

I.1. Introduction

Ce chapitre présente, dans un premier lieu, la constitution de la machine asynchrone, puis il présentera un aperçu sur les différents types de défauts pouvant affecter les machines électriques tournantes et leurs causes. Enfin, les méthodes de diagnostic les plus fréquemment utilisées pour la détection des défauts.

I.2. Constitution de la machine asynchrone

La machine asynchrone est constituée des principaux éléments montrés sur la figure (I.01) portant les enroulements chargés de magnétiser l'entrefer.

- Le rotor est la partie tournante constituée de disques en tôles magnétiques empilés sur l'arbre de la machine portant un enroulement.
- Le stator (partie fixe de la machine) : constitué de disques en tôles magnétique portant les enroulements chargés de magnétiser l'entrefer.
- Les organes mécaniques permettant la rotation du rotor et le maintien des différents sous-ensembles [1-2].

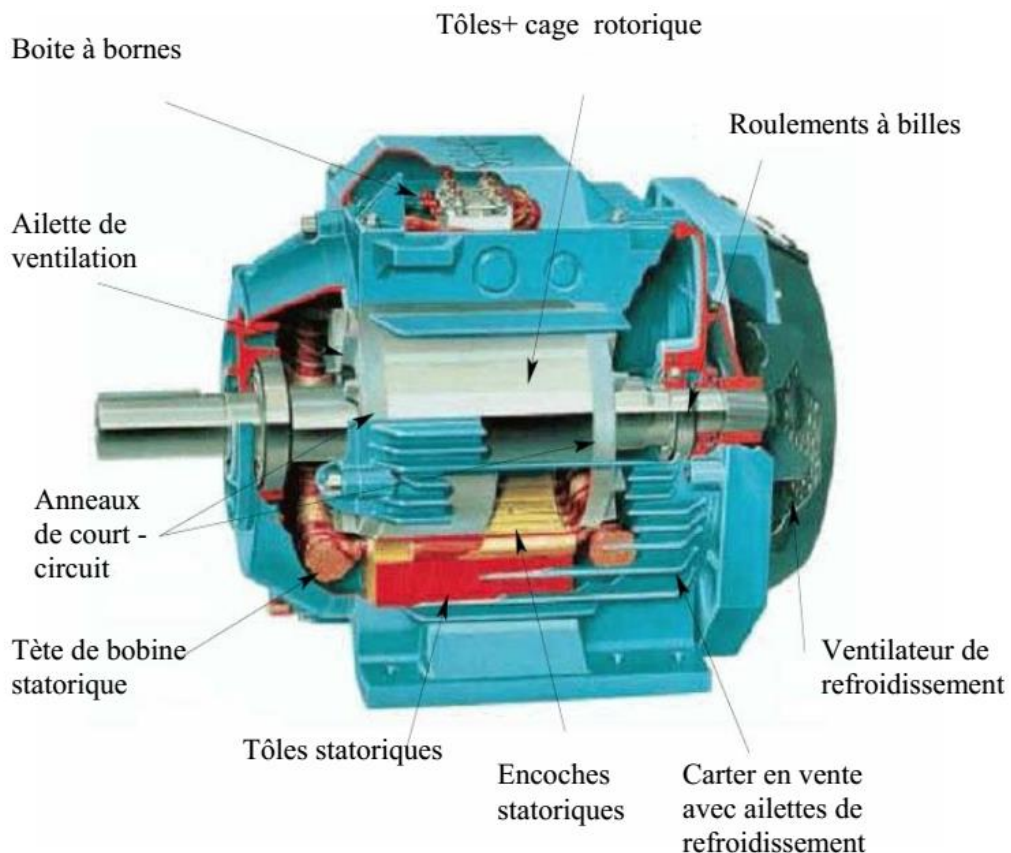


Figure (I.01): Élément de constitution d'une machine asynchrone à cage

I.2.1. Le stator:

Le stator d'un moteur asynchrone est identique à celle d'un moteur synchrone (MAS), 3 enroulements couplés en étoile ou en triangle et décalés entre eux de $2\pi/3$ qui sont alimentés par un système de tensions équilibrées [3].

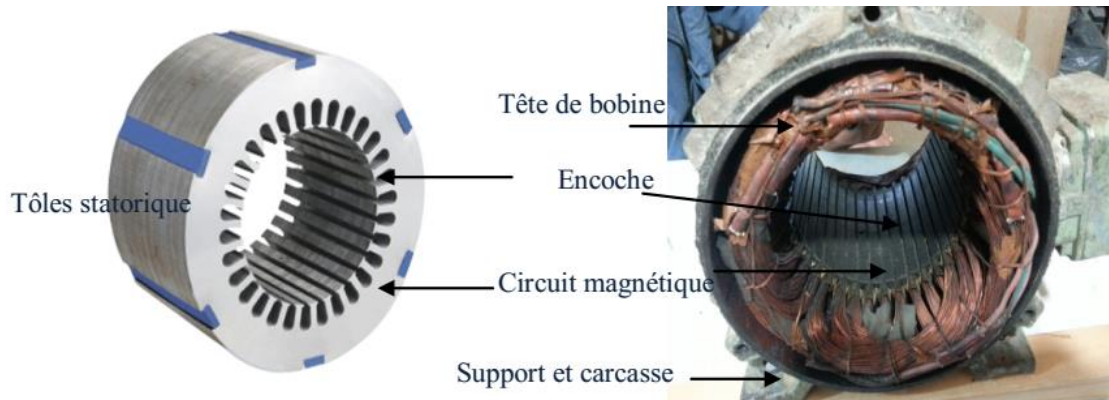


Figure (I.02): Vue stator d'une machine asynchrone

I.2.2. Le rotor:

Le rotor du moteur supporte un bobinage semblable à celle du stator du MAS, bobinage triphasé décalés de $2\pi/3$ à même nombre de pôles que celle du stator du MS. Ces 3 bobinages sont couplés en étoile et court-circuités sur eux-mêmes. Ce type de rotor est dit bobiné mais on peut envisager un rotor plus sommaire constitué de barres conductrices court-circuitées par un anneau conducteur à chaque extrémité [3].



Figure (I.03): Vue rotor d'une machine asynchrone

I.2.3. Les organes mécaniques :

Les paliers où les organes mécaniques, qui permettent de supporter et de mettre en rotation l'arbre rotorique, sont constitués de flasques et de roulements à billes insérés à chaud sur l'arbre.

Les flasques, moulés en fonte, sont fixés sur le carter statorique grâce à des boulons des tiges de serrage.

L'ensemble ainsi établi constitue alors la machine asynchrone à cage d'écureuil.

I.3. Rotor à cage [4]

Le circuit du rotor est constitué de barres conductrices régulièrement réparties entre deux couronnes métalliques formant les extrémités, le tout rappelant la forme d'une cage d'écureuil. Bien entendu, cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique analogue à celui du moteur à rotor bobiné.

Les barres sont faites en cuivre, en bronze ou en aluminium, suivant les caractéristiques mécaniques et électriques recherchées par le constructeur.

Ce type de moteur, beaucoup plus aisé à construire que le moteur à rotor bobiné est par conséquent d'un prix de revient inférieur et a une robustesse intrinsèquement plus grande. Il n'est donc pas étonnant qu'il constitue la plus grande partie du parc des moteurs asynchrones actuellement en service.

Son inconvénient majeur est qu'il a, au démarrage, de mauvaises performances (courant élevé et faible couple). C'est pour remédier à cette situation qu'ont été développés deux autres types de cages (rotor à double cage et rotor à encoches profondes).

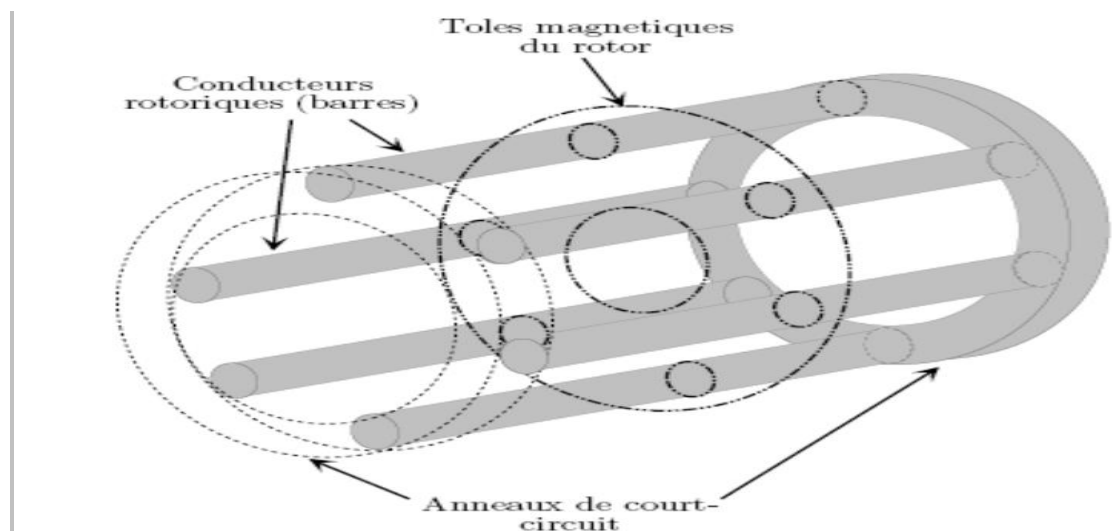


Figure (I.04) : Vue schématique en perspective du rotor (tôles magnétiques, conductrices d'encoches (barres) et anneaux de court-circuit.

I.4. les défauts affectant la machine asynchrone

Bien que les machines asynchrones à cage d'écureuil soient réputées robustes, elles peuvent parfois présenter différents types de défauts, ces défauts peuvent être soit d'origine

électrique, soit d'origine mécanique. Un problème minime à l'étape de fabrication peut être à l'origine d'un défaut, tout comme une utilisation non conforme de la machine.

I.4.1. Etude statistique :

De multiples défaillances peuvent apparaître dans les machines asynchrones. Elles peuvent être prévisibles ou intempestives, mécaniques ou électriques. Leurs causes sont très variées. Plusieurs études ont été effectuées sur la fiabilité des machines électriques réalisées par différents groupes industriels [4].

La figure (I.05) récapitule la distribution des défauts dans les moteurs examinés dans les études. Par exemple on a été constaté que dans les machines asynchrones à cage, les défauts rotoriques sont plus élevés que les défauts statoriques.

Parmi ces études réalisées par W.T.THOMSON en 1999, la répartition des défaillances était comme suit : les roulements (41%), le stator (37%), le rotor (10%) et les autres pannes (12%). Après une décennie, une autre étude est menée par A.H.BONNETT a montré que : les enroulements (69%), le stator (21%), le rotor (7%) et les autres pannes (3%) [5].

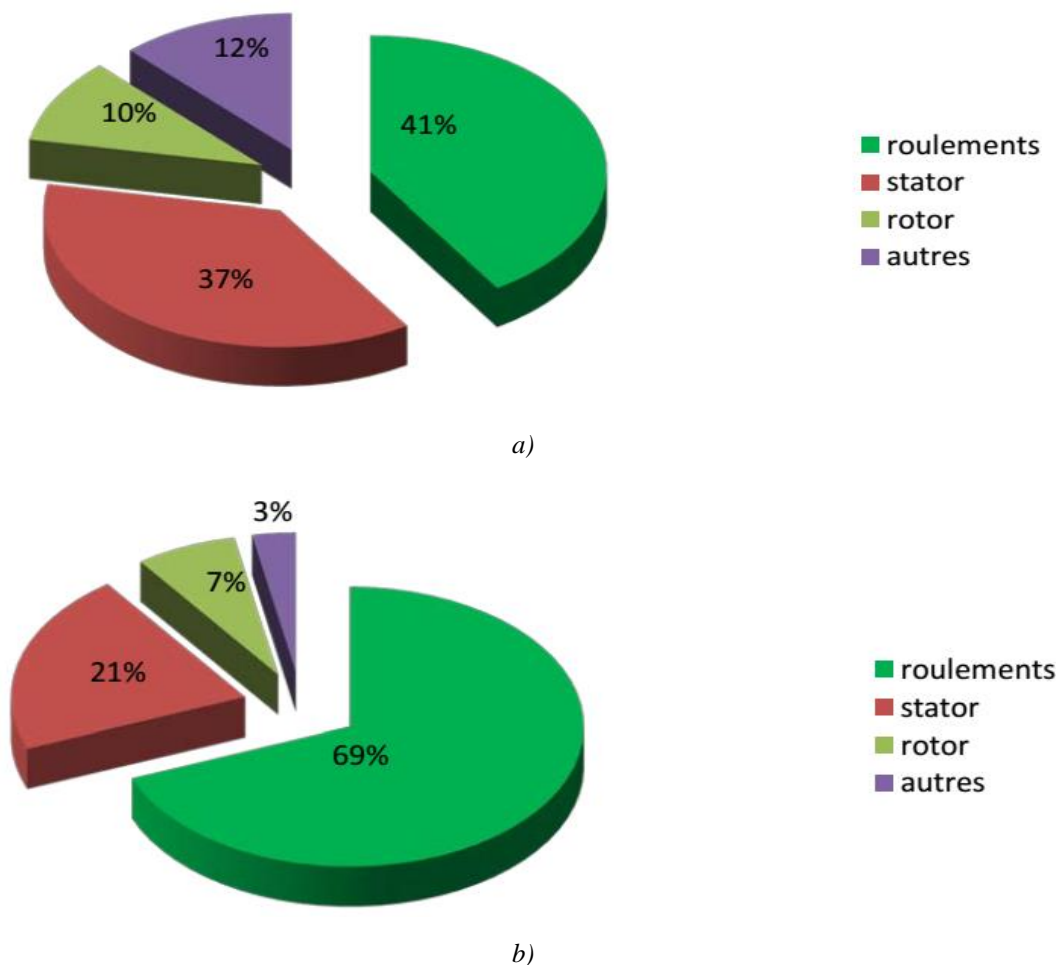


Figure (I.05): Evolution des statistiques des pannes dans machine asynchrone à cage
, a) Thomson 1999 [6], b) Bonnet 2008 [7]

I.4.2. Les causes des défauts

Pour le stator, les effets sont principalement dus à un problème [6]:

- thermique (surcharge).
- électrique (diélectrique).
- mécanique (bobinage).
- environnemental (agression).

Pour le rotor, les effets sont essentiellement dus à un problème :

- thermique (surcharge).
- électromagnétique.
- résiduel (déformation).
- dynamique (arbre de transmission).
- mécanique (roulement).
- environnemental (agression).

I.4.3. Les défauts statoriques

L'armature statorique, munie de son bobinage est une partie de la machine qui subit beaucoup de contraintes et dont les effets sont plus importants à cause de la complexité de la structure et la fragilité de certaines parties telles que les isolants. La quasi totalité de ces défauts sont dus à la dégradation de l'isolant [1-9-5] ils se manifestent sous la forme :



Figure (I.06): Stator d'un moteur asynchrone complètement grillé [5]

I.4.3.1. Défaut d'isolement dans un enroulement

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des courts-circuits. En effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique, ... etc.) engendrent des phénomènes thermiques se traduisant par une augmentation de la température des différents constituants du moteur. Or, les matériaux d'isolation ont une limite thermique, électrique et mécanique. De ce fait, si l'environnement de travail d'un matériau d'isolation dépasse une de ces limites, ce dernier se dégrade de manière prématurée ou accélérée, jusqu'à la cassure totale. Les différentes causes pour ce type de défaut sont [1-9] :

- ✚ Dégradation de l'isolant à la fabrication.
- ✚ Tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation.
- ✚ Vibrations mécaniques.
- ✚ Courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, ou à une surcharge. Ceci entraîne une élévation de la température dégradant prématurément le matériau d'isolation.
- ✚ Vieillesse naturelle des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie limitée. Même dans une utilisation 'normale', l'isolant finit naturellement par se dégrader.
- ✚ Fonctionnement dans un environnement sévère.

I.4.3.2. Court-circuit entre spires

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Cette défaillance a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné. Il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique. Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau du bobinage et, de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant provoquer ainsi, un défaut en chaîne (apparition d'un 2^{ème} court-circuit). Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations proportionnelle au défaut [1-9].

I.4.3.3. Court-circuit entre phases

Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage, cependant les Répercussions ne seront pas les mêmes selon la localisation. Cette caractéristique rend difficile une analyse de l'incidence de ce défaut sur le système.

L'apparition d'un court-circuit proche de l'alimentation entre phases, induirait des courants par les protections. D'autre part, un court-circuit proche du neutre entre deux phases engendre un déséquilibre sans provoquer la fusion des conducteurs.

Les courants statoriques sont totalement déséquilibrés et ce déséquilibre est proportionnel au défaut qui apparaît. Les courants dans les barres ainsi que dans les anneaux sont augmentés lors de l'apparition de ce défaut. La détection de ce type de défaut peut reposer sur le déséquilibre des courants de phases [10].



Figure (I.07): Défaut de court-circuit entre phases

I.4.3.4. Court-circuit phase/bâti

Le bâti a généralement un potentiel flottant, mais pour des raisons de liaisons Mécaniques, il est souvent relié à la masse. Si le potentiel est flottant, un court-circuit entre l'enroulement et le bâti n'a pas d'importance du point de vue matériel, excepté les effets capacitifs, le bâti prend alors le potentiel de l'enroulement à l'endroit du court-circuit. Par contre, au niveau de la sécurité des personnes, ce type de défaut peut être très dangereux et il est alors nécessaire de mettre en place des dispositifs de protection (disjoncteurs différentiels).

En présence de ce type de défaillance, la tension de la phase concernée ne change pas. Cependant le courant circulant dans cette phase augmente avec la réduction de la résistance et de l'inductance. Cette augmentation du courant se traduit par une augmentation de la température

pouvant entraîner des défauts d'isolant dans l'enroulement. De plus, cette défaillance va générer une composante homopolaire entraînant l'apparition d'un couple pulsatoire. Une mesure du courant de fuite pourrait permettre de détecter ce type de défaut [1-9].

I.4.3.5. Circuit ouvert sur une phase

Un circuit ouvert dans une phase a des conséquences moins graves qu'un court-circuit. L'ouverture d'une des phases ne fait pas circuler de courant de faute et ne pose donc pas de problème d'échauffement pouvant détériorer le reste de la machine. De même, un circuit ouvert ne crée pas de couple résistant lorsqu'un champ variable est appliqué à la bobine. Le seul problème est donc la perte d'une phase et donc de production du couple. Dans le cas d'un moteur triphasé alimenté par un onduleur à trois bras, la seule manière de pouvoir assurer un minimum le fonctionnement est de piloter les deux phases restantes, c'est-à-dire avec un fonctionnement équivalent à une machine à une phase. Le problème vient alors des ondulations de couple importantes et du fait de ne pas pouvoir assurer un service nécessitant des changements de sens de rotation et des phases marche/arrêt fréquentes (passage par une vitesse nulle) [10].

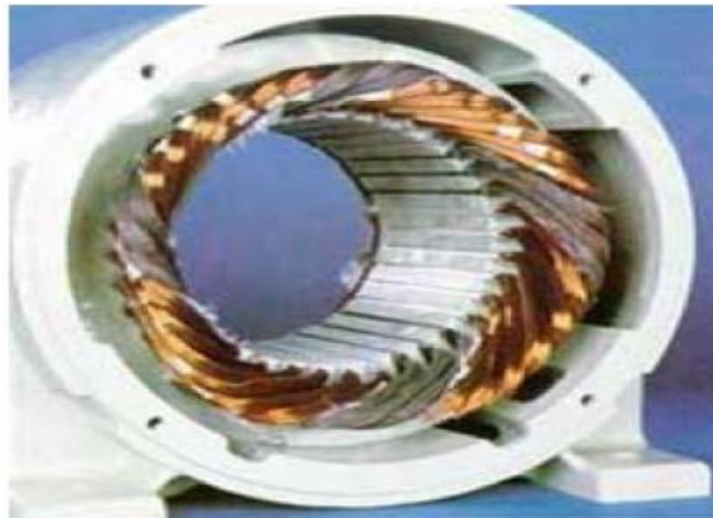


Figure (I.08): Défaut d'ouverture d'une phase

I.4.3.6. Court-circuit dans une phase

Un court-circuit dans une phase est un des problèmes les plus difficiles à tolérer. Dans ce cas, la littérature présente la phase concernée comme perdue. Sur une machine triphasée avec un onduleur à trois bras, cela implique l'arrêt de la machine à cause des conséquences physiques sur le moteur en cas de maintien de l'alimentation. La conséquence la plus importante est l'apparition des courants de court-circuit. Le principal problème étant l'échauffement important

pouvant propager la faute. L'importance des courants de faute dépend directement du nombre des spires en court-circuit.

Il aussi prendre en compte le fait que des spires en court-circuit engendrent un couple résistant dû aux courants induits par le flux d'excitation circulant et les mutuelles de la machine en fonctionnement suit à la panne de la machine [10].

I.4.3.7. Defaults de circuit magnétique

Ces défauts aboutissent dans la plupart des cas à une dissymétrie au niveau du fonctionnement de la machine, qui à son tour peut accentuer le problème par des phénomènes de surchauffe, de surtension, d'élévation importante du courant, etc [1-9].



a) Déséquilibre de l'alimentation



b) Damage dû à la surcharge



c) Masse dans l'encoche



d) Dégradation causée par une surtension

Figure (I.09): Différents défauts statoriques de la machine asynchrone

I.4.4 Les défauts rotorique

I.4.4.1 Rupture des barres rotoriques

La rupture des barres du rotor est un problème de grande importance pour les systèmes d'entraînement à base de moteurs à induction. C'est un des défauts les plus fréquents au rotor (figure (I.10)) [11].

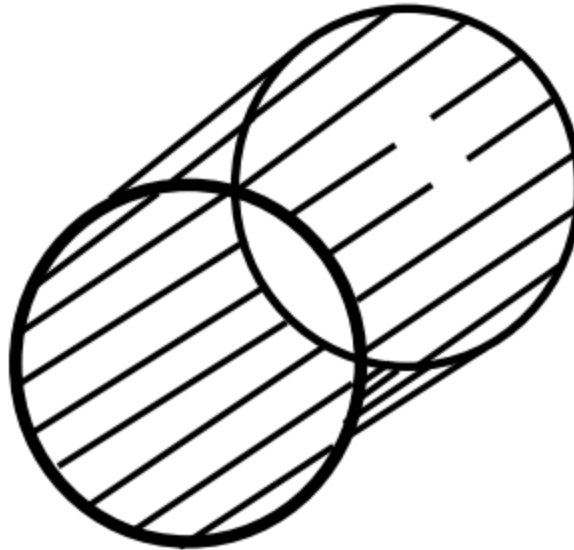


Figure (I.10) : Défaits de rupture des barres

La rupture peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotorique. Les fragments de barres cassés, projetés à grande vitesse heurtent les enroulements du stator, ce qui cause de sérieux dégâts mécaniques à l'isolation des enroulements et provoque leur défaillance. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation, ce qui engendre des vibrations mécaniques et donc, un fonctionnement anormal de la machine. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration de la machine. Ainsi, le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec le nombre de barres cassées.

I.4.4.2. Rupture de portion d'anneau

La rupture de portion d'anneau (figure (I.11)) est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres [11].

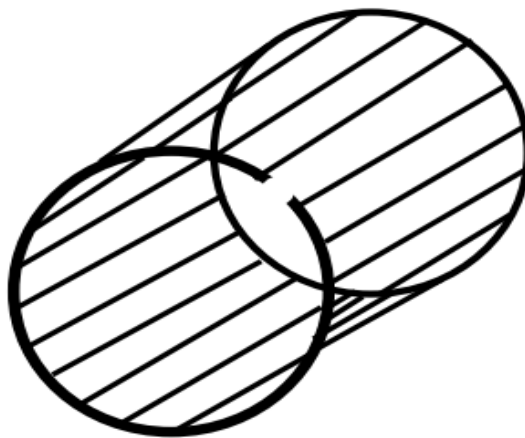


Figure (I.11) : Défauts de rupture d'anneau de court-circuit

Ces ruptures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux. Comme il est difficile de le détecter, ce défaut est généralement groupé, voir confondu, avec la rupture de barres dans les études statistiques. Ces portions d'anneaux de court circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité,...) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure. La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaire à celui provoqué par la cassure de barres.

I.4.4.3. Les défauts d'excentricité

On distingue deux cas d'excentricité (figure I.12):

- **Excentricité statique:** le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe.
- **Excentricité dynamiques :** le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe.

L'apparition des deux types d'excentricité au même temps est généralement appelé : Excentricité mixte.

Les causes peuvent être; le positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, l'usure des paliers ou la torsion de l'arbre.

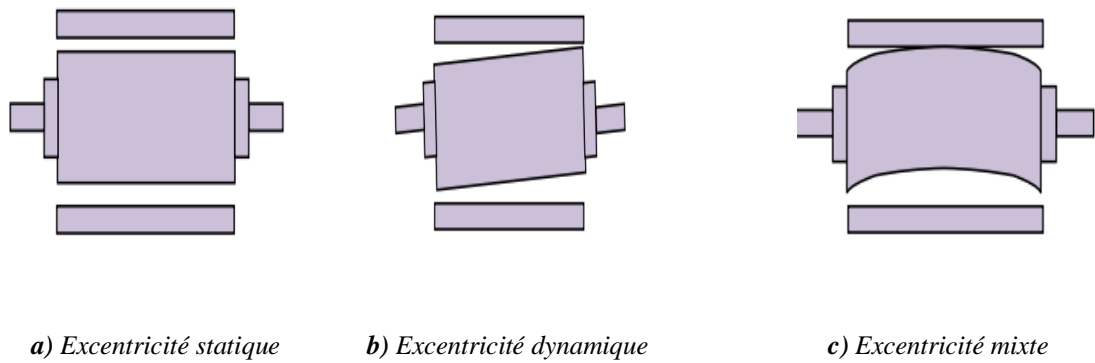


Figure (I.12) : Représentation de l'excentricité statique, dynamique et mixte

I.4.4.4. Les défauts de roulement

Les défauts de roulement se manifestent comme de défauts d'asymétrie au rotor qui sont usuellement rangés dans la catégorie des défauts relatifs à l'excentricité. Un défaut de roulement se manifeste par la répartition continue du contact défectueux avec la cage de roulement extérieur comme intérieur [4].

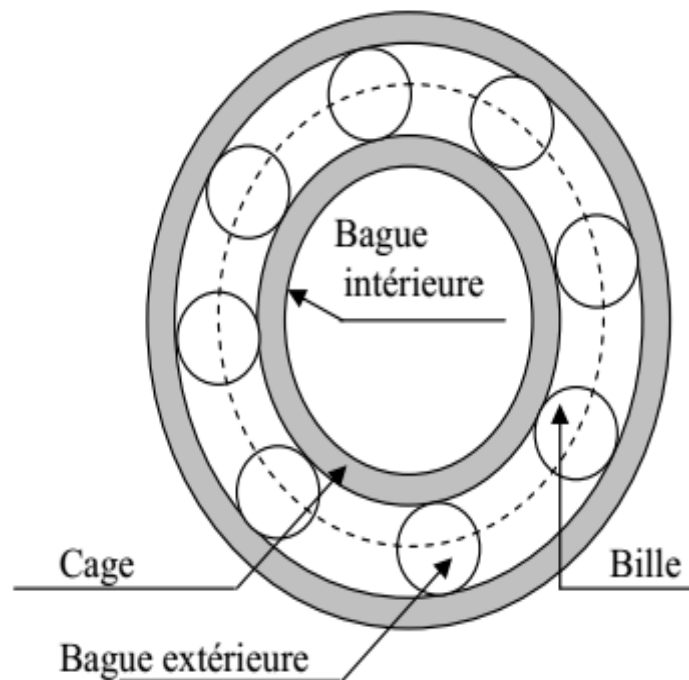


Figure (I.13) : Roulement à bille

I.5 Diagnostic des défauts dans machine asynchrone

I.5.1 Définition de diagnostic

Le mot **diagnostic** puis leurs peut avoir plusieurs interprétations selon le contexte et le domaine d'application. Le diagnostic des procédés industriels a pour objet de trouver la cause d'une défaillance ou d'un défaut. La définition de ce dernier adoptée par les instances internationales de normalisation "AFNOR" (association française de normalisation) est la suivante:

Le diagnostic est l'identification de la cause probable de là (ou des) défaillance(s) à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test.

I.5.2 Techniques de diagnostic

I.5.2.1 Diagnostic par l'analyse du courant statorique

La mesure des signaux puis leurs traitements dans le domaine fréquentiel ne peuvent servir, que si les composantes fréquentielles définies pour chaque défaut sont connues. Il y a plusieurs techniques pour effectuer l'analyse des courants. La plus utilisée est de réaliser une analyse fréquentielle (FFT par exemple) directement sur les courants statoriques i_{sa} , i_{sb} ou i_{sc} . Cette méthode, connue sous le nom de MCSA, est largement employée depuis ces dernières années [11].

I.5.2.2 Diagnostic par l'analyse des flux

La conversion électromécanique de l'énergie est localisée dans l'entrefer. Cette conversion peut être affectée par tout déséquilibre de type magnétique, électrique ou électromagnétique au niveau du rotor ou du stator. Le flux d'entrefer, le flux embrassé par les enroulements statoriques ou encore le flux de fuite dans l'axe du rotor sont des paramètres qui, à cause de leur sensibilité à tout déséquilibre de la machine, méritent d'être analysés [12].

Par exemple, le flux axial est toujours présent dans les machines électriques à cause des dissymétries inhérentes à leur fabrication. L'étude des variations de ce flux est donc considérée par beaucoup d'auteurs comme une solution pour détecter et localiser un défaut.

I.5.2.3 diagnostic par mesurer de la température

Un capteur peut être monté sur l'enroulement ou noyé (intégré) dans l'isolant ou placé dans la plaque à bornes est un bon indicateur de la surchauffe de la machine qui est un signe de défauts. En plus, récemment des techniques par visualisation des images thermiques par infrarouge sont utilisées pour le diagnostic des différents défauts [5].

I.5.2.4 Diagnostic par l'utilisation les courants de Park

Il existe une autre méthode d'analyse du courant c'est l'analyse par l'approche des vecteurs du Park. Elle est utilisée pour les moteurs alimentés par système triphasé. Les trois grandeurs de la machine sont transformés en grandeurs biphasées selon les axes "d" et "q", et qui sont utilisées pour tracer la courbe de Lissajou " $I_q = f(I_d)$ ". Le changement de la forme et de l'épaisseur de cette courbe donne une information sur le défaut. L'analyse spectrale du module des deux vecteurs de Park est aussi un moyen pour surveiller l'état de la machine [2].

I.5.2.5 Diagnostic par analyse des signaux vibratoires

L'analyse des défaillances des moteurs électriques par les signaux vibratoires et acoustiques permet une détection de quasiment tous les défauts, notamment ceux mécaniques, pouvant se produire sur le processus. Cette analyse peut être réalisée à partir de capteurs, généralement des accéléromètres, placés sur les paliers dans les directions verticales, axiales et radiales [5].

Pour surveiller l'état des roulements, des recherches utilisent un capteur laser pour lire directement les déplacements causés par les défauts de roulement. Dans ces méthodes, il faut que le capteur de déplacement laser soit placé sur la surface d'appui, ce qui n'est généralement pas facile à mettre en œuvre.

I.5.2.6 Diagnostic basé sur l'intelligence artificielle

L'intégration des connaissances symboliques et quantitatives, en utilisant un système neuro-flou, constitue un nouvel axe de recherche dans le domaine de la détection et de la localisation des défauts. De tels systèmes combinent entre l'habileté des réseaux de neurones et la représentation explicite de la logique floue, ce qui constitue un avantage considérable pour la résolution du problème, en particulier, pour les systèmes non linéaires [4].

I.5.2.7 Diagnostic par l'analyse de la puissance instantanée

Il est clair que le niveau d'informations portées par le signal de la puissance est plus grand que celui donné par le courant d'une seule phase, ce qui représente l'avantage de cette méthode par rapport aux autres. Cette méthode est utilisée pour la détection des défauts mécaniques ou encore les défauts électriques tels que courts-circuits entre spires statoriques [11].

I.5.2.8 Diagnostic par l'analyse du couple électromagnétique

Il est clair que le couple électromagnétique développé dans les machines électriques, provient de l'interaction entre le champ statorique et rotorique. Par conséquent tout défaut soit au niveau du stator ou au rotor, affecte directement le couple électromagnétique. L'analyse spectrale de ce signal donne les informations pertinentes sur l'état du moteur [11].

Cependant la nécessité d'un équipement assez coûteux pour l'acquisition de cette grandeur représente l'inconvénient majeur de cette méthode.

I.5.2.9 Diagnostic par les analyses chimiques

La plupart des moteurs sont refroidis par l'air, ou le plus souvent à l'aide d'un circuit fermé avec échangeur de chaleur refroidi à l'eau, la dégradation de l'isolation électrique dans le moteur produit le gaz d'oxyde de carbone qui apparaît dans le circuit de l'air de refroidissement et qui peut être détecté par une technique d'absorption infrarouge. Dans certains cas, l'huile de roulement est analysée régulièrement, et l'intervention est requise si les produits indiquant la dégradation sont présents [4].

I.6 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la constitution de la machine et présente une liste non exhaustive des différentes défaillances pouvant se produire sur la machine asynchrone, ainsi que les causes et les conséquences de leur apparition.

Ensuite on a présenté une partie des différentes techniques de diagnostic des défauts de la machine asynchrone.

