 + \Delta Pfs + \Delta Pm \tag{I.21}$$

On appelle pertes collectives $Pc = Pfs + Pm$ et on définit le couple de perte $Tp = \frac{Pc}{\Omega}$ ce couple de perte est considéré comme constante quel que soit la vitesse et la charge du moteur.

Lors de l'essai à vide, les pertes par effet Joule au stator $Pjs = \frac{3}{2}R.{I_0}^2$ sont négligeables.

I.9. 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 :

- Pertes par effet Joule dans les bobinages parcourus par le courant au niveau du stator;
- Pertes par effet Joule dans l'induit au niveau du rotor;
- 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 Pm fournie à l'arbre sur la puissance électrique absorbée Pa par le moteur. La puissance mécanique exprimée en Watt est donnée par la formule, [12].

$$Pu \; = \; C.\Omega \tag{I.22}$$

Avec :

C : Le couple développé par l'arbre du moteur en Newton-mètre (N.m);

Ω La vitesse de rotation de l'arbre en radian par seconde ([rad/s].

- ✓ **Expression du rendement approché**

Les pertes fer rotor sont négligées :

$$\eta = \frac{puissance\ électrique\ absorbée - perte\ mésurables}{puissance\ électrique\ absorbé} \quad (I.23)$$

$$Pu = Ptr - (Pm + Pjr) \quad (I.24)$$

$$Pu = (1 - g)(Pa - (Pfs + Pjs)) - Pm \quad (I.25)$$

$$\eta = \frac{(1-g)(Pa-(Pfs+Pjs))-Pm}{Pa} \quad (I.26)$$

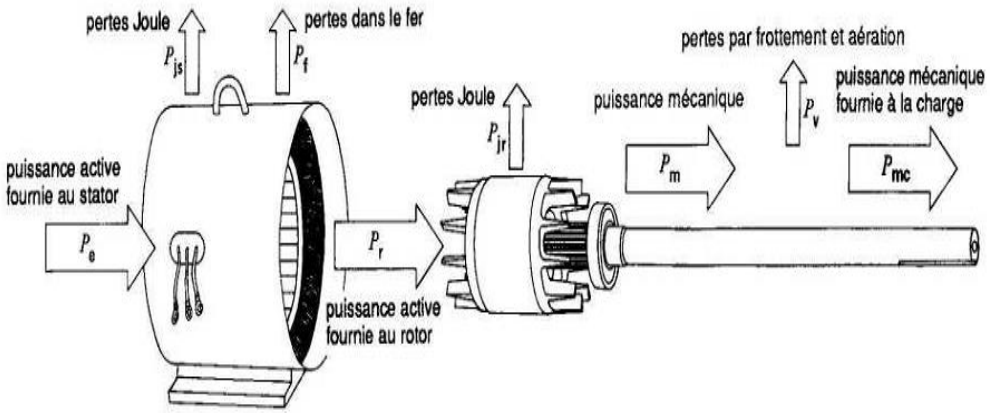


Figure I.23 : Bilan des puissances.

I.10. Normes et réglementations

I.10.1. Classes de rendement internationales : codes IE

La Norme Internationale IEC 60034-30-1;2014 assure une base commune internationale pour la conception et le classement des moteurs électriques ainsi que pour les activités législatives nationales, élevant ainsi le niveau d'harmonisation des standards de rendement MEPS (Minimum Energie Performance Standard) à échelle mondiale. La Norme définit les classes de rendement internationales (IE code) et les exigences requises correspondantes, prévoit les conditions d'essai et les méthodes de mesure du rendement, décrites dans la norme IEC 60034-2-1;2007, mais n'établit pas quels sont les moteurs à fournir et leur niveau minimum de rendement (MEPS) ; ceci dépend des législations en vigueur dans les différents pays et des objectifs gouvernementaux quant à l'économie d'énergie et à la durabilité écologique, [13].

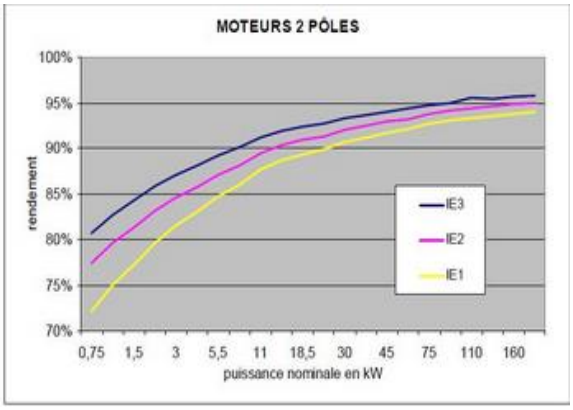


Figure I.24 : Rendement d'un moteur 2 pôle, [14].

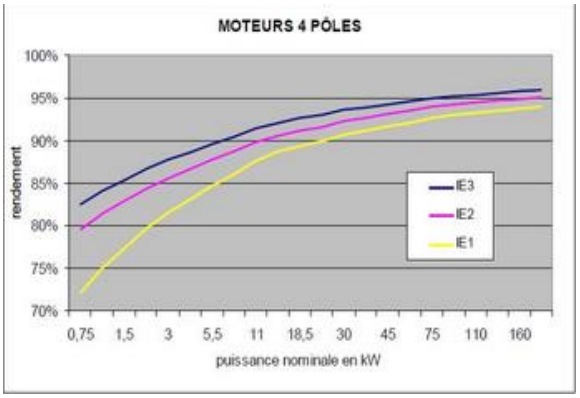


Figure I.25 : Rendement d'un moteur 4 pôle, [14].

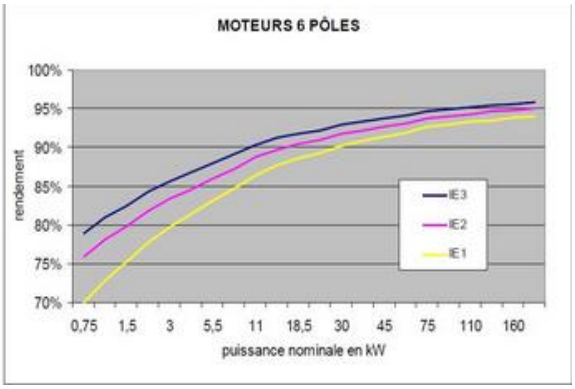


Figure I.26 : Rendement d'un moteur 6 pôle, [14].

Les classes de rendement prévues par les standards, pour les moteurs monophasés et triphasés, y compris les moteurs freins, 50 Hz ou 50/60 Hz, avec des puissances comprises entre 0.75 kW et 375 kW, en 2, 4 ou 6 pôles, en service continu S1 ou service intermittent S3, sont les suivantes :

a) EFF1 – moteurs à haut rendement;
b) EFF2 – moteurs standards;
c) EFF3 – moteurs à faible rendement;

L'achat des moteurs de Classe EFF1 étant considérablement plus chers, la durée D'utilisation annuelle dépasse les 4.000 heures. Les coûts de consommation et la disponibilité Sont ici les principaux éléments qui interviennent dans le choix du moteur électrique. Dans Tous les autres cas. Des moteurs de Classe II devraient être utilisés, [2].

Puissance	Rendement minimal EFF (%)		Rendement minimal EFF (%)	
KW	2 pôles	4 pôles	2 pôles	4 pôles
1,1	76,2	76,2	82,2	83,8
2,2	81,0	81,0	85,6	86,4
15,0	89,4	89,4	91,3	91,8
30,0	91,4	91,4	92,9	93,2
45,0	92,5	92,5	93,7	93,9

Tableau I.3: Répartition et Classes du Rendement des Moteurs Électriques, [2].

La Figure II 4 présente les différentes classes de rendement internationales IE des moteurs 50Hz:

PAYS	GAMME DE PRODUITS	LOI/ RÈGLEMENT	MEPS
EUROPE	400 V ± 10%; 50 Hz 0.75 - 375 kW - 2-6 pôles	EC 4/2014 IEC 30034-30-1:2014	IE3 or IE2 (moteur+VSD) moteurs 7.5kW au 375 kW IE2 moteurs < 7.5 kW obligatoire 01.01.2015
SUISSE	400 V ± 10%; 50 Hz 0.75 - 375 kW - 2-6 pôles	EC 4/2014 IEC 30034-30-1:2014	IE3 or IE2 (moteur+VSD) moteurs 7.5kW au 375 kW IE2 moteurs < 7.5 kW obligatoire 01.01.2015
TURQUIE	400 V ± 10%; 50 Hz 0.75 - 375 kW - 2-6 pôles	EC 4/2014 IEC 30034-30-1:2014	IE3 or IE2 (moteur+VSD) moteurs 7.5kW au 375 kW IE2 moteurs < 7.5 kW obligatoire 01.01.2015
RUSSIE	up to 690 V ± 10%; 50 Hz 1 - 400 kW - tous pôles	GOST R 51677-2000	-
USA	460 V ± 10%; 60 Hz 1 - 500 HP - 2-8 pôles	Nema EPAct EISA 2007 (revision 2014)	IE3 obligatoire 01.01.2016
CANADA	460 V/575 V ± 10%; 60 Hz 1 - 500 HP - 2-8 pôles	CSA C390-10	IE3 obligatoire 01.01.2016
MEXIQUE	460 V ± 10%; 60 Hz 1 - 200 HP - 2-6 pôles	NOM-016-ENER 2010 CSA 390	IE2 obligatoire 01.01.2011
BRESIL	220/380/440/460/480 V ± 10%; 60 Hz 0.75 - 250 kW - 2-8 pôles	NBR 17094-1 Regulation 553	IE2 obligatoire 08.12.2009
CHILI	380/400/420/440/460/690 V ± 10%; 50 Hz 0.75 - 7.5 kW - 2-6 pôles	NCH 3086	IE2 obligatoire 04.01.2011
AUSTRALIE/NOUVELLE ZELANDE	415/690 V ± 10%; 50 Hz 0.75 - 186 kW - 2-8 pôles	AS/NZS 1359.5-2004	IE2 obligatoire 01.04.2006
CHINE	380 V ± 10%; 50 Hz 0.75 - 375 kW - 2-6 pôles	GB 18613-2012	IE3 (GRADE 2) moteurs 7.5kW au 375 kW obligatoire 01.09.2016

Figure I.27 : Différentes classes de rendement internationales, [13]**.**

- ✓ **Européenne**

L'article 3 du règlement 640/2009, mis en application dans le cadre de la directive européenne éco-conception 2005/32/CE, impose des normes de rendement strictes aux moteurs électriques, labellisées IE1 (rendement standard), IE2 (haut rendement) et IE3 (rendement prémium). Le rendement des moteurs devra atteindre le label IE2 en Juin 2011, et le label IE3 (ou IE2 équipé d'un variateur de vitesse) en janvier 2017. La Commission européenne espère ainsi réduire de 135 TWh la consommation électrique de l'Europe des 27 d'ici à 2020, [13].

- ✓ **Usa – EISA 2007**

La loi sur la sécurité et l'indépendance énergétiques de 2007 (Energy Independence and Security Act) (EISA) a été signée en décembre 2007 et mise en 2010 (dernière mis à jour en 2014). La norme EISA remplace la loi de politique énergétique de 1992 EPAct (Energy Policy Act) approuvée par le Congrès américain en 1992 et établit la norme IE3 de rendement Super Premium Nema comme niveau minimum pour les moteurs industriels triphasés CA pour une utilisation générale de 1 à 500 HP fabriqués ou importés pour la vente aux États-Unis.

Le ministère de l'énergie des États-Unis (DOE) est responsable de la définition de la réglementation
à appliquer. La plaque signalétique doit être gravée avec le rendement à la charge nominale du moteur (rendement nominal NEMA) et du numéro CC (numéro de certificat de conformité) du fabricant, [13].

- ✓ **Loi sur le rendement énergétique - canada**

Le Canada a mis en place des normes de performance énergétique minimum depuis 1995. Ces normes ont été modifiées en 1997 pour inclure les moteurs antidéflagrants et les motoréducteurs montages intégrés.

La réglementation pour les moteurs électriques a été de nouveau révisée depuis juin 2016 ; elle comprend un champ d'application plus rigoureux. Les niveaux de rendement minimal considérés est IE3.

La plaque signalétique doit indiquer le rendement nominal NEMA à 100 % de charge et les symboles des certificats de sécurité, tels que CSA, [13].

- ✓ **Australie - normes MEPS**

Les normes MEPS australiennes ont été annoncées en 2001 par l'office australien de l'effet de serre (Australien Green house Office) (AGO), et ont été revues en 2006. Tous les moteurs concernés par ces normes, vendus sur les marchés australien et néozélandais, devront être enregistrés dans un système de base de données national, en ligne, Les normes AS/NZS 1359,5:2004 comprennent deux niveaux de rendement : le niveau minimum de rendement obligatoire IE2 ou supérieur et un niveau de rendement volontaire élevé IE3ou supérieur.

Les normes sont contrôlées par un organisme officiel qui effectue des tests aléatoires pour vérifier la conformité. L'importation des moteurs non-enregistrés est soumise à des sanctions sévères, [13].

- ✓ **Brésil - programme d'étiquetage PBE**

Le programme brésilien d'étiquetage PBE est en vigueur depuis décembre 2009 et il est supervisé par INMETRO. Depuis 2012 le niveau de rendement minimal est IE2. Tous les moteurs couverts par les normes NBR doivent être prévus avec des plaques signalétiques spécifiques et avec des autocollants supplémentaires selon le degré de protection. Tous les moteurs doivent être enregistrés sur le site Internet d'INMETRO, à l'adresse www.inmetro. gov.br, [13].

- ✓ **Chine - normes d'étiquetage énergétique**

Les normes chinoises d'étiquetage énergétique sont obligatoires depuis le 1 septembre 2008 et elles ont été revues en 2012.

Depuis le 1 septembre 2016 les moteurs doivent répondre aux exigences de niveau 2 (IE3). La Chine a franchi une étape majeure vers l'harmonisation de ces normes nationales avec les normes IEC.

La norme GB/T1032 définissant la méthode de mesure du rendement a été mise à jour et alignée avec la norme IEC 60034-2-1, ainsi que les niveaux qui ont été alignés avec les classes de rendement définies par IEC 60034-30. En plus des exigences de rendement énergétique, les moteurs de basse puissance sont soumis à la certification CCC, [13].

- ✓ **Corée - structure MEPS**

Les normes coréennes MEPS ont été introduites le 1 juillet 2008 par le ministère du commerce, de l'industrie et de l'énergie (MOCIE) et mises en application en trois

étapes. La certification est accordée par la société coréenne de gestion de l'énergie (KEMCO).

La norme coréenne MEP est identique à IE3 (60HZ). Un autocollant spécifique est requis et tous les moteurs doivent être enregistrés par les autorités. Les moteurs sans autocollant MEPS ne seront pas autorisés en Corée, [13].

✓ **Allemagne (DIN)**

Le DIN, l'Institut allemand de normalisation, est un organisme privé ayant le statut d'association sans but lucratif. Ses membres sont issus de l'industrie, des associations, des autorités publiques, du commerce, des organisations professionnelles et des organisations de recherche.

Par accord avec le gouvernement fédéral allemand, le DIN est l'organisme national de normalisation agréé qui représente les intérêts allemands au sein des organisations internationales et européennes de normalisation, [15].

- **Tâches et objectifs du DIN**

  - Garantir la participation de toutes les parties prenantes indépendamment de leur position économique et de leurs compétences linguistiques;
  - Promouvoir la libre circulation des biens par une participation active à la normalisation internationale et européenne;
  - Prendre en charge le secrétariat de comités européens et internationaux;
  - Adopter des normes européennes et internationales et européennes au niveau national;
  - Maintenir l'uniformité et la cohérence de la collection de normes;
  - Faciliter les travaux des experts en procédant à l'amélioration continue de l'infrastructure électronique de pointe utilisée pour l'élaboration des normes;
  - Éviter les travaux redondants, [15].

✓ **Reste du monde**

La plupart des pays reconnaissent l'importance de l'efficacité énergétique des moteurs électriques et son impact potentiel sur le plan économique et environnemental, et travaillent ainsi pour développer des normes minimales de performance énergétique à mettre en œuvre dans un avenir proche.

Ces standards devraient suivre la classification IEC60034-30, [13].

I.10.2. Comparaison entre les normes

Il est difficile de comparer deux moteurs lorsque leur rendement a été mesuré selon des normes différentes. Et même lorsque les normes sont les mêmes, il peut être difficile de comparer le rendement de deux compagnies différentes parce qu'elles peuvent bien avoir utilisé des instruments de mesure différents. Il s'ensuit donc que les rendements de moteurs déterminés selon les diverses normes ne sont pas comparables. Les différences peuvent atteindre 5 points de pourcentage ou davantage. On considère, de façon générale, que la norme CSA C390 (IEEE 112 méthode B) constitue la méthode la plus précise. Une harmonisation future des diverses normes est probable, mais sa mise en application va demander du temps, [2].

I.11. Machine à haut rendement (MHR)

Lors de l'achat d'un moteur, on doit fournir à l'utilisateur la liste des caractéristiques techniques désirées.

Les fabricants tendent à mettre l'accent sur le rendement et la qualité dans la conception de moteurs plus gros. Les compromis entre divers paramètres de performance peuvent entraîner une diminution du rendement du moteur. Il est donc très important de préciser par écrit, dès le début, le rendement désiré, [2].

I.11.1. La performance attendue du moteur

- ✓ Puissance et le facteur de service ;
- ✓ Echauffement et la classe d'isolation ;
- ✓ Tension d'alimentation ;
- ✓ Courant de démarrage maximal ;
- ✓ Couple de démarrage minimal ;
- ✓ Couple de décrochage (minimal ou maximal) ;
- ✓ Plage des facteurs de puissance ;
- ✓ Plage des rendements ;

I.11.2. Les conditions d'environnement du moteur :

- ✓ Température ambiante;
- ✓ Altitude;
- ✓ Taux d'humidité;
- ✓ Degré d'abrasion;

- ✓ Degré de sécurité;
- ✓ La protection nécessaire ainsi que toute option supplémentaire;
- ✓ Une protection thermique (système de thermostat/thermistance);
- ✓ Un emplacement spécial pour la boîte de dérivation, [2].

I.11.3. Economie d'énergie par les moteurs à haut rendement

Le remplacement d'un moteur existant par un moteur à haut rendement permet de réaliser des économies en réduisant sa quantité d'énergie électrique consommée (kWh) et sa puissance. Il peut également contribuer à améliorer le facteur de puissance de l'usine dans certains cas.

L'analyse de la rentabilité du remplacement d'un moteur existant par un moteur à haut rendement permet de vérifier la demande réelle nécessaire de cet équipement, qui s'avère souvent trop élevée. En effet, la plupart des industries utilisent des moteurs surdimensionnés pour se protéger contre les pannes de moteur, se donner la possibilité d'accroitre la production et faire aux fluctuations de la charge. Elles doivent alors payer le coût de cette sécurité par un faible rendement obtenu ses moteur, [2].

I.11.4. Amélioration du rendement d'un moteur asynchrone

Pour améliorer le rendement d'un moteur asynchrone on a plusieurs paramètres :

1. L'optimisation du design des paliers ainsi que la qualité des roulements permettent de réduire les pertes par frottement;
2. L'augmentation du cuivre et des sections des bobines permettent la diminution des pertes statorique par effet joule;
3. La qualité des matériaux et les sections utilisées dans les anneaux de court circuitage et les barres permettent de réduire les pertes rotorique;
4. Un ventilateur efficace réduit les pertes dues à la ventilation;
5. Une augmentation du flux d'air réduit les pertes mécaniques;
6. L'utilisation de tôles magnétiques de haute qualité réduit les pertes en fer et notamment celles dues au cycle d'Hystérésis.
7. Un bon dimensionnement des encoches permet de diminuer les pertes magnétiques et l'utilisation de spires de plus grand diamètre;
8. Un stator de grande longueur permet de diminuer les densités de champ magnétique, améliorant la capacité de refroidissement du moteur, réduction des pertes magnétiques en charge, [16].

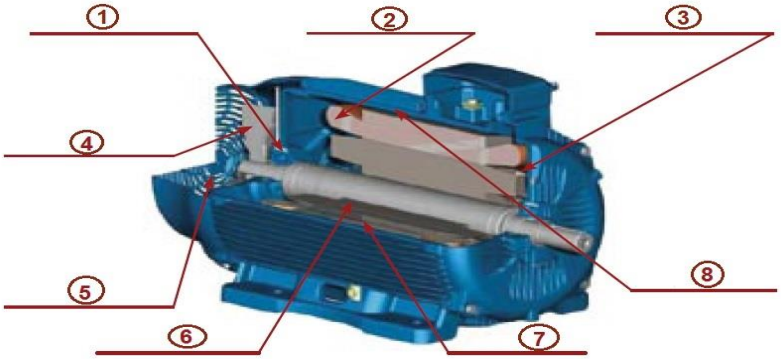


Figure I.28 : Zones pour Augmenter d'efficacité du moteur, [16].

I.11.5. Avantages d'un moteur à haut rendement

Un premier gros avantage est évidemment la meilleure efficacité énergétique, si bien que la consommation d'électricité diminue.

Pour les moteurs de 1 à 15 kW, le coût de l'investissement peut être de 50 à 100 % plus élevé que pour les moteurs standard, mais ils réalisent une économie d'énergie pouvant atteindre 30 %, et ceci bien entendu sur toute la durée d'utilisation.

Les moteurs de 20 kW ou plus sont entre 20 et 30 % plus chers que les moteurs standards, mais ils génèrent une économie d'énergie de 2 à 8 %. Autres avantages sont envisageables**:**

- ✓ Ils sont utilisables pratiquement partout;
- ✓ Ils génèrent moins de chaleur interne;
- ✓ Ils sont plus sûrs;
- ✓ Les temps et coûts d'entretien diminuent;
- ✓ Ils produisent moins de bruit;
- ✓ Ils résistent mieux aux conditions d'exploitation anormales, comme la sous-tension et la surtension, le déséquilibre de phase, les harmoniques…
- ✓ Meilleur facteur de puissance;

Une directive européenne spécifique, dite 'Directive en matière d'éco-conception' encourage l'utilisation de moteurs à haut rendement et bannit depuis 2011 les moteurs à rendement standard ou à faible rendement. Sachant que le coût d'utilisation d'un moteur revient (pendant toute sa durée de vie) à 100 fois son prix d'achat ? L'utilisation d'un moteur EFF1 (le moteur à haut rendement le plus économe) sera donc largement remboursée par les économies réalisées sur les frais d'énergie, [17].

Conclusion

En raison de leur construction simple et robuste, les moteurs asynchrones et plus particulièrement ceux à cage d'écureuil, représentent environ 90-95% de la consommation d'énergie des moteurs électriques, ce qui équivaut à environ 53% de la consommation d'énergie électrique totale. En effet, la première partie présente des généralités sur la machine asynchrone ainsi que les différentes caractéristiques de fonctionnement, suivi d'une description d'une nouvelle génération dite machines à haut rendement (MHR).

La deuxième partie a pour but de contribuer aux efforts de l'économie d'énergie, plus spécifiquement dans le domaine de moteurs à petites puissances. Il met en évidence le potentiel important d'économie d'énergie aussi bien lors de la phase de conception du moteur que lors de son utilisation. Economiser de l'énergie implique de n'utiliser uniquement que la quantité d'énergie nécessaire au fonctionnement du moteur. Ceci peut être réalisé en améliorant le dimensionnement du moteur lors de sa conception ou par la réduction de son besoin en énergie électrique nominale quand le moteur a été déjà construit. Ces deux facteurs pourraient être pris en compte conjointement en optimisant le moteur à sa conception en fonction de l'utilisation prévue.