

## **I.1 Introduction**

Les moteurs asynchrones triphasés sont maintenant largement utilisés dans des applications à vitesse variable. Ils peuvent faire l'objet de commandes de types scalaires ou vectoriels. Ces machines ont la réputation d'être robustes et adaptées à des applications de forte puissance. Malgré les qualités évoquées, il n'est pas rare que ces moteurs présentent quelques défaillances émanant d'un vieillissement prématuré.

En effet, le diagnostic des défaillances des systèmes industriels, réalisé avec efficacité, permet de détecter de façon rapide les anomalies, chose qui représente un des moyens pour contribuer à améliorer la productivité des différents secteurs.

## **I.2 Différents défauts dans les systèmes électromécaniques**

### **I.2.1 Défaut dû au réseau d'alimentation**

Les réseaux et les installations électriques sont le siège d'incidents de nature aléatoire, dont les plus fréquents sont :

- Court-circuit entre les phases,
- Coupures de phase d'alimentation,
- Déséquilibre des tensions d'alimentation.

Les répercussions de ces anomalies sur la continuité du service et le fonctionnement des équipements dépendent de la nature du défaut. Ce dernier est provoqué soit dans les réseaux aériens soit par des contraintes de nature :

- climatique (pluie, foudre,...),
- d'environnement (branches d'arbres, plombes de chasses,...),
- par suite de l'interconnexion des différents réseaux.

Il en résulte que les installations électriques peuvent subir un nombre difficilement prévisible de perturbations de tension dont l'influence se caractérise par, soit une chute de tension transitoire, soit une coupure brève. Dans les cas les plus graves, cela provoque la coupure de longue durée.

### I.2.2 Défaut dû au moteur asynchrone

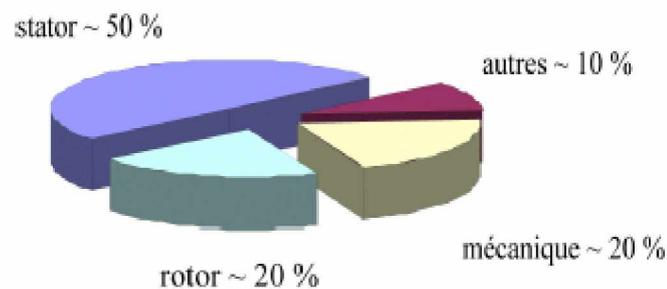
Il s'agit, à partir de l'analyse du défaut, de programmer l'arrêt d'un processus d'une chaîne de fabrication pour le remplacement et la révision des éléments défaillants. Le diagnostic et la détection précoces de défauts revêtent assez d'importance et soulèvent assez de difficultés pour mobiliser les chercheurs dans les domaines allant de l'électrotechnique à l'automatique en passant par le traitement du signal.

Un des défauts les plus difficiles à détecter concerne la rupture de barre ou celle d'une portion d'anneau de la cage rotorique, la mesure directe étant impossible.

Les causes des défauts sont multiples. Elles peuvent être classées en trois catégories :

- les générateurs de pannes ou unités de défauts : surchauffage du moteur, défaut électrique (court-circuit), problèmes mécaniques, (rupture de fixations), problème d'isolation, (surtension de l'alimentation),
- les amplificateurs de défauts : surcharge fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, alimentation perturbée (instabilité de la tension ou de la fréquence), échauffement permanent, mauvais graissage, vieillissement,
- les vices de fabrication et les erreurs humaines : défauts de fabrication, défectuosité des composants, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine.

Ces défauts peuvent être classés selon les statistiques suivantes [RAZ 01], [BOU 03] :



**Figure I.1** : Répartition des pannes

#### I.2. 2.1 Défauts statoriques

Le stator est soumis à des contraintes électriques plutôt que mécaniques. Présents essentiellement comme défauts la mise en court-circuit d'une ou plusieurs spires de son bobinage, ou l'ouverture d'une des phases d'alimentations. A partir des études, il a été montré que le courant statorique avait un spectre enrichi en harmoniques dûs au court circuit entre une ou plusieurs spires statoriques (figure I.2).

Les fréquences sont données par la relation [RAZ 02], [RAZ 03] :

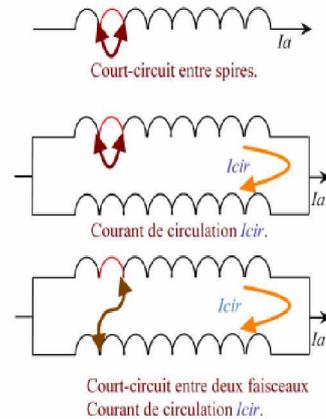
$$f_{cc} = f_s \left\{ \frac{n}{p} (1 - g) \pm k \right\} \quad (1-1)$$

où :

$f_{cc}$  : fréquence de "court-circuit"

$f$  : fréquence d'alimentation

$n$  : entier naturel



**Figure I.2 :** Différents court circuits au stator

### I.2. 2.2 Défauts rotoriques

Les différents éléments pouvant être affectés par un défaut rotorique se répartissent en trois catégories :

- portion d'anneau ou barre rotorique,
- roulement à billes,
- excentricité statique, dynamique ou mixte.

#### A- Défaut de cassure de barre

Suivant la puissance du moteur, la cage d'écureuil est constituée des barres en cuivre ou en aluminium. Il peut donc exister ou non des courants inter barres.

Les fréquences, engendrées autour de la fréquence du fondamental de la tension d'alimentation par un défaut dû à la cassure d'une barre ou de portion d'anneau, sont données par l'expression [RAZ 02], [REZ 03] :

$$f_{bc} = (1 \pm 2kg) f_s \quad (1-2)$$

avec :

$k$  : entier naturel

Par contre, les harmoniques d'espace génèrent eux aussi des fréquences données par :

$$f_b = f_s \left\{ 1 \pm k \frac{(1-g)}{p} \right\} \quad (1-3)$$

avec :

$k$  : entier naturel impair

## B- Défaut d'excentricité

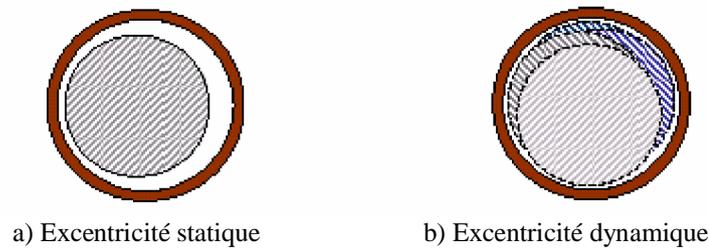
La variation de la longueur de l'entrefer entraîne des variations dans la densité du flux d'entrefer. Les enroulements statoriques sont électriquement affectés. On retrouve alors ces effets dans le spectre des courants.

On distingue généralement trois types d'excentricité [BAG 99] [ABE 02] [CAS 03] :

- l'excentricité statique où le rotor est déplacé du centre de l'alésage statorique mais tourne autour de lui même.

- l'excentricité dynamique ou le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe,

-l'excentricité mixte associant les deux types statique et dynamique.



**Figure I.3** : Représentation de l'excentricité statique et dynamique

Les causes de l'excentricité peuvent être dues au positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à l'usure des paliers ou à la torsion de l'arbre figure (I.3).

Pour l'excentricité statique les fréquences des harmoniques qui apparaissent peuvent être données par l'équation 1.4 [CAS 03], [RAZ 03] :

$$f_{\text{ex}} = f_s \left[ 1 \pm \frac{n \cdot N_r (1 - g)}{p} \right] \quad (1-4)$$

Par contre pour l'excentricité dynamique, on a :

$$f_{\text{ex}} = f_s [1 \pm 2 \cdot n (1 - g)] \quad (1-5)$$

Dans le cas d'un désalignement, on a :

$$f_{\text{ex}} = f_s \left[ 1 \pm \frac{n(1 - g)}{p} \right] \quad (1-6)$$

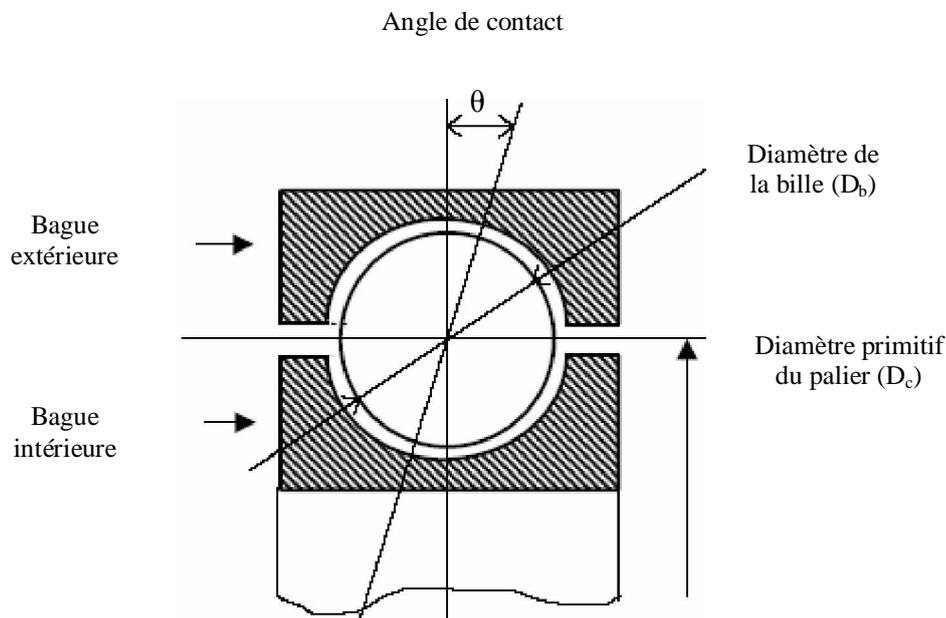
L'origine du désalignement est introduite dans le paragraphe suivant.

### C- Défaut dû au palier

Lors de l'installation de la machine, le palier est souvent appuyé sur l'arbre ou dans le carter, ce qui provoque un désalignement qui peut apparaître de quatre manières différentes [CAS 03] :

- le désalignement proprement dit où les deux paliers (supportant le même arbre) ne sont pas dans le même axe,
- la flexion de l'arbre,
- l'inclinaison d'une bague extérieure du roulement,
- l'inclinaison d'une bague intérieure du roulement.

Les vibrations dans les paliers se manifestent dans le spectre des courants statoriques par l'apparition de raies. Etant donné que les paliers supportent le rotor, grâce aux roulements, un défaut dans ceux-ci produira un mouvement radial entre le rotor et le stator. Les fréquences caractéristiques du défaut sont déduites des dimensions ( $D_b$  et  $D_c$ ) des paliers et des roulements à billes comme le montre l'expression (1-7)



**Figure I.4 :** Vue en coupe de la partie supérieure d'un roulement à billes

En fonction du nombre de billes, noté  $n_b$ , on définit les composantes fréquentielles spécifiques aux vibrations des paliers notées  $f_{pal}$  et définies par.

$$f_{pal} = f_s \pm n.f_{i,e}$$

$$n=1, 2, 3, \dots$$

où:

i : bague interne,

e : bague externe .

$$f_{i,e} = \frac{n_b}{2} f_r \left(1 \pm \frac{D_b}{D_c} \cos(\theta)\right) \quad (1-7)$$

De manière plus précise, on définit les fréquences relatives avec bagues internes et externes des roulements respectivement par les expressions [CAS 03] :

$$\begin{cases} f_{\text{int}} = \frac{n_b}{2} f_r \left(1 + \frac{D_b}{D_c} \cos \theta\right) \\ f_{\text{ext}} = \frac{n_b}{2} f_r \left(1 - \frac{D_b}{D_c} \cos \theta\right) \end{cases} \quad (1-8)$$

L'expression 1-9 tient en compte les données spécifiques au roulement à billes.

.avec :

$\theta$  : L'angle de contact de la bille avec la cage

En considérant que le nombre de billes est compris habituellement entre 6 et 12, deux relations sont couramment utilisées. L'expression 1.7 peut s'écrire :

$$\begin{cases} f_{\text{int}} = 0.6n_b \cdot f_r \\ f_{\text{ext}} = 0.6n_b \cdot f_r \end{cases} \quad (1-9)$$

### I.3 Methodes de diagnostic

La méthode de diagnostic la plus appropriée à un système industriel donné ne peut se faire qu'après un recensement des besoins et des connaissances disponibles.

Pour effectuer le diagnostic d'une installation industrielle, les opérateurs de maintenance analysent un certain nombre de signaux issus de la machine. En effet, l'évolution temporelle et le contenu spectral de ces signaux peuvent être exploités pour détecter et localiser les anomalies qui affectent le bon fonctionnement de la machine [BOU 01] [ABE 02].

On peut classer les méthodes de diagnostic en premier lieu dans les deux grandes familles :

- les méthodes internes et externes,
- les méthodes inductives et déductives.

### **I.3.1 Méthodes internes**

Les méthodes internes dépendent de la connaissance obtenue à partir de modèles mathématiques du système.

Cette famille de méthodes est principalement dérivée des techniques utilisées par les automaticiens.

A partir des techniques d'identification de paramètres, il devient possible de mettre en oeuvre la méthode du problème inverse. Le diagnostic de défaillance est possible en suivant en temps réel l'évolution des paramètres physiques ou bien en utilisant l'inversion de modèles de type "boite noire " [ABE 02].

Elles impliquent une connaissance approfondie du fonctionnement sous la forme de modèles mathématiques qui devront être obligatoirement validés expérimentalement avant toute utilisation industrielle. Les méthodes de diagnostic internes se regroupent en trois grandes familles :

- la méthode de modèle,
- les méthodes d'identification de paramètres,
- les méthodes d'estimation du vecteur d'état.

### **I.3.2 Méthodes externes**

Les méthodes externes utilisent la connaissance issue de l'expertise humaine. Ces méthodes se basent sur l'analyse des signaux que fournit la machine lors de son fonctionnement. Les signaux utilisables peuvent être :

flux d'entrefer, puissance instantanée, courants statorique et vibrations acoustiques.

L'analyse des signaux est réalisée en régime permanent car le nombre de points d'acquisition est suffisant pour faire tous les types d'analyse. Le régime transitoire est riche en information fréquentielle mais à cause de sa faible durée, il limite le nombre de points d'acquisition, ce qui rend l'analyse difficile et moins précise [BOU 01].

### **I.3.3 Méthodes inductives**

Les méthodes de diagnostic correspondent à une approche montante ou recherche en avant. Il s'agit de trouver le défaut à partir de ses effets sur le système. Ces méthodes utilisent un mécanisme de raisonnement en avant qui a pour objectif d'interpréter les symptômes ainsi que leurs combinaisons afin de trouver le défaut.

### **I.3.4 Méthodes déductives**

Le raisonnement en arrière est la principale caractéristique de ces méthodes. Les méthodes déductives doivent trouver quels sont les effets dans les systèmes. Une vérification des "effets trouvés par rapport aux "effets possibles" permet de confirmer ou d'infirmer l'existence du défaut. Ce qui justifie notre raisonnement [ABE 99] [BOU 01].

Le diagnostic peut utiliser soit un seul type de raisonnement (avant ou arrière) soit une combinaison de raisonnements (avant et arrière). Dans ce dernier cas, le raisonnement est appelé raisonnement mixte ou avant arrière. La connaissance "à priori" de la cause " défaut " implique la connaissance de certains effets [ABE 02].

### **I.4 Modèle de la machine asynchrone à cage**

La modélisation et la simulation des machines constituent une étape primordiale en matière de diagnostic. Elles permettent la compréhension du fonctionnement defectueux, la vérification des algorithmes de détection du défaut et elles apportent également la possibilité de construire des bases de données sur les manifestations électriques et magnétiques de ces défauts. Parmi les approches de modélisation existantes, on cite [REZ 03] :

#### **I.4.1 Approches analytiques**

Les modélisations analytiques reposent sur le concept d'inductance, notion qui se caractérise par une relation linéaire entre le flux et le courant.

Cette approche globale des phénomènes électromagnétiques permet d'établir un schéma électrique équivalent de la machine. L'utilisation de la théorie des circuits et des systèmes permet de trouver les équations différentielles caractérisant le fonctionnement de la machine [BAG 02] [ABE 99].

Ces dernières seront intégrées analytiquement, ce qui permet de réduire considérablement la complexité des calculs. Dans ce cadre, plusieurs modèles mathématiques ont été développés avec plusieurs degrés de complexité.

#### **I.4.2 Approches numériques**

- **à base d'éléments finis**

Il s'agit de découper le circuit magnétique de la machine en éléments de dimensions suffisamment faibles pour que le matériau de la machine magnétique puisse être considéré comme linéaire sur les surfaces correspondantes. A partir des équations de Maxwell, Il est possible d'exprimer le problème à résoudre.

La méthode des éléments finis permet de reproduire fidèlement le comportement électromagnétique de la machine et de simuler les défauts d'une manière plus proche de la réalité. Cependant, les moyens et le temps de calcul freinent l'utilisation de telles méthodes en simulation et l'évaluation des algorithmes de détection des défauts [ABE 99].

- **Réseaux de perméance**

Cette approche consiste à découper le circuit magnétique, constituant la machine en tubes de flux, caractérisés chacun par sa réluctance ou sa perméance. Ces grandeurs, tout comme les inductances, peuvent être définies selon les valeurs de flux.

Prenant ainsi en considération la saturation magnétique, le mouvement de rotation de la machine est pris en compte par l'intermédiaire de perméance d'entrefer variable selon la position du rotor [ABE 99] [REZ 03].

## **I.5 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons étudié la définition des termes importants utilisés en diagnostic. Notre travail est consacré à l'étude des défauts électriques pouvant intervenir dans la cage rotorique d'une machine asynchrone, leurs causes et leurs signatures.

Les méthodes de base en diagnostic ont été exposées pour mieux cerner les différentes approches utilisées. Les différentes méthodes qui sont utilisées pour la représentation et la détection des ruptures de barres au rotor ont été également exposées.

L'analyse et l'interprétation de ces méthodes de diagnostic nécessitent la connaissance au préalable d'un bon modèle de la machine qui sera l'objet du second chapitre.