

Introduction

Grâce à l'évolution de l'électronique de puissance et en raison du plus faible coût des moteurs asynchrones, nombre d'applications, qui utilisaient hier des moteurs à courant continu ou encore des moteurs synchrones, emploient aujourd'hui un moteur asynchrone associé à un variateur de vitesse, [1].

Le domaine de puissance va de quelques watts à plusieurs mégawatts. Relié directement au réseau industriel à tension et fréquence constantes, il tourne à vitesse variable peu différente de la vitesse synchrone; c'est lui qui est utilisé pour la réalisation de la quasi-totalité des entraînements à vitesse constante. Le moteur asynchrone permet aussi la réalisation d'entraînements à vitesse variable et la place qu'il prend dans ce domaine ne cesse de croître. Dans les pays industrialisés, plus de 60% de l'énergie électrique consommée est transformée en énergie mécanique par des entraînements utilisant les moteurs électriques spécialement les machines asynchrones. Pour la réduire, la solution utilisant les machines à haut rendement (MHR) a été proposée, [2].

En effet, On s'intéressera dans cette partie à la présentation de l'état de l'art des moteurs à haut rendement, avec un rappel sur le concept de la maîtrise de l'énergie dans les principaux secteurs. L'apport des machines électriques vis-à-vis de la maîtrise de l'énergie électrique sera également traité. On insistera aussi au rendement des machines asynchrones, les méthodes et les normes pour les évaluer, les facteurs influents et les avantages des MHR.

I. Définition et concept de la maîtrise de l'énergie (ME)

Parce que la production, la transformation, le transport et la consommation d'énergie sont responsables de la plus grande part des nuisances environnementales dues à l'activité humaine ; augmentation de l'effet serre, pollution des sols, des eaux de pluies acides. De plus les ressources d'énergies que nous utilisons sont principalement des énergies fossiles dont les réserves sont limitées et la demande sans cesse croissante dues à la poussée démographique importante conduit forcément aux solutions de délestage. Tous ces problèmes nous amènent à réfléchir à la maîtrise de l'énergie qui définit une gestion raisonnée de l'énergie disponible pour satisfaire les besoins exprimés par la société. L'objectif n'est pas de diminuer le confort des usagers mais de le maintenir au même niveau tout en économisant l'énergie, [2].

I.1. Actions de la ME lors de son utilisation

La maîtrise d'énergie est actuellement une grande défie, les chercheurs et les concepteurs travaillent sur des opérations efficace pour la meilleur utilisation d'énergie pour le but de minimisation de consommation énergétique, et voilà, ça conduit à garder notre environnement et notre économie.

Les actions de maîtrise d'énergie dans le monde concernant principalement les secteurs de bâtiment, éclairage et industrie, [2] :

I.1.1. Maîtrise de l'énergie dans le bâtiment

Un grand nombre de logements ne sont pas conçus, ou le sont incorrectement sur le plan thermique. Cela s'explique par l'absence de réglementation thermique spécifique pour l'habitat.

Cette situation a pour conséquence une consommation énergétique importante des bâtiments.

La réglementation thermique dans les bâtiments neufs s'appliquant à la conception et à la construction des bâtiments détermine :

- Les catégories de bâtiments et les normes de rendement énergétique y afférentes, selon les données climatiques des lieux où sont situés les bâtiments ;
- Les normes techniques relatives à la construction se rapportant à la résistance thermique à l'étanchéité des ouvertures de l'enveloppe extérieure d'un bâtiment, à la qualité des

matériaux d'isolation et leur mode d'installation, à la fenestration, aux dispositifs des systèmes de chauffage ou de climatisation.

Pour limiter les conséquences négatives de cette situation l'état doit conduire, autour de cette filière, des actions de sensibilisation ou d'étude, [3].

I.1.2. Eclairage

L'éclairage fait partie intégrante de notre vie, nous permettant de réaliser toutes nos activités et contribuant aussi à créer des ambiances correspondant à notre personnalité ou notre humeur du moment. Mais un éclairage de mauvaise qualité peut générer une augmentation sensible de la consommation d'électricité. Il faut savoir que l'éclairage représente en moyenne 15% de notre facture d'électricité et un éclairage efficace ne se mesure pas au nombre de Watts installés mais au choix des équipements et à l'usage qui en est fait, [3].

I.1.3. Maîtrise de l'énergie dans l'industrie

La maîtrise de l'énergie ne concerne pas seulement les bâtiments mais aussi l'industrie car cette dernière représente une partie importante de la consommation de l'énergie électrique environ (50%), [3]. Au-delà de l'application de la réglementation, la mise en œuvre d'actions de maîtrise d'énergie en respectant les consignes environnementales constitue sur le plan économique et social, un facteur déterminant la compétitivité d'une entreprise.

Les actions de maîtrise de l'énergie dans les entreprises portent généralement sur :

- Le développement de procédés et d'équipements énergétiquement performants et leur diffusion ;
- Promotion d'une gestion efficace de l'énergie dans les entreprises par l'utilisation d'équipements innovants et l'utilisation de bonnes pratiques,

En effet, dans l'industrie, 70% de la consommation d'électricité est dédiée au fonctionnement des moteurs électriques comme nous montre la figure (I.1).

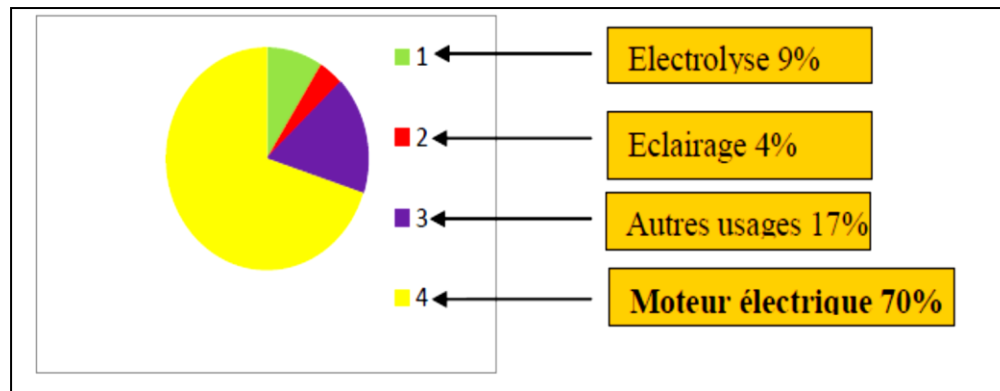


Figure I.1 : Répartition de la consommation d'électricité dans l'industrie,[4].

I.2. Effet des machines électriques sur la maîtrise de l'énergie électrique

Comme il est mentionné, il y a plusieurs approches pour économiser l'énergie électrique. Dans la partie suivante, on étudiera l'emploi des moteurs à inductions à haut rendement pour l'épargne d'énergie, en tenant compte des meilleurs facteurs de «qualité, taille, coûts », [4].

I.2.1. Qualité du moteur

Le choix de la qualité de moteur avec des conduites de haut rendement à l'épargne d'énergie particulièrement si la différence de prix d'achat est relativement petite, même quelques %, ce qui peut mener à l'épargne significative d'une énergie. Ceci signifie que le moteur fonctionne avec un coût inférieur et développe la même puissance, [4].

I.2.2. Taille du moteur

Le choix de la taille de moteur est également très important. Par exemple, si le moteur est relativement surdimensionné à son application, alors le moteur fonctionne au-dessous des conditions de charge, avec un rendement de fonctionnement plus faible et avec un coût plus élevé. Néanmoins, si le moteur est bien choisi, ceci mènera à une épargne significative de l'énergie, [4].

I.2.3. Coût du moteur

Le choix du prix du moteur acheté doit être basé sur le rapport coût/bénéfice. Il est plus intéressant d'acheter le plus cher, mais en possédant un meilleur rendement et par conséquent conduisant à une épargne significative de l'énergie, [4].

I.3. Généralités sur le moteur asynchrone

Le moteur asynchrone est le moteur le plus utilisé dans l'ensemble des applications industrielles, du fait de sa facilité de mise en œuvre, de son faible encombrement, de son bon rendement et de son excellente fiabilité. Son seul point noir est l'énergie réactive, toujours consommée pour magnétiser l'entrefer.

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. Ils sont largement utilisés en tant qu'entraînements électriques dans l'industrie, le service public, la traction, les électroménagers,[5].

I.3.1. Constitution

Deux composantes principales constituent le moteur asynchrone, souvent appelé moteur à induction. Elles sont faites de tôles d'acier au silicium et comportent des encoches dans lesquelles on place les enroulements.

L'une des composantes, appelée le stator, est fixe. L'autre composante, nommée le rotor, est montée sur un axe et libre de tourner, [6].

Dans les encoches régulièrement réparties sur la face interne du stator sont logés trois enroulements identiques, à "p" paires des pôles ; leurs axes sont distants entre eux d'un angle électrique égal à $2\pi/3$.

Les phases du stator sont alimentées par un réseau triphasé de tensions sinusoïdales à fréquence et amplitude constante ou par un onduleur de tensions ou de courant à fréquence et à amplitude réglables.

Alors le rotor, il peut être réalisé :

- Soit par un système d'enroulement triphasés (rotor bobiné), raccordés en étoile trois bagues sur les quelles frottent trois balais fixes accessible par la plaque aux bornes et mis en court-circuit pendant les régimes de fonctionnements normaux ;
- Soit par une cage conductrice intégrée aux tôles ferromagnétique (rotor à cage). il est admis que la deuxième structure du rotor est électriquement équivalente à la première, quand il s'agit de cages non profondes ou de cages simples (non double).



Figure I.2 : Constitution de la machine asynchrone, [6].

I.3.1.1. Le stator

Le stator comporte une carcasse en fonte ou en tôle d'acier dans laquelle est inséré un circuit magnétique formé d'un empilage de tôle. Le stator d'une machine asynchrone triphasée porte un enroulement triphasé réparti dans des encoches du circuit magnétique. Il est généralement couplé en étoile ou en triangle.



Figure I.3 : Stator d'une machine asynchrone, [6].

I.3.1.2. Le rotor

C'est la partie libre en rotation comportant des conducteurs qui seront soumis au champ tournant. Ces conducteurs peuvent être soit des bobines (technologie en voie de disparition) soit des barres de cuivre ; on parle alors de rotor en court-circuit (ou à cage d'écureuil). La rotation est possible grâce aux paliers supportés par la carcasse.

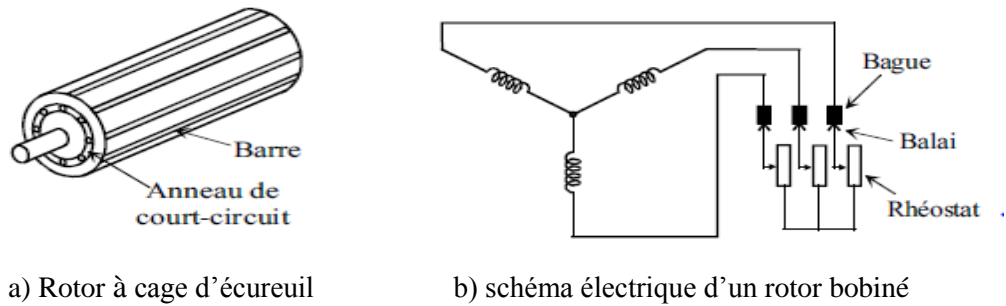


Figure I.4 : Rotor d'une machine asynchrone

a) Le rotor à cage

Plusieurs types de rotor à cage existent, en citant ces moteurs dans l'ordre du moins répandu au plus courant :

- **Rotor à cage résistante**

Le rotor résistant existe surtout en simple cage. La cage est fermée par deux anneaux résistants (alliage particulier, section réduite, anneaux d'inox ...etc.). Ces moteurs présentent un fort glissement au couple nominal. Leur couple de démarrage est élevé et le courant de démarrage faible. En raison des pertes dans le rotor, leur rendement est faible.

- **Rotor à simple cage**

Dans des trous ou dans des encoches disposées sur le pourtour du rotor (à l'extérieur du cylindre constitué par l'empilage de tôles) sont placés des conducteurs reliés à chaque extrémité par une couronne métallique et sur lesquels vient s'exercer le couple moteur généré par le champ tournant. Pour que le couple soit régulier, les conducteurs sont légèrement inclinés par rapport à l'axe du moteur, [7].

L'ensemble a l'aspect d'une cage d'écureuil, d'où le nom de ce type de rotor.

- **Rotor à double cage**

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

- **Rotor à encoches profondes**

C'est la réalisation standard. Les conducteurs statoriques sont moulés dans les encoches du rotor qui sont de forme trapézoïdale dont le petit côté du trapèze se situe à l'extérieur du rotor.

Le fonctionnement est analogue au moteur à double cage : l'intensité du courant rotorique

varie en fonction inverse de sa fréquence. Ainsi :

- Au début du démarrage, le couple est élevé et l'appel de courant réduit;
- En régime établi, la vitesse est sensiblement celle du moteur à simple cage.

b) Le rotor bobiné (rotor à bagues)

Dans des encoches pratiquées à la périphérie du rotor sont logés des enroulements identiques à ceux du stator. Généralement le rotor est triphasé. Une extrémité de chacun des enroulements est reliée à un point commun (couplage étoile). Les extrémités libres peuvent être raccordées sur un coupleur centrifuge ou sur trois bagues en cuivre, isolées et solidaires du rotor. Sur ces bagues viennent frotter des balais à base de graphite raccordés au dispositif de démarrage, [7].

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

I.3.2. Organes mécaniques

La carcasse sert de support, elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur lequel est fixé un demi-accouplement. Il est généralement constitué en acier moulé ou forgé. Son dimensionnement est fonction des efforts de flexion (force centrifuge qui s'exerce sur lui, attraction magnétique radiale, etc...), des efforts radiaux et tangentiels dus aux forces centrifuges, des efforts de torsion (couple électromagnétique transmis en régimes permanent et transitoire). Il est supporté par un ou plusieurs paliers. Ces paliers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation, [7].

Le stator autoporteur reçoit de chaque côté un flasque sur lequel le rotor sera positionné grâce à des roulements à billes ou à rouleaux suivant le type de charge (axiale ou radiale). Un ventilateur est placé en bout d'arbre sur le rotor pour le refroidissement de la machine. Il peut être remplacé par une ventilation forcée motorisée pour le refroidissement aux vitesses lentes, [7].

I.4. Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone

Un moteur à induction est un transformateur électrique dont les circuits magnétiques sont séparés en deux parties (primaire et secondaire) pouvant se mouvoir l'une par rapport

à l'autre. La structure classique d'un moteur à induction consiste en un stator de forme cylindrique portant sur sa partie périphérique interne les enroulements du primaire, et d'un rotor qui peut prendre plusieurs aspects.

Le principe des moteurs à courants alternatifs réside dans l'utilisation du champ magnétique tournant produit par des tensions alternatives. La circulation d'un courant dans une bobine crée un champ magnétique \mathbf{B} , ce champ est dans l'axe de la bobine, sa direction et son intensité sont fonction du courant \mathbf{I} , c'est une grandeur vectorielle, [8].

La figure I.5 représente le sens et la direction de rotation du champ magnétique d'une seule phase.

Si le courant est alternatif, le champ magnétique varie en sens et en direction à la même fréquence que le courant.

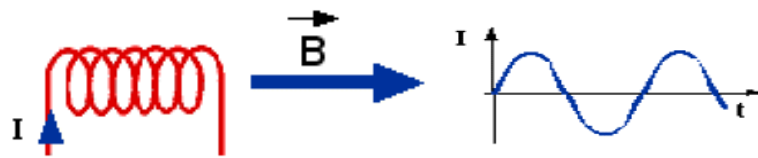


Figure I.5 : Sens et direction de rotation du champ magnétique d'une seule phase

Si deux bobines sont placées à proximité l'une de l'autre, le champ magnétique résultant est la somme vectorielle des deux autres, comme il est représenté sur la figure I.6, [6].

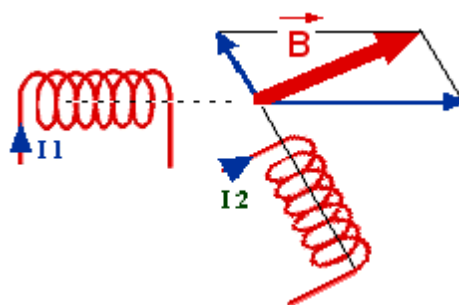


Figure I.6 : Sens et direction de rotation du champ magnétique de deux phases

Dans le cas du moteur triphasé, les trois bobines sont disposées dans le stator à 120° les unes des autres, trois champs magnétiques sont ainsi créés. Compte tenu de la nature du courant sur les réseaux triphasés. Le champ magnétique résultant tourne à la même fréquence que le courant soit **50tr/s**, [7].

La figure I.7 représente le sens et la direction de rotation du champ magnétique du moteur triphasé. Les trois enroulements statoriques créent donc un champ magnétique tournant, sa fréquence de rotation est nommée fréquence de synchronisme. Si on place une boussole au centre, elle va tourner cette vitesse de synchronisme, [6].

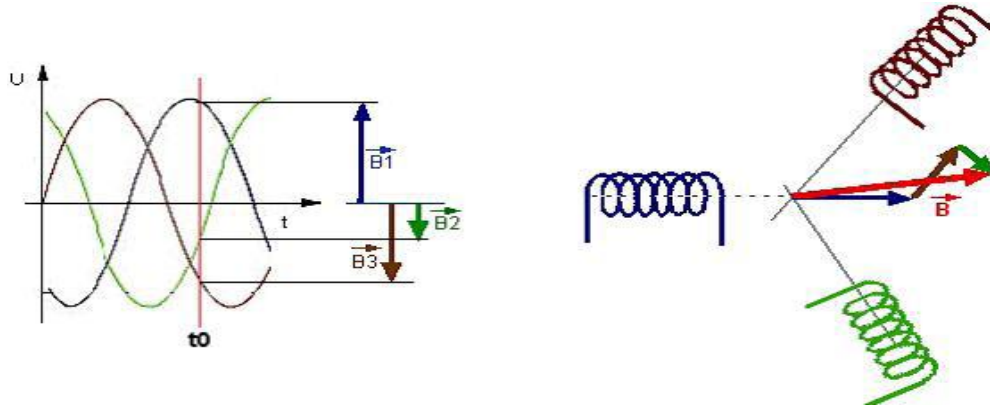


Figure I.7 : Sens et direction de rotation du champ magnétique du moteur triphasé

I.5. Classification des moteurs à cage d'écureuil

La **NEMA** (Nationale Electrical Manufacturer Association) classe les moteurs à cage d'écureuil comme suit :

Classe A : Moteur à couple nominal et à courant de démarrage normal ;

Classe B : Moteur à couple nominal et à faible courant de démarrage ;

Classe C : Moteur à fort couple et à faible courant de démarrage ;

Classe D : Moteur à fort glissement ;

Classe F : Moteur à faible couple et à faible courant de démarrage.

Cette classification se base sur la variation de la résistance et de la réactance des enroulements du rotor. Au démarrage, la réactance d'un conducteur est d'autant grande que ce dernier est loin de l'entrefer. La résistance dépend de la longueur sur rotor, de la section des conducteurs et du matériau utilisé. Plus cette résistance est grande, plus le courant de démarrage est petit et meilleur et le couple de démarrage, jusqu'à une certaine limite, bien entendu. Il est donc possible d'expliquer les différentes caractéristiques obtenues pour les diverses classes, [7].

L'encoche du rotor d'un moteur de **classe A** n'est pas tellement creuse est l'enroulement a une faible résistance de même, la réactance est faible et presque uniforme pour tout le conducteur ; il en résulte que le courant circule dans tout le conducteur. Le couple est normal et le courant de démarrage est suffisamment élevé pour nécessiter dans

la plupart des cas, l'ajout d'un compensateur ou d'un démarreur spécifique comme un autotransformateur, des résistances ou un démarreur électrique. Ce type de moteur ne se fabrique presque plus, [7].

Le moteur de **classe B** est le plus utilisé nos jours. Ses caractéristiques découlent de l'emploi d'encoches profondes et étroites lors du démarrage, la réactance est plus forte dans le bas du conducteur ; cela force le courant à passer surtout dans le haut du conducteur, ce qui en réduit la surface active et augmente sa résistance. Le courant se trouve ainsi limité et on peut, dans bien des cas, démarrer ce moteur à pleine tension ; c'est un avantage par rapport au moteur de classe A. le couple au démarrage demeure toutefois normal, [7].

Un de **classe C** possède un rotor à double cage d'écureuil .on peut construire cet enroulement de différentes façons. Le principe consiste à placer un enroulement de forte résistance près de l'entrefer et un enroulement de faible résistance loin de la surface. Durant le démarrage, le conducteur éloigné de l'entrefer a une grande réactance, ce qui force le courant à passer dans le conducteur extérieur. Le courant est donc faible mais le couple est fort. Lorsque le rotor a atteint sa pleine vitesse, la réactance du conducteur situé le plus loin de l'entrefer devient faible ; la répartition du courant est alors à peu près uniforme dans tout le conducteur, [7].

Un moteur de **classe D** a un enroulement d'une grande résistance en raison de sa faible section, ce qui lui confère au démarrage un fort couple ainsi qu'un faible courant. Par contre, il a un glissement à pleine charge qui peut atteindre 15% et même 20%.

Les conducteurs du rotor d'un moteur de **classe F** sont placés loin de l'entrefer .Au démarrage, la réactance est grande et le courant est faible, mais le circuit est très inductif et le couple développé est faible, [7].

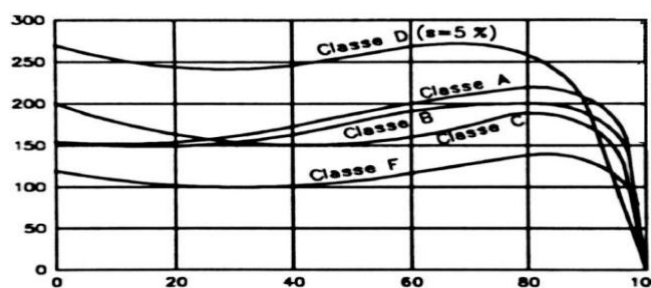


Figure I.8 : Courbes couple/vitesse en fonction de la classe du moteur, [7].

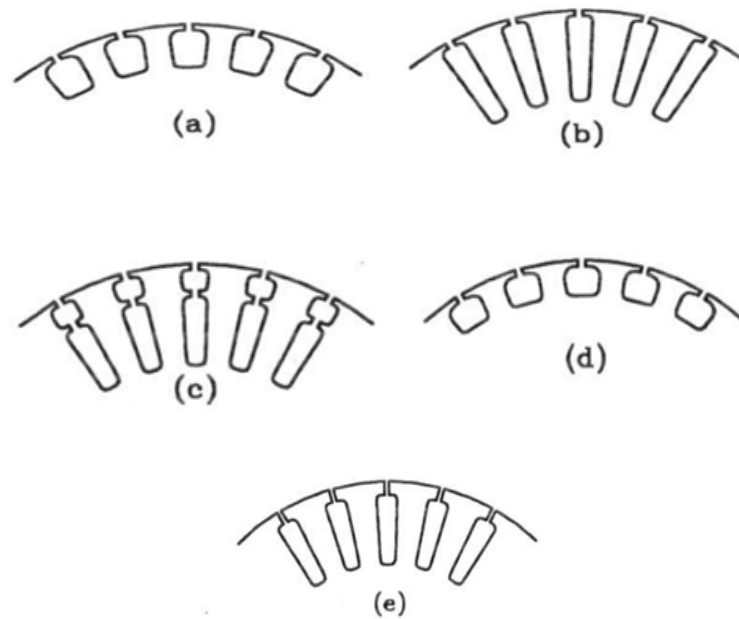


Figure I.9 : Forme d'encoches pour diverses classes de moteurs, [7].

I.6. Différents types d'encoches

Le rotor à double cage est beaucoup plus difficile à construire que le rotor à simple cage et est donc d'un coût plus élevé. On peut pallier cet inconvénient, tout en gardant une partie de ses avantages, en construisant une cage rotorique simple avec des barres très plates s'enfonçant profondément dans le circuit magnétique.

Lors du démarrage, les lignes de courant se concentrent près de la périphérie et tendent ainsi à assigner une section de conducteur apparente réduite et par conséquent une résistance rotorique importante, [8].

En revanche, en marche normale, cet effet disparaît et les lignes de courant, en occupant la pleine section de la barre, retrouvent un circuit de faible résistance. Ce type de moteur, dit à encoches profondes, est très utilisé, notamment dans le cas des moteurs à haute tension à fort couple de démarrage. Il présente cependant l'inconvénient d'entraîner une augmentation du coefficient de dispersion des enroulements, donc une diminution du facteur de puissance du moteur, et bien sûr, d'exiger un diamètre de rotor plus important. Pour remédier à ce dernier inconvénient, on a parfois fait appel à des conducteurs ayant des formes plus compliquées, en trapèze, voire en L (la base du L étant en fond d'encoche), [8].

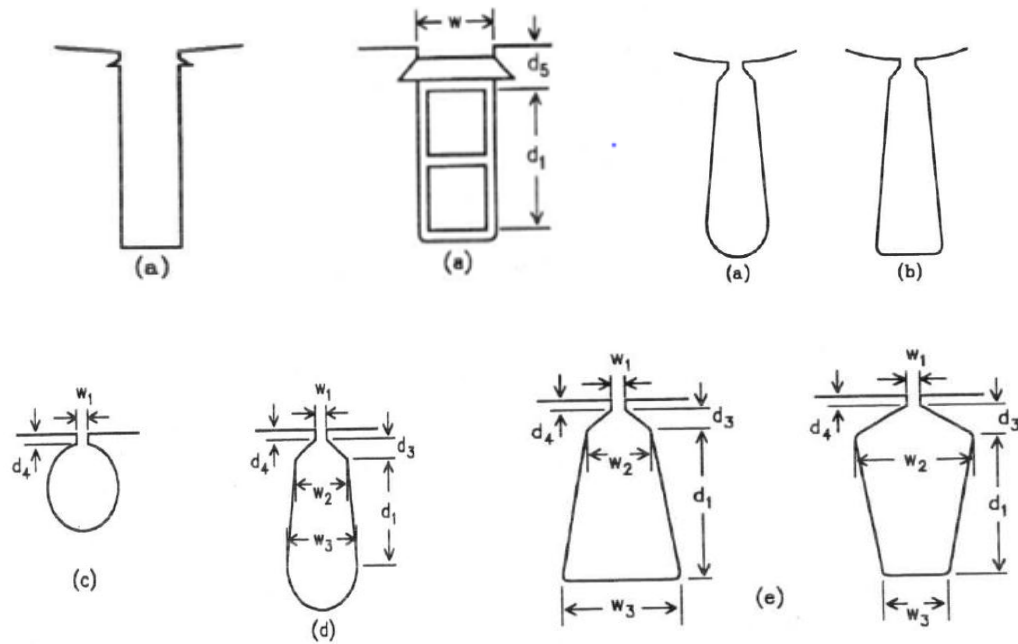


Figure I.10 : Encoches semi-ouvertes et ouvertes, [8].

I.7. Rendement des moteurs à induction

Le rendement d'un système électrique dépend de plusieurs facteurs tels que : le rendement du moteur et les techniques du contrôle, les qualités du réseau de distribution, la transmission mécanique c'est à dire ; problèmes d'entretien et d'entraînement et la gestion de la charge. Pour l'amélioration du rendement d'un système électrique, différentes approches sont proposées. Ces dernières utilisent principalement la vitesse variable, ainsi qu'une dimension optimale des moteurs électriques pour améliorer leur conception. La première approche à un rapport avec le réseau, alors que la seconde est en rapport avec le concepteur du moteur lui-même. Pour l'évaluation du rendement, diverses méthodes sont proposées :

- Méthode de la plaque signalétique ;
- Méthode directe ;
- Méthode statistique ;
- Méthode du circuit équivalente ;
- Méthode des pertes séparées.

Toutes ces méthodes déterminent le rendement (η) selon la définition donnée par l'équation (I.1)

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_{ele}} = \frac{P_{ele} - \sum \Delta P}{P_{ele}} = 1 - \frac{\Delta P}{P_{ele}} \quad (I.1)$$

La puissance absorbée sous forme électrique est mesurée directement, mais la puissance mécanique est évaluée en déduisant les pertes calculées, et peut être obtenu directement ou indirectement, dans différents chemins. Dans le cas indirect qui constitue la tâche la plus difficile ou les pertes doivent être réparties, par une variété de méthodes normalisées.

En principe trois types de mesures peuvent être employés pour déterminer le rendement, comme indiqué dans la littérature par la :

- Mesure directe de la puissance électrique d'entrée et mécanique de sortie ;
- Mesure directe de la somme des pertes et de la puissance d'entrée ;
- Mesure des différentes composantes des pertes et de la puissance d'entrée. , [8].

I.7.1. Différent pertes dans le moteur à induction

Le fonctionnement du moteur asynchrone est accompagné par des pertes de puissance lors du transfert de la puissance électrique en une puissance utile à la charge. Ces pertes sont dues principalement aux pertes joules dans les enroulements du stator et du rotor, des pertes fer, des pertes mécaniques et des pertes supplémentaires en charge.

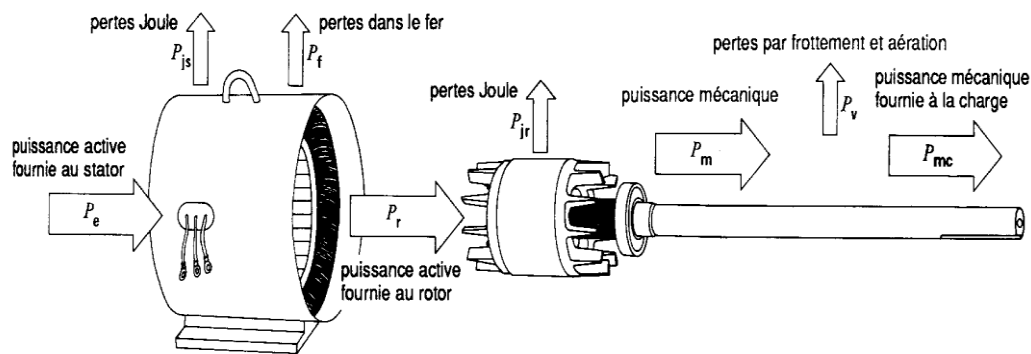


Figure I.11 : Bilan de puissance de la machine asynchrone, [8].

• Les pertes

✓ Pertes joule au stator P_{js} :

$$P_{js} = \left(\frac{2}{3}\right) \cdot R_s \cdot I_1^2 \quad (I.2)$$

✓ **Pertes joule au rotor P_{jr} :**

Appelées aussi pertes de glissement. Elles peuvent augmenter suite à un bris des barres de la cage d'écureuil.

$$P_{jr} = \left(\frac{2}{3}\right) \cdot R_r \cdot I_2^2 \quad (I.3)$$

✓ **Pertes fer ou pertes magnétiques P_f**

Elles représentent les pertes à vide. Elles sont dues aux courants de Foucault et à l'hystérésis dans le fer. Ces pertes peuvent augmenter suite à la détérioration des isolants entre les laminations du rotor et du stator.

✓ **Pertes mécaniques par frottement et par ventilation. $P_{méc}$**

Ces pertes sont principalement dues aux contacts de frottement et aux fuites dans les roulements. Une mauvaise lubrification ou une détérioration des roulements peuvent causer l'augmentation de ces pertes.

✓ **Pertes supplémentaires P_{sup}**

Elles sont dues à la répartition spatiale de la sinusoïde imparfaite de la force magnétomotrice créant le flux tournant dans l'entrefer (harmoniques au stator et au rotor, et flux de fuite près des extrémités, des enroulements). Aussi, elles sont dues à aux imperfections mécaniques dans l'entrefer et aux irrégularités de flux d'entrefer. Elles varient linéairement avec la puissance de sortie. D'après les normes de mesure du rendement, elles sont estimées à 0.5% de la puissance nominale de la sortie du moteur.

• **Le glissement g**

L'origine des courants rotorique réside dans la différence des vitesses N_s et N_r . On introduit une grandeur fondamentale, sans dimension, le glissement g défini par :

$$g = \frac{N_s - N_r}{N_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \quad (I.4)$$

• **Les puissances :**

✓ **puissance absorbée :**

$$P_a = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \phi \quad (I.5)$$

✓ **puissance utile :**

$$P_u = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \phi - \sum \text{pertes} \quad (\text{I.6})$$

✓ **Puissance transmise au rotor**

$$P_{tr} = P_a - \text{pertes stator} = P_a - p_{js} - p_{fs} \quad (\text{I.7})$$

I.7.2 Normes du rendement

La comparaison du rendement des moteurs se complique davantage par le fait qu'il existe plusieurs façons de mesurer le rendement. Le même moteur évalué selon différentes normes de rendement sera classé de façon différente. Les principales normes sont : [8]

- ✓ CSA C390-M1985 Canadienne ;
- ✓ IEEE-112B Américaine ;
- ✓ IEC-34,2 Européenne ;
- ✓ JEC-37 Japonaise.

- **Norme de la CSA**

L'association canadienne de normalisation (CSA) a mis au point une norme qui tient compte des pertes supplémentaires dues à la charge mesurées indirectement ; la méthode utilisée pour les mesurer s'inspire de celle de l'IEEE. La norme de la CSA est cependant plus rigoureuse que celle de l'IEEE car elle laisse peu de place aux erreurs d'interprétation possibles lors des essais de rendement.

- **Norme de l'IEEE**

La norme de l'IEEE calcule les pertes supplémentaires dues à la charge d'une façon indirecte. Elle vient au deuxième rang pour ce qui est de la prudence des résultats.

- **Norme de l'IEC**

La norme de l'IEC n'est pas aussi précise que les normes de la CSA et de l'IEEE qui calculent les pertes supplémentaires dues à la charge de façon précise. Elle fixe les pertes supplémentaires dues à la charge à 0,5 % de la puissance absorbée en plus d'accorder une tolérance au rendement.

- **Norme de la JEC**

La norme de la JEC fixe à zéro les pertes supplémentaires dues à la charge et accorde une tolérance de 0,7% au rendement déclaré. Cette méthode donne lieu à une surévaluation

du rendement du moteur lorsque les pertes supplémentaires dues à la charge sont supérieures à zéro.

1.7.3. Différentes méthodes de mesures du rendement

L'augmentation du coût de la puissance électrique a rendu l'utilisation des moteurs à faible rendement plus chère. L'amélioration du rendement du moteur à induction est donc très importante. Cette amélioration n'est possible qu'avec la mesure de ce dernier, ainsi la mesure du rendement permet :

- D'étudier la possibilité de remplacer les moteurs en fonctionnement par d'autres à meilleur rendement ;
- D'assurer la fiabilité des procédés en évaluant leur efficacité énergétique ;
- De vérifier la validité de la valeur du rendement indiquée sur la plaque signalétique.

Le rendement dépend de la géométrie des moteurs électriques, des paramètres de construction et de la technologie de fabrication. Plusieurs travaux de recherche à travers le monde se font actuellement pour assurer l'amélioration du rendement énergétique.

Ces travaux présentent plusieurs contraintes telles que :

- Le degré intrusif (nécessite des interventions exigeant le découplage du moteur de sa charge) ;
- Les coûts assez élevés d'opération pour l'industrie ;
- Les limites de la technologie des matériaux (propriétés magnétiques de certains aciers) ;
- La méconnaissance de tous les paramètres liés au rendement.

La particularité des méthodes de la mesure du rendement c'est qu'elles sont applicables directement sur le site de fonctionnement du moteur. Ces méthodes fondamentales se différencient par leur précision, mise en œuvre et convenance par rapport aux conditions d'opération. L'évaluation du rendement peut se baser sur une ou plusieurs méthodes conjuguées. Le degré d'intrusion est en fonction de la difficulté de la grandeur à mesurer, [8].

a) Méthode de la plaque signalétique

Dans laquelle la puissance d'entrée et de sortie est directement mesurée, selon les normes d'IEEE, IEC 60034-2 et d'ABNT NBR. La mesure de puissance d'entrée et de sortie,

effectuée après l'élévation de la température pour le fonctionnement en charge. La norme d'IEEE demande une correction des pertes du stator à une température indiquée avant de déterminer le rendement du moteur, [8].

b) Méthode de directe

Dans laquelle les puissances d'entrée et de sortie sont mesurées avec la séparation des pertes et la mesure indirecte des pertes parasites de charge, selon les normes d'IEEE et de CSA C-390. Les pertes parasites de charge sont définies comme toutes les pertes sans la somme des pertes conventionnelles (pertes électriques, pertes magnétiques et pertes mécaniques). Les pertes parasites de charge sont obtenues à partir des analyses d'une régression linéaire pour réduire l'effet des erreurs aléatoires dans les mesures d'essai. La méthode 2 peut fournir des résultats différents de la méthode 1, principalement en raison des ajustements des pertes parasites de charge dans lesquels toutes les erreurs de mesure d'essai sont incluses, [8].

c) Méthode statique

Méthode dont les conditions d'essais, sont comme vu dans les normes d'IEEE, IEC 60034-2 et d'ABNT NBR. Quand deux machines identiques sont couplées ensemble et alimentées à partir de deux sources d'énergie séparées. Le courant électrique dans et hors des deux machines est mesuré et la différence sont les pertes combinées des deux machines, [8].

d) Méthode du circuit équivalent

Méthode avec la mesure directe des pertes parasites de charge et de la séparation des pertes, selon des normes d'IEEE, IEC 60034-2, CSA C-390 et ABNT NBR. Dans cette méthode, le rendement est indirectement calculé par la détermination de toutes les pertes (pertes électriques, pertes magnétiques et pertes mécaniques et les pertes parasites de charge). Aux normes d'IEEE et de CSA C-390 les pertes parasites de charge sont obtenues directement partir des essais spécifiques, [8].

e) Méthode de séparation de pertes

Méthode dans laquelle les paramètres du circuit équivalent sont déterminés, selon des normes d'IEEE, CSA C-390 et ABNT NBR. Le rendement des moteurs est calculé à partir des paramètres du circuit équivalent. Dans cette méthode, il est très important de prendre l'impédance du rotor aux basses fréquences. La précision de l'impédance du rotor affectera considérablement les caractéristiques sous la charge. En calculant les paramètres, les

réactances sont corrigées à la fréquence et les résistances sont corrigées à une température indiquée, [8].

I.8. Avantages et inconvénients des moteurs à induction

I.8.1. Avantages

Plus grand avantage des moteurs à induction à courant alternatif est leur pure simplicité. Ils ont une seule pièce mobile, le rotor, ce qui les rend à faible coût, calme, durable et relativement sans problème. Moteurs à courant continu, en revanche, ont un commutateur et de carbone brosses qui usent et qui ont besoin être remplacé de temps à autre. Le frottement entre les balais et le collecteur produit aussi des moteurs à courant continu relativement bruyants (et parfois même assez malodorants).

- Une maintenance réduite car pas de balais ni collecteur ;
- Sa robustesse ;
- Son prix (facile à produire, en série), [9].

I.8.2. Inconvénients

Etant donné que la vitesse d'un moteur asynchrone dépend de la fréquence du courant alternatif qui l'entraîne, il tourne à une vitesse constante à moins d'utiliser un variateur de fréquence ; la vitesse de moteurs à courant continu est beaucoup plus facile à contrôler en tournant simplement la tension d'alimentation vers le haut ou vers le bas. Bien que relativement simple, les moteurs à induction peuvent être assez lourds et encombrants à cause de leurs bobinages. Contrairement aux moteurs à courant continu, ils ne peuvent pas être chassés de batteries ou de toute autre source de courant continu (panneaux solaires, par exemple) sans utiliser un onduleur (un dispositif qui transforme DC en AC). Cela est parce qu'ils ont besoin d'un champ magnétique changeant pour faire tourner le rotor, [10].

I.9. Spécificités des moteurs à induction à haut rendement (MI-HR)

1.9.1. Caractéristiques techniques

Lors de l'achat d'un moteur, on doit fournir au fabricant la liste de caractéristiques techniques désirées. Les fabricants tendent à mettre l'accent sur le rendement et la qualité dans la conception de moteur plus gros. Les compromis entre divers paramètres de performance peuvent entraîner une diminution du rendement du moteur. Il est donc très important de préciser dès le début, le rendement désiré, [10].

Il serait également bon de noter que les caractéristiques exigées par le client ne doivent pas modifier les composantes de base du moteur, qui sont :

Boîtier ; Paliers ; Rotor ; Isolation.

Les fabricants de moteurs offrent un produit résultant d'une série de recherches et d'essais. Tout écart des plans de base du fabricant et des normes de sécurité de l'industrie pourrait entraîner des problèmes imprévus. De plus, la responsabilité du fabricant quant à la correction de ces problèmes serait discutable.

Une bonne fiche technique devrait préciser :

- Echauffement et la classe d'isolation ;
- Tension d'alimentation ;
- Courant de démarrage maximal ;
- Inertie de charge et le nombre de démarrage ;
- Temps décalage minimal.



Conditions d'environnement du moteur

Température ambiante ; Altitude ; Degré de sécurité.



Protection nécessaire ainsi que toute option supplémentaire

Protection thermique (système de thermostat/thermistance) ; Radiateurs prévenant la condensation, si nécessaire

1.9.2. Tension d'alimentation

Le choix de la tension d'alimentation d'un moteur est un autre facteur important pouvant altérer son rendement.

Pour un moteur d'une vitesse et d'une puissance spécifiée, le rendement d'un moteur diminue à mesure que la tension spécifiée augmente.

Pour les tensions autres que 600 volts, les enroulements et les encoches du moteur sont modifiés nécessitant un noyau plus gros et donc un boîtier plus grand, par conséquent le rendement est plus faible. Alors, pour les tensions d'alimentation élevées, il serait préférable d'abaisser la tension à l'aide d'un transformateur plutôt que d'opter pour un moteur surdimensionné, [9].

1.9.3. Vitesse

Les moteurs à vitesse élevée offrent habituellement un meilleur rendement. Cependant, cela ne signifie pas qu'il est toujours préférable d'utiliser un moteur à vitesse élevée et d'abaisser sa vitesse à l'aide des mécanismes conçus à cet effet afin de l'adapter à la charge. Les pertes de puissance se produisant au niveau des mécanismes d'abaissement de la vitesse pourraient réduire le rendement du circuit à une valeur inférieure à celle obtenue avec un moteur à commande directe et à faible vitesse, [9].

1.9.4. Couple

Le couple mesure la force servant à produire une rotation. La dimension du moteur est proportionnelle à son couple et non à sa puissance en hp. Ainsi, un moteur à couple élevé est plus gros et coûte habituellement plus cher.

Les moteurs à induction sont classés selon leur couple (modèles A, B, C et D). Le modèle le plus courant est le B.

- a) Les modèles C et D ont un couple de démarrage élevé ;
- b) Le glissement est plus élevé dans le cas du modèle D que dans le cas des modèles B ou C, puisque le modèle D, au couple à pleine charge, fonctionne à un pourcentage moindre de la vitesse synchrone, [9].

I.9.4.1. Couple de démarrage

Est le couple développé à la vitesse nulle. Si le moteur doit entraîner une charge difficile à faire démarrer (une charge à inertie élevée), on choisira alors un moteur procurant un couple de démarrage élevé.

I.9.4.2. Couple minimal pendant le démarrage

Est le couple le plus petit développé par le moteur entre une vitesse nulle et la vitesse de fonctionnement. Il peut s'avérer critique pour une application où la puissance doit dépasser certaines limites temporaires avant de revenir au niveau de fonctionnement normal.

I.9.4.3. Couple de décrochage

Couple le plus élevé que le moteur peut développer avant de caler.

I.9.4.4. Couple à pleine charge (couple moteur)

Couple produit à la vitesse de pleine charge et qui développe la puissance assignée du moteur. En ce point, le produit du couple par la vitesse est égal à la puissance assignée indiquée sur la plaque signalétique, [9].

I.10. Termes décrivant le rendement

Le rendement de deux moteurs de même type fabriqué par deux compagnies distinctes ne sera pas nécessairement identique parce que les compagnies n'ont peut-être pas utilisé exactement les mêmes caractéristiques de fabrication ni les mêmes matériaux, [3].

a) Nominal, moyen prévu ou typique

Le rendement moyen d'un groupe de moteurs.

b) Minimal, minimum ou garanti

Tous les moteurs doivent atteindre ou dépasser ce minimum.

c) Apparent

Ce terme indique le rendement global et le facteur de puissance d'un moteur. Il ne donne cependant pas la valeur exacte ni de l'un ni de l'autre. Le choix d'un moteur ne peut pas se faire seulement à partir du rendement apparent. Le rendement et le facteur de puissance doivent être considérés séparément.

Certains fabricants peuvent déclarer qu'un pourcentage élevé de leurs moteurs répond aux exigences du rendement minimal. Il est important de reconnaître les différents termes utilisés et de ne comparer que des valeurs semblables afin d'arriver à choisir le moteur adéquat. Par exemple, on ne peut comparer le rendement nominal d'un moteur au rendement garanti d'un autre, [10].

I.11. Moteurs à induction à haut rendement (MI-HR)

Récemment, à la suite de la crise énergétique, une nouvelle génération de moteurs, appelés moteurs à haut rendement, a fait son apparition. Comme leur appellation l'indique, ces moteurs ont un rendement et un facteur de puissance supérieur à ceux des moteurs équivalents de construction classique. Leur coût d'achat plus élevé, est rapidement amorti par les économies d'énergie réalisées lorsque ils fonctionnent pendant de longues périodes et à des charges se rapprochant de la pleine charge, [11].

I.11.1. Caractéristiques générales

Les moteurs à haut rendement ont la même construction que les moteurs classiques mais ils se distinguent par :

- 1) L'acier mince et de haute qualité pour les tôles des circuits magnétiques ;
- 2) En augmentant la section du stator et du rotor, on réduit la densité des flux magnétiques et, en conséquence, les pertes par Hystérésis ;
- 3) Les pertes par frottement sont diminuées par l'emploi de paliers plus petits ou de meilleure qualité ;
- 4) Les pertes de ventilation peuvent être réduites en employant des ventilateurs plus petits. De toute façon, les MI-HR fonctionnent à des températures plus basses que les moteurs classiques ;
- 5) Une minimisation de l'épaisseur de l'entrefer entre le stator et le rotor ;
- 6) Une grande longueur ;
- 7) Une augmentation de la taille de la carcasse.

Pour un coût supplémentaire de 20 à 30%, les moteurs efficaces aussi appelés moteurs à haut rendement, ont un rendement meilleur de 2 à 6%, ce qui représente des économies d'énergie significatives.

La réduction des pertes permet une élévation moindre de la température dans le moteur, aussi de plus, dans de nombreux cas :

- 1) La fiabilité augmente ;
- 2) Les coûts de maintenance et d'arrêt sont réduits ;
- 3) La capacité de résistance aux surcharges s'améliore ;
- 4) La résistance aux conditions de fonctionnement anormales – sous et sur tension, aux phases non équilibrées, aux variations de la forme de la puissance et du courant (par exemple les harmoniques), etc. s'améliore ;
- 5) Le facteur de puissance s'améliore, [11].

I.11.2. Avantages d'utilisation des MI-HR

Il y a plusieurs avantages d'utilisation des moteurs à induction à haut rendement :

- 1) Ces moteurs à haut rendement produisent la même puissance de sortie, mais avec une puissance d'entrée électrique moins que les moteurs standards, [12].
- 2) Fiabilité et rendement suffisamment élevé ;

- 3) Présentent les mêmes besoins d'entretien que les moteurs standards ;
- 4) Les frais d'exploitation des moteurs à haut rendement sont inférieurs aux moteurs standard ;
- 5) Ces moteurs sont disponibles aux différentes puissances et avec différentes vitesses (750, 950, 1500, et de 3000 t/mn) à 220/380V ;
- 6) Sont généralement plus chers de 25-30% par rapport aux moteurs standards, alors que le prix de leurs rebobinages est de 60-80% du prix d'un nouveau moteur standard. Au cours de la vie prévue du moteur (en général 10-15 ans) ;
- 7) L'économie à employer un moteur à haut rendement est beaucoup plus grande que son coût initial ;
- 8) Ont typiquement 30-50 % de pertes inférieures que les moteurs standards équivalents ;
- 9) Panne réduite en raison de leur conception et construction ;
- 10) Réduction du nombre de condensateurs pour corriger le facteur de puissance du moteur.

I.11.3. Utilité d'améliorer le rendement

L'amélioration du rendement permet d'économiser l'énergie, de réduire les dépenses d'exploitation et d'améliorer la productivité en permettant aux moteurs d'accomplir plus de travail par unité d'électricité consommée, [11].

I.11.4. Facteurs influents sur le rendement de ME

D'autre part, la taille du moteur, les heures annuelles d'utilisation et le facteur de charge sont tous des facteurs qui influencent l'efficacité énergétique et le rendement. Pour une évaluation plus précise de l'économie d'énergie, il faudrait aussi prendre en considération la dépréciation de la monnaie en fonction du temps et l'inflation du coût de l'énergie, [10].

A) Qualité d'alimentation d'énergie

Les moteurs électriques en particulier moteur à induction, sont conçus pour fonctionner avec une exécution optimale, une fois alimentés par des formes d'ondes sinusoïdales triphasées symétriques avec la valeur de tension nominale. Les déviations de ces conditions idéales peuvent causer la détérioration significative de rendement et de la vie de moteur, [10].

B) Charge du moteur

La charge du moteur peut avoir aussi un effet significatif sur son rendement. Un moteur chargé à plus de 50% a un rendement relativement stable. A charge plus faible, le rendement diminue considérablement. Les faibles rendements sont dus aux charges inadaptées ou à un fonctionnement à vide des moteurs ; de telles conditions doivent être évitées, [10].

C) Maintenance du moteur

Les moteurs fonctionnent plus efficacement, durent plus longtemps et nécessitent moins d'attention s'ils sont nettoyés, refroidis, séchés et lubrifiés correctement. Les moteurs installés dans un environnement sévère et exposés à une grande humidité et à un lavage fréquent ont une durée de vie largement au dessous de la moyenne. Des corps étrangers ne doivent pas bloquer les branchements corrects font prolonger la durée de vie du moteur et maintiennent un rendement optimal. L'inspectant, la mesure périodique de la tension et du courant du moteur est fortement recommandée, [10].

D) Plage d'utilisation des moteurs

D'une manière générale le rendement (η) des moteurs électriques prend une valeur maximale pour : $0.6 I_n \leq I \leq 1.0 I_n$, car dans cette plage on considère, que le rapport des pertes à la puissance consommée est minimal. En dehors de cette plage, les pertes devenant beaucoup plus prépondérantes, entraînent la croissance de ce rapport donc une réduction du rendement (η), [10].

Conclusion

Dans cette partie, premièrement nous avons présenté la définition et le concept de la maîtrise de l'énergie, les différents actions de la ME, et effets des machines électriques sur la ME.

Deuxièmement nous avons donné la constitution générale d'une machine asynchrone, son principe de fonctionnement et ses caractéristiques, les différentes normes de mesure du rendement existant dans le monde entier. On a terminé par les avantages des moteurs à induction à haut rendement et les différents facteurs qui influent sur le rendement des moteurs à induction.

En effet, pour dimensionner ce moteur nous avons choisi comme support de travail une méthode de calcul utilisée par la majorité des chercheurs dans le domaine de la conception et de l'analyse des machines « Méthode de LIWSCHITZ ».

Afin d'améliorer les performances de la machine conçue; on utilisera les algorithmes génétiques qui sera l'objet de la prochaine partie.