

I.1 INTRODUCTION

Les équipements de surveillance des machines sont des matériels qui assurent l'entretien et la maintenance des machines. La surveillance des machines permet de vérifier la compatibilité matérielle et le taux de consommation afin de garantir une utilisation optimale des ressources. La surveillance des équipements industriels a pour objet également d'observer l'état d'un dispositif, dans le but de faire face aux aléas d'un système au cours de la phase d'exploitation [BES07]. Bien que le diagnostic est une partie de la surveillance, sa définition adoptée par les instances internationales de normalisation, est la suivante : « Le diagnostic est l'identification de la cause probable de la (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 ». [LAL04]. Le mot diagnostic peut avoir plusieurs interprétations selon le contexte et le domaine d'application.

En général, lorsqu'on parle de diagnostic des défauts, on se réfère à la procédure de détection et d'isolation de ces derniers, que l'on retrouve souvent sous le nom : FDI (Fault Detection and Isolation). Le rôle d'une telle procédure est de fournir une information sur l'apparition d'un défaut et sa provenance le plus rapidement possible. Les méthodes de détection et de localisation des défauts ont connu un essor considérable depuis le début des années 70 [ISH79], [HAR82], [CAM86], [KLI88], [ELK92], [PEN94]. En effet, de nombreux chercheurs ont investi dans ce domaine proposant alors diverses approches et techniques répondant à la diversité des applications [ARK96], [TRZ00], [BEN03], [JES14], [MUS16], [BES16-1].

Dans ce chapitre, nous allons décrire l'état de l'art de défauts concernant le système étudié, dans notre cas, qui est la machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil (MAS). Nous allons effectuer une introduction à l'état de l'art du diagnostic des défauts dans les systèmes physiques. L'intérêt portera essentiellement sur le problème de détection et d'isolation des défauts.

I.2 ETUDE STATISTIQUE

Dans la littérature, des statistiques ont été émises concernant les défauts qui peuvent affecter la machine. La classification se fait selon des critères précis mais différents pour chaque auteur, comme par exemple le critère des variations dues à l'amélioration des isolants.

Pour [MEL99], le partage se fera comme suit : 50% pour les défauts statoriques, 20% comme défauts rotoriques, 20% sont des défauts mécaniques et 10% autres.

Pour [CAS02], (voir figure I-1) plus de 50% de défauts affectent les roulements, environ 16% comme des défauts localisés au stator, 5% apparaîtront au rotor et 2.5% seront des défauts de l'axe et d'accouplement.

D'après l'article de [RAZ03], on trouve une répartition des défauts que peut rencontrer la machine de la manière suivante:

Les défauts statoriques : 40%, les défauts rotoriques pour presque 20 %, les pannes de types mécaniques pour près de 20 % et autres pour environ 10%.

Les statistiques, présentées par [EPR85] et [LU04], les destinent quant à eux, pour 40 à 50% comme étant des défauts de roulement, 30-40% pour des défauts statoriques et enfin pour 5 à 10% de défauts rotoriques.

De manière plus spécifique, au niveau du stator, on prend à titre d'exemple, la répartition donnée par la figure (I-2) [RAI00].

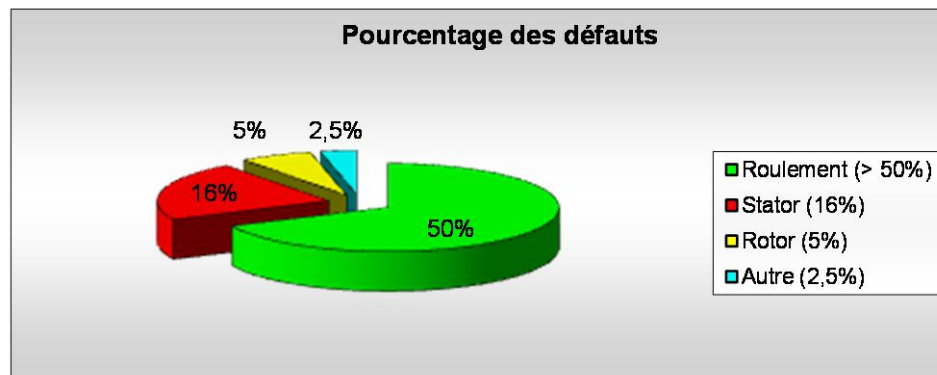


Figure I.1. Répartition des défauts selon [CAS02].

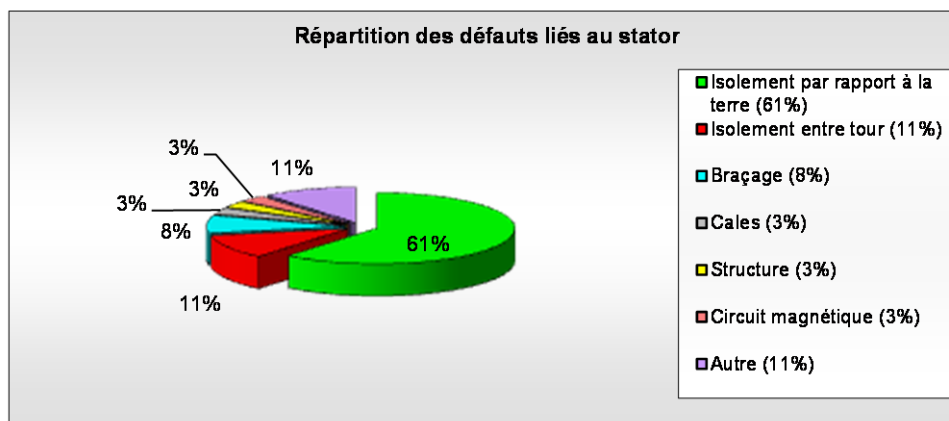


Figure I.2. Répartition des défauts liés au stator [RAI00].

L'étude précédente permet de classer les défauts suivant leur localisation [KLI96]:

1) Rotor

- Rupture de barreaux (Cassures partielles ou totales des barres).
- Cassure de l'anneau de court-circuit de la cage (Cassures partielles ou totales des anneaux).
- Excentricité statique ou dynamique.
- Défaut du circuit magnétique (ruptures de tôles).

2) Roulements à billes

- Trous dans les gorges de roulement intérieures et extérieures.
- Ondulation de leur surface de roulement.
- Attaque des billes.
- Corrosion due à l'eau.
- Défaut de graissage, problème du à la température.
- Décollement, effritement de surface, provoquée par une surcharge.

3) Stator

- Court-circuit entre spires, court-circuit entre bobines de la même phase.
- Ouvertures de phases, court-circuit phase-phase ou phase-terre.
- Coupure d'une phase.
- Défaut du circuit magnétique (ruptures de tôles).
- Défaut de l'isolation de masse.

On peut illustrer certains défauts par le schéma (I-3).

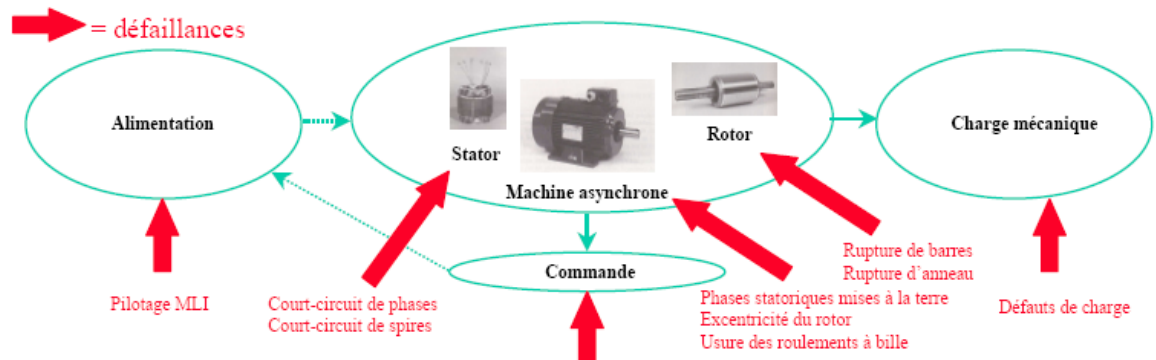


Figure I.3. Schéma illustratif de certains défauts associés à la machine.

Les plus préoccupants de ces défauts sont :

- 1) Les défauts statoriques.
- 2) Les défauts de roulements.
- 3) Les cassures partielles ou bien totales des barres et des portions d'anneaux de court-circuit de la cage rotorique.
- 4) Les défauts d'excentricité.

I.3 LES DEFAILLANCES DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Parmi les méthodes les plus utilisées, nous citerons l'analyse du courant statorique et l'analyse vibratoire. Ces dernières sont l'objectif de notre travail ; nous allons mettre en lumière une étude comparative en présence des défauts.

La première (basée sur le courant du stator) dépend de la distribution de champ dans l'entrefer et son influence sur les courants statoriques, elle porte l'abréviation ASCM ou ASCS (Analyse les Signatures de Courant du Moteur 'ou du Stator', ou en anglais Motor Current Sigature Analysis 'MCSA').

En réalité, l'induction magnétique dans l'entrefer n'est pas sinusoïdale, elle est en fonction de différents paramètres, tels que la disposition du bobinage statorique et de la structure de la cage rotorique dans le cas des moteurs à cage [ALG65], [HEL69], [CAM86], [VAS93], [GHO05], [FAI16]. A cause de cette structure, il a été démontré, qu'en plus de l'harmonique fondamental, apparaissent dans le spectre du courant statorique, des harmoniques dites d'encoches rotoriques (*RSHs*), ayant pour fréquences [ALG65], [ISH84], [CAM86], [THO01]:

$$f_{RSHs} = \left[\frac{\lambda n_b}{p} (1-s) \pm n_{os} \right] \cdot f_s \quad (\text{I. 1})$$

Avec, p est le nombre de paire de pôles, n_b le nombre de barres, n_{os} l'ordre des harmoniques de temps de la FMM ($n_{os} = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots$), et λ un entier positif. Pour $\lambda=1$ et $n_{os}=1$ on définit ce qui est appelé " harmoniques d'espaces ou d'encoches principales " (*PSHs*).

La seconde, est la méthode d'analyse des signatures vibratoires du moteur (ASVM), qui est un des moyens les plus utilisés dans l'industrie, par des équipements disponibles aux mesures des signaux de vibration. L'ASVM a le rôle de suivre la santé des machines tournantes en

fonctionnement. Cela s'inscrit dans le cadre d'une politique de maintenance prévisionnelle de l'outil de production industrielle.

La connaissance des différents organes d'une machine, savoir comment déterminer les fréquences prévisibles de vibration et savoir configurer une chaîne de mesures vibratoires, sont des étapes primordiales avant d'utiliser cette méthode. Le relèvement des signaux vibratoires donne l'occasion de les traiter, les analyser et les manipuler par une diversité d'idées. L'analyse vibratoire est encore un sujet actuel, de nos jours. Beaucoup de techniques d'analyse vibratoire orientées aux équipements industriels, ont été proposées par les chercheurs, surtout avec l'introduction et le développement du traitement de signal [IMM13], [FOU15], [SHAO16], [KUM16].

I.3.1 Défauts statoriques

Même si les vibrations des conducteurs d'encoches et les divers frottements qui en résultent, suite à de grandes sollicitations de la machine, accélèrent l'usure des isolants, il reste que le facteur principal de vieillissement est l'échauffement anormal de bobinages. En effet, pour les machines fonctionnant en milieu hostile, poussière et humidité viennent se déposer pour les machines fermées entre les ailettes extérieures, et pour les machines ouvertes au niveau des têtes de bobine, affaiblissant ainsi l'isolation électrique et court-circuitant ainsi les conducteurs [KLI96], [REF15].

I.3.1.1 Les courts-circuits

Comme précité, l'apparition d'un défaut au niveau des circuits électriques statoriques de la machine asynchrone peut avoir des origines diverses [DUV15], [BESS15].

I.3.1.1.1 Exemple : (Les décharges partielles)

Ce phénomène naturel, dû aux décharges dans les isolants entre conducteurs ou entre conducteurs et la masse, s'amplifie avec le vieillissement des isolants. Il est pratiquement imperceptible dans les isolants neufs par les moyens de mesures classiques, car son effet n'est pas discernable par rapport aux bruits de mesure. Sa présence précède l'apparition des courts-circuits entre phases ou entre phase et masse, lorsque ces décharges partielles ont suffisamment détérioré les isolants [BARM15].

Nous avons aussi les causes suivantes :

- ✓ Déconnection des attaches des enroulements ;
- ✓ Une augmentation de la température des enroulements ou de l'armature statorique ;
- ✓ courts-circuits ou contraintes de démarrage ;
- ✓ contamination due à l'humidité et à la saleté.

On peut clarifier les différents défauts possibles de court circuit par la figure (I-4).

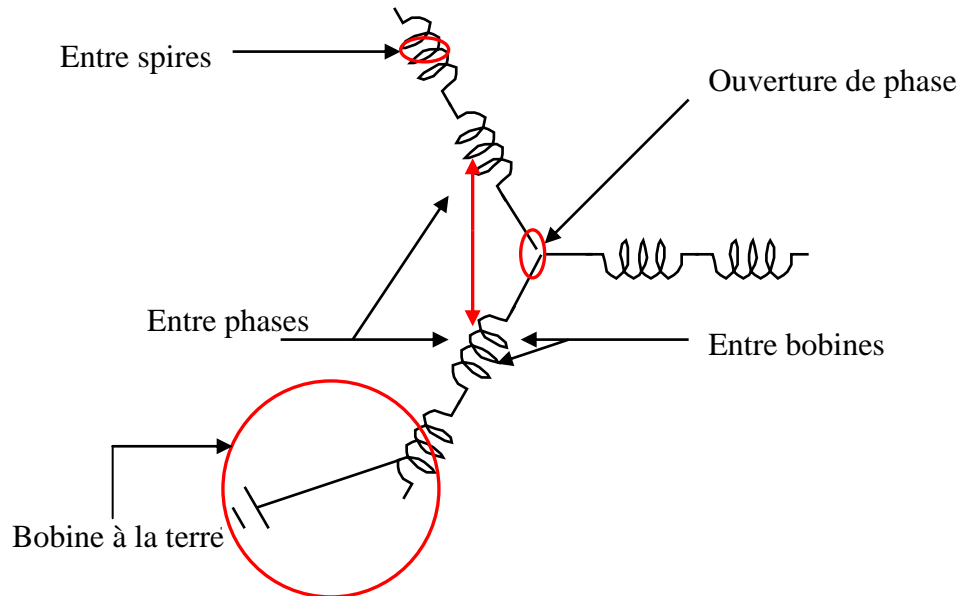


Figure I.4. Représentation des différents défauts statoriques possible.

I.3.1.1.2 Court-circuit entre phases : Un court-circuit entre phases provoquerait un arrêt net de la machine. Cependant, un court-circuit au bobinage près du neutre où entre spires n'a pas d'effet aussi radical. Il conduit à un déséquilibre de phases, ce qui provoque une répercussion directe sur le couple [TOL95], [BOU01]. Ce type de défauts perturbe également de manière sensible les commandes développées sur la base du modèle de Park (Hypothèse d'un modèle équilibré).

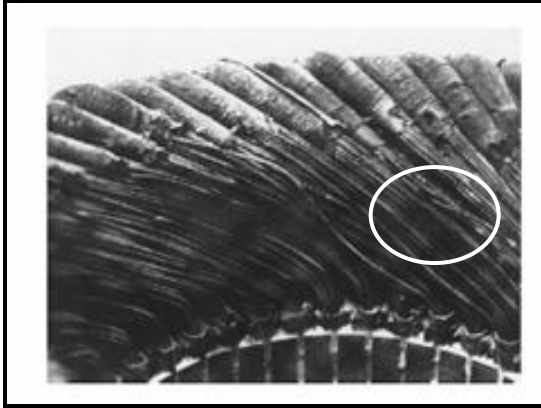


Figure I.5. Court-circuit spire-spire.

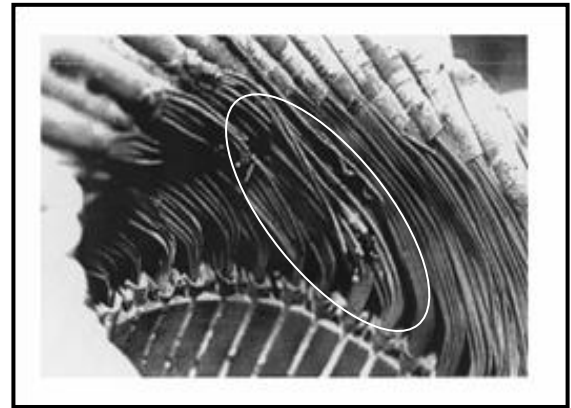


Figure I.6. Court-circuit phase-phase.

Pour déceler ces défauts, plusieurs approches ont été mises en œuvre, par exemple l'utilisation d'une bobine concentrique placée autour de l'arbre de la machine afin de capter, puis analyser le flux axial de la machine. Ce type de défauts entraîne l'apparition d'une série d'harmoniques dans le spectre du flux axial donné par [PEN94] :

$$f_{st} = f_s \cdot \left(k \pm \frac{n(1-s)}{p} \right) \quad (\text{I. 2})$$

avec $k=1, 3$ et $n=1, 2, 3 \dots (2p-1)$.

Parmi les auteurs à avoir utilisé cette technique, nous pouvons citer [GEN03], [BON92] qui montrent que certains composants fréquentiels augmentent en amplitude, lorsque un défaut de court-circuit apparaît. Cependant, ils pensent qu'il est difficile de préciser le pourcentage du défaut, car les amplitudes des composants harmoniques sont également affectées par la saturation magnétique des dents rotoriques ainsi que le déséquilibre d'alimentation [BOU01].

I.3.1.1.3 Court-circuit entre spire : Un court-circuit entre spire de même phase entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée [JOK00], [REF15], 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 un deuxième court-circuit [OND06], [ZOU10]. Il faut aussi prendre en compte 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. Ce couple résistant est une valeur à

caractériser, pour en prévoir les conséquences sur le fonctionnement, suite à la panne de la machine. Le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique, hormis une augmentation des oscillations proportionnelle au défaut [STA01].

I.3.1.1.4 Circuit ouvert sur une phase : Les conséquences d'ouverture de phase sont moins graves qu'un court circuit entre spires ou entre phases. Le courant ne peut pas circuler, et ça ne pose donc pas de problème d'échauffement pouvant détériorer le reste de bobinage. De même, un circuit ouvert ne crée pas de couple résistant lorsqu'un champ variable est appliqué à la bobine.

I.3.1.1.5 Court-circuit avec le bâti (la carcasse) : Le bâti est raccordé généralement avec une masse de terre. Si le bâti n'a pas d'importance dans la sécurité, il crée les effets capacitifs ; le bâti prend alors le potentiel de l'enroulement en cas court-circuit. La sécurité des personnes est donc soumise à un danger inattendu, et les dispositifs de protection sont nécessaires (disjoncteurs de sécurité).

I.3.1.2 Les défauts combinés : CC-encoches

Les défauts répartis sur certaines ou toutes les dents statorique : La circonférence intérieure de stator porte un nombre fixé par le constructeur, la qualité de matière du circuit magnétique, type de charge et la vitesse du glissement du bobinage par la force de Laplace exercée sur le faisceau de spires. Tous ces effets aux dents statorique, impose un phénomène local, caractérisé par la déformation des lignes de champ dans la surface d'entrefer. Le problème réside donc, dans une zone d'échange *critique*, qui assure la transformation d'une énergie électrique à une énergie mécanique, et vice versa.

Les défauts de court-circuit (CC) au stator peuvent être distribués aux autres points, comme les encoches statoriques. L'origine du problème électrique est un court-circuit, mais, il peut dépasser le bobinage aux dents (circuit magnétique). La réparation du problème ne réside pas au changement du bobinage, puisque la nouvelle structure ou la forme d'encoche ne prend pas sa forme originale de l'état sain.

Ces problèmes engendrent principalement des défauts d'isolation, qui à leurs tours, provoquent d'autres défauts inattendus dans la machine asynchrone.

La figure (I-7) représente deux types de court-circuit, à gauche un CC entre spires, au centre une extension de défaut de CC entre spires aux encoches (dents).

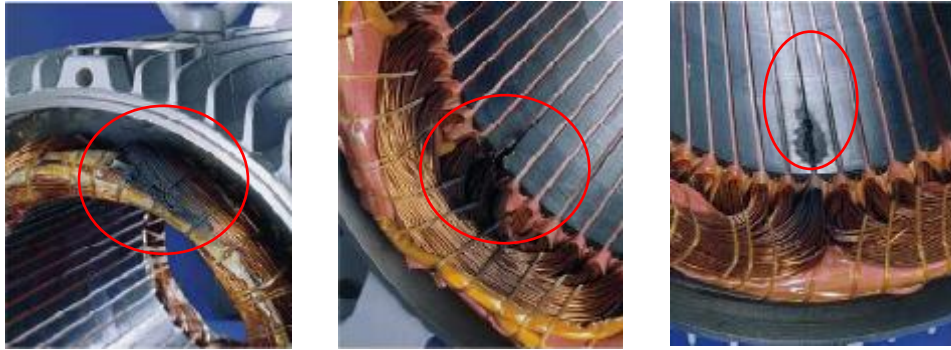


Figure I.7. Détérioration d'isolation : CC entre spires (à gauche), extension aux encoches (au centre) et une extension à la profondeur des encoches (à droite).

I.3.2 Défauts rotoriques

Malgré ses qualités, la machine asynchrone, peut présenter des défauts structurels parmi lesquels, la cassure totale ou partielle de barres ou des anneaux de court-circuit.

I.3.2.1 Défauts de barres

On distingue deux principaux types de cages rotoriques, les cages coulées et les cages fabriquées. Les rotors fabriqués sont en général, employés dans les grosses machines ou les machines à applications spéciales. Les rotors coulés, qui n'étaient destinés qu'aux petits moteurs, sont actuellement employés même pour des moteurs pouvant atteindre les 3 MW, et cela grâce au développement remarquable des techniques de moulage. Cependant, ceux-ci présentent l'inconvénient de ne pouvoir être réparés, suite à une cassure partielle ou bien totale de barres [VIC05], [SAI17-1].

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

La détection des barres cassées et de rupture des anneaux de court-circuit du rotor, dans les moteurs asynchrones à cage d'écureuil par l'outil paramétrique, est basée sur l'hypothèse que

la résistance apparente du rotor d'un moteur augmente quand une barre ou une portion d'anneau de court-circuit du rotor se casse [THO92], [BEL00], [ZOU05]. Ici, la résistance apparente du rotor est celle qui est située dans le modèle électrique équilibré par phase d'un moteur asynchrone à cage d'écuréuil. Pour détecter les cassures des barres et des portions d'anneau de court-circuit de la cage du rotor, des mesures de courant du stator, de tension du stator, la fréquence d'excitation du stator, et la vitesse du rotor sont effectuées. Ces mesures sont traitées par un estimateur de moindres carrés récursifs pour évaluer les états et les paramètres du moteur. En particulier, on estime la résistance apparente du rotor et on la compare avec sa valeur nominale pour détecter les défauts.

Plusieurs méthodes de diagnostics de défauts rotoriques par le traitement de signal ont été le siège d'études de plusieurs auteurs [NAN00], [BEN98], [BEN03], [ZOU11] et [SAH15] qui utilisent l'analyse spectrale de la signature du courant moteur, pour la détection des défauts dans les barres rotoriques. Les défauts apparaissent aux fréquences selon la formule suivante:

$$f_{cb} = (1 \pm 2ks) \cdot f_s \quad (\text{I. 3})$$

La composante $(1-2s)f_s$ du courant interagit avec le fondamental du flux de l'entrefer et produit des ondulations dans la vitesse à la fréquence $2sf_s$, ce qui provoque une augmentation de la composante du courant aux fréquences : $f_{cb} = (1 \pm 2ks)f_s$.

L'inertie de la charge affecte également l'amplitude du courant à ces fréquences, et d'autres composantes spectrales sont observées pour [DEL82]:

$$f_{cb} = \left[\left(\frac{k}{p} \right) (1-s) \pm s \right] \cdot f_s \quad (\text{I. 4})$$

D'autres travaux sont présentés concernant la détection des barres rotoriques cassées par l'utilisation des signaux de tensions et de courants statoriques destinés à l'estimation simultanée de la vitesse et de la résistance rotorique. Cette dernière est comparée à sa valeur nominale pour détecter les barres cassées en tenant compte de l'influence de la température [NAI00].

Une autre référence [CAM86], a mentionné l'existence de deux défauts rotoriques :

Le premier est l'oscillation de l'arbre le long de l'entrefer, qui cause la variation de la densité du flux dans ce dernier, l'oscillation produit alors des harmoniques de courant statorique pour des fréquences prédites par :

$$f_{osc} = \left[\left(\frac{k}{p} \right) (1-s) \pm 1 \right] \cdot f_s \quad (\text{I. 5})$$

Le deuxième défaut est l'asymétrie du rotor qui perturbe la densité du flux dans l'entrefer [FIL98], les fréquences des composantes spectrales de la densité du flux dans l'entrefer sont données par : $f_{ra} = f_s(k(I-s)/p \pm s)$.

avec $k=1, 5, 7, \dots$

Dans cet axe, de nombreux articles traitent ce genre de défaut, et nous rappelons parmi ces articles: [FAI07], [KAR15], [BENO15] et [ISHK15].

I.3.2.2 Ruptures d'anneaux

La rupture de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux (figure I-8).

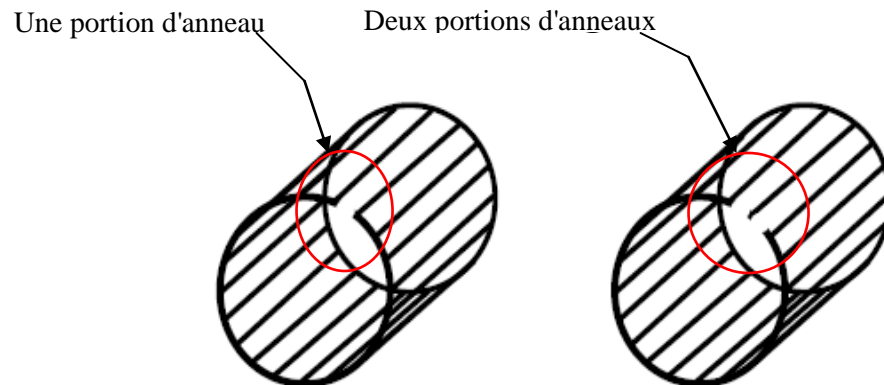


Figure I.8. Rupture d'une et deux portions adjacentes d'anneau de court-circuit.

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.

Comme la cassure de barre, nous pouvons rappeler que [RIT94], [TOL95], [ZOU14], ont fait des recherches importantes pour détecter la rupture d'une portion d'anneau ($f_{ca} = (1 \pm 2ks).f_s$).

L'analyse vibratoire discute les signatures qui apparaissent au niveau de signaux de vibration, et comme les autres défauts, la conséquence essentielle est représentée par l'asymétrie du champ rotorique dû aux causes suivantes:

- Barres rotoriques cassées, fissurées, desserrées, ...etc. ;
- Tôles ou spires de rotor en court-circuit ou défaut résistif sur les liaisons barres-anneaux ;
- Anneaux de court-circuit fissurés ou cassés.

Ces défauts peuvent être détectés dans le spectre vibratoire, par la mise en évidence de:

- Répartition asymétrique des bandes latérales espacées de deux fois la fréquence d'alimentation, $f_{défaut}=2.f_s$.
- Fréquences d'encoches f_{bar} (ou de barres) visibles, c-à-d. $f_{bar} = f_r \times n_b$.
- Fréquence principale d'alimentation avec bandes latérales espacées de la fréquence de glissement, avec $f_{glissement} = 2f_s/(p - fr)$.

I.3.2.3 Dissymétrie du rotor (excentricité)

Parfois, la machine électrique peut être soumise à un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations du couple (décalage entre le centre du stator et le centre du rotor, figure (I-9) [ISHK15], [BIN15]. Ce phénomène est appelé excentricité (statique et dynamique) dont l'origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut de roulement (usure), à un défaut de charge, ou à un défaut de fabrication (usinage).

Celui-ci provoque la variation de l'entrefer dans le moteur, une répartition non homogène des courants dans le rotor et le déséquilibre des courants statoriques.

Le déséquilibre des efforts sur les barres génère un couple global non constant [BOU01]. Quand l'excentricité devient grande, les forces radiales résultantes causées par le stator avec la bande de frottement du rotor, conduisent à des dommages du stator et du rotor.

La géométrie du rotor peut présenter des dissymétries d'ordre naturel. Celles-ci relèvent de trois catégories d'excentricité de l'entrefer [SMI96], [DOR97] ; à savoir :

- **L'excentricité statique** : correspond au cas où le centre de rotation de l'arbre du rotor n'est pas celui du centre géométrique du stator [RAZ02], [BES16-3].

Dans ce type d'excentricité, la position de l'épaisseur minimale de l'entrefer est fixe dans l'espace. Elle peut être causée par l'ovalité de la partie intérieure du stator ou encore par le mauvais positionnement du rotor ou du stator durant la phase de construction [BAB14].

- **L'excentricité dynamique** : correspond à un centre de rotation du rotor diffère du centre géométrique du stator mais, de plus, le centre du rotor tourne autour du centre géométrique de ce stator [RAZ02], [BES16-2].

Dans ce type d'excentricité, le centre du rotor n'est pas en son centre de rotation et de ce fait la position d'épaisseur minimale d'entrefer tourne avec le rotor. Parmi les causes de ce type d'excentricité, on cite : la flexion de l'arbre du rotor, l'usure ou le défaut d'alignement du roulement [BAB14].

- **L'excentricité mixte** : est la plus fréquente, elle fait la combinaison des deux excentricités précédemment citées.

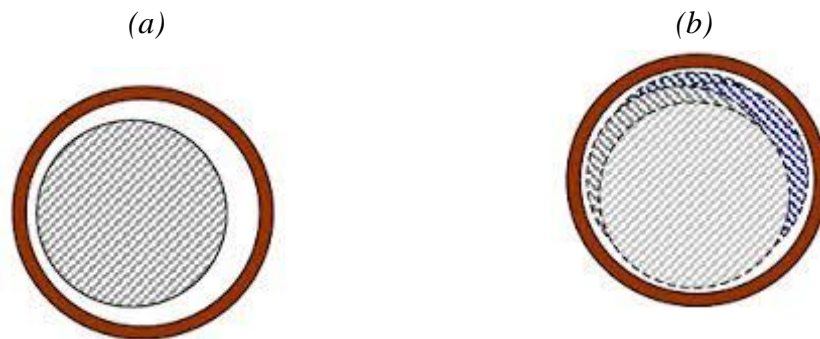


Figure I.9. Type d'excentricité, (a) : statique, (b) : dynamique.

Le rotor peut être le siège d'autres défauts tels que l'excentricité, il est nécessaire de signaler ici l'*excentricité inclinée*, cette dernière assure un entrefer variable spatialement et constant dans chaque point bien déterminé, c.-à-d. le rotor ne porte qu'une seule position malgré son inclinaison. Généralement, les effets et les dégâts dus à l'excentricité ont été l'objet d'études de plusieurs travaux [DOR97], [CAM86], [FAI16].

Deux méthodes présentent la détection de défauts qui utilisent la signature du courant moteur [BEN99], [OBA03], [BEN99], [LU04], [BEN99], [VER16] :

La première, par le contrôle du comportement du courant autour des fréquences d'encoches, et les fréquences associées sont :

$$f_{slot+enc} = f_s [(k.Z \pm n_d)(1 - s) / p] \pm n_\omega \quad (I. 6)$$

où $k=1, 2, 3, \dots$; $m=1, 2, 3$; p : nombre de paires de pôles ;

Z : nombre d'encoches rotoriques, s : glissement ;

n_{ω} : ordre des harmoniques de la FMM statorique.

La seconde, par le contrôle du comportement du courant autour du fondamental de la fréquence d'alimentation et ces fréquences sont données par : $f_{exc}=f_s[1 \pm m(1-g)/p]$.

Parmi ceux qui étudient les défauts d'excentricité, on cite [NAN01], [NAN02], [GHO06] et autres. Les chercheurs montrent la présence de certains harmoniques dans le spectre du courant de ligne sous un défaut d'excentricité, les fréquences additionnelles qui apparaissent dans le spectre du courant statorique sont [CAM86] :

$$f_{exc} = \left[\left(\frac{kn_b \pm n_d}{p} \right) (1-s) \pm n_{os} \right] \cdot f_s \quad (\text{I. 7})$$

Avec k un entier et $n_{os}=1, 2, 3, \dots$ est l'ordre d'harmonique du temps, n_b est le nombre de barres rotorique, n_d est égal à 0 pour l'excentricité statique et 1, 2, 3, ... pour l'excentricité dynamique.

Cependant, il a été démontré par Nandi [NAN98] qu'une seule combinaison particulière, d'une machine de paires de pôles p et un nombre d'encoches du rotor Q_2 , donnera lieu à des composants importants liés uniquement à l'excentricité statique ou seulement à l'excentricité dynamique.

Cette relation pour une machine triphasée est donnée par :

$$Q_2 = 2p[3(m \pm q) \pm r] \pm k \quad (\text{I. 8})$$

avec, $m \pm q=0, 1, 2, 3$, $k=1$ et $r=0$ ou 1.

Une autre série d'harmoniques liées à la coexistence des deux types d'excentricité en même temps, apparaît de part et d'autre de la fondamentale, à des fréquences données par [THO94], [DOR97], [OBA00], [NAN98]:

$$f_{mix} = |f_s \pm kf_r| \quad (\text{I. 9})$$

Tel que k est un entier positif.

Il n'est pas besoin avec cette expression de connaître les paramètres de la machine comme le nombre de barres n_b , et ce qui la rend parfois avantageuse.

La présence de l'excentricité se manifeste donc dans une autre distribution de champ (flux) ou en anglais " unbalanced magnetic pull (UMP) ", donc cela donne une attraction magnétique, et pour cette raison, on trouve beaucoup de travaux qui ont traité l'essentiel de cet axe [BRA68], [DOR95], [DOR97], [DI15], [DOR15], [CHU16], [ZHO16].

Nous distinguons aussi, [BAN01], [FAI02], [MAR03], [JOK05], [HAL13], [FIR16] et autres qui utilisent la méthode des éléments finis pour détecter ce type de défauts.

On peut consulter aussi les travaux de [AND08], [SAH08], [FIR13], [ZAA14], [FIR16] ...etc.

Du point de vue de la méthode d'analyse de vibration, ce défaut est créé par l'asymétrie du champ de moteurs électriques, mais aussi il est causé par d'autres défauts comme l'armature du stator. Les fréquences signalées par les signaux de vibration sont [BAT80], [NAR13]:

- Deux fois la fréquence d'alimentation, $f_{\text{défaut}}=2.f_s$, ($f_s=50$ Hz).
- Pas de bandes latérales visibles à $2.f_s$.
- Pour une machines bi-polaires: Présence de la deuxième harmonique de la vitesse de rotation f_r ($2.f_r$).

Les défauts les plus répandus à ces fréquences sont non seulement l'excentricité, mais aussi les suivants [FIN99]:

- Excentricité statique, entrefer non constant sans défaut d'angle (concentrique uniquement) ;
- Déséquilibre de phase ;
- Défaut d'isolement ;
- Spires en court-circuit.

I.3.3 Défauts de roulement

Les défauts de roulement se manifestent comme des défauts d'asymétrie au rotor, qui sont usuellement rangés dans la catégorie des défauts relatifs à l'excentricité [KER92], [SCH95], [BES15-1]. Un défaut de roulement se manifeste par la répartition continue du contact défectueux [BARK00], [OCA01], [OJA15], [SID15], [YUA15], [SAI17-2]. Le type de roulement dans notre étude est les roulements à billes qui sont constitués de quatre éléments : une *bague externe*, une *bague interne* et une rangée de *billes* gardées par une *cage*, ainsi que de la graisse pour un mouvement souple (lubrification). La figure (I-10) illustre les différents éléments constitutifs le roulement.

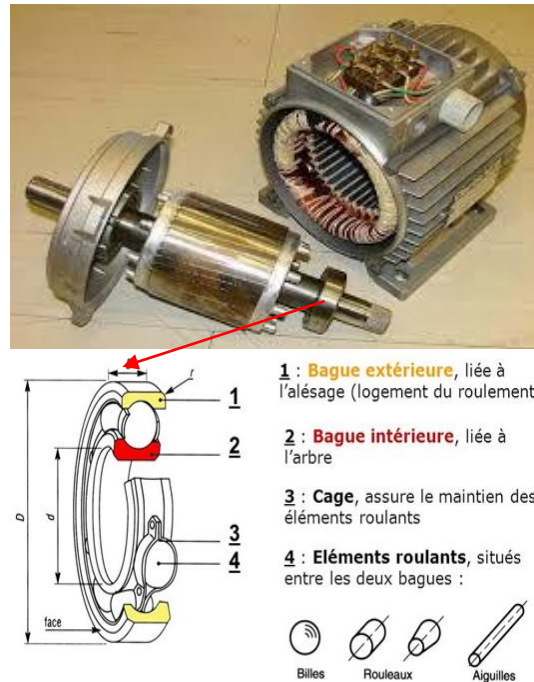


Figure I. 10. Éléments constitutifs d'un roulement à billes.

Le roulement de notre machine a une bague extérieure fixe en contact avec le stator, et une bague intérieure tournante en contact avec le rotor. Par ailleurs, les billes sont en contact avec les deux pistes des deux bagues.

La durée de vie normale d'un roulement sous une charge est déterminée par la durée de l'usage et la fatigue des surfaces des éléments du roulement. La durée de vie a la notation L_{10} et se compte par un nombre d'heures. L_{10} est calculée comme suit [PHI09]:

$$L_{10} = L_h = \frac{\left(\frac{C_R}{P_R}\right) \cdot 10^6}{60 \cdot f_r} \quad [h] \quad (\text{I. 10})$$

avec, C_R est une constante caractéristique de roulement, P_R : c'est la charge équivalente sur le roulement.

Les défauts qui peuvent affecter le roulement sont nombreux, on peut décrire dans cette partie, certains de ces défauts:

I.3.3.1 L'usure

Le glissement des différents éléments, progresse avec l'introduction de particules contaminant au montage ou pendant le fonctionnement. Il est vrai que l'usure d'un roulement à billes peut être une source de contamination.



Figure I. 11. Bille saine et une autre défaillante.

I.3.3.2 Le piquetage

Ce phénomène important est créé par des arcs électriques qui traversent le roulement, ce courant se traduit par des points de fusions, des stries circumférentielles, des micro-trous ou des soudures. Le problème va donc s'aggraver en présence d'un refroidissement rapide, c.-à-d. l'élément visé peut être exposé aux fissurations [BES16-4].



Figure I. 12. Fissure (cassure) et piquetage dans la bague extérieure.

I.3.3.3 Le grippage

Le frottement métal-métal produit des échauffements, ces derniers font des microsoudures. Le manque de lubrifiant, résulte le grippage. Selon le type, les dimensions et l'application du roulement, la lubrification initiale est une opération indispensable, en particulier quand il s'agit de roulements à faible bruit, haute précision ou de roulements de broche à hautes vitesses. La lubrification des roulements à l'aide de graisses ou d'huiles empêchent tout contact métallique direct entre les composants et la cage. La lubrification empêche par ailleurs les infiltrations de corps étrangers dans les roulements et protège ces derniers contre la corrosion.

I.3.3.4 Jeu de roulement

Comme indiqué sur la figure ci-dessous, on peut distinguer plusieurs positions des vides ; bagues intérieure ou extérieure, billes ou cage, le jeu est très dangereux puisqu'il aggrave l'état de roulement rapidement (ex. écaillage) et fait une dégradation des contacts mécaniques surtout dans un milieu pollué.

Le jeu radial ou axial au niveau de roulement peut provoquer l'usure (Fig. I-13 et I-14).

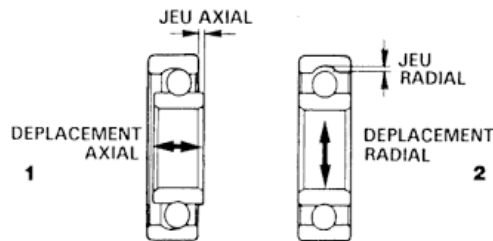


Figure I. 13. Jeu de roulement (axial et radial).

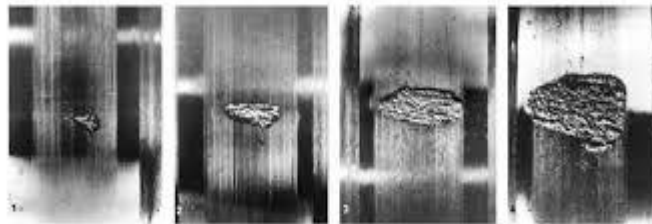


Figure I. 14. Progression d'un écaillage.

I.3.3.5 La corrosion

Des réactions chimiques à l'aide des paramètres atmosphériques d'humidité ou des acides dans le roulement. Les composants oxydés modifient la qualité de lubrifiant, ce qui conduit à l'apparition de rouille.

I.3.3.6 Les contraintes mécaniques

Lorsqu'un roulement est placé dans une machine, il subit des contraintes mécaniques radiales et axiales. Une charge insupportable par le roulement conduit à des dégâts inattendus.

I.3.3.7 La lubrification

Le choix du type de lubrification dépend plus de l'application prévue que du type de roulement. Dans de nombreuses applications, le lubrifiant a pour fonction principale, de réduire les frottements et l'usure, l'effet des particules et le bruit. Les particules indésirables peuvent endommager les surfaces et conduire à la dégradation rapide des éléments machines.

La présence de grains de sable (pollution) dans le lubrifiant provoque des pertes de cotes notables aux premiers cycles de fonctionnement.

I.4 SYNTHÈSE DES DÉFAUTS DE ROULEMENT

Les défauts dans les roulements à billes, sont l'une des raisons principales des défaillances des entraînements électriques et la réduction de leur durée de vie [BES15-2], [BES16-1]. L'analyse et le traitement des grandeurs mesurables par l'analyse vibratoire ou par l'analyse des courants statoriques occupe une place importante pour diagnostiquer les défauts des roulements [BES15-3]. Les signaux vibratoires à analyser permettent de détecter la présence du défaut à partir d'indications bien précises. L'analyse fréquentielle est l'une des méthodes les plus utilisées pour l'identification de l'élément défaillant. Le roulement a des fréquences caractéristiques générées par le défaut [SCH94], [STAC04-1], [STAC04-2], [FRO15], [PRU15], [BOUD16]. En effet, des quatre éléments constitutifs du roulement, on trouve quatre fréquences caractéristiques. Ces fréquences peuvent être fournies par le constructeur ou par une estimation théorique d'après une considération cinématique [VAS93], [KLI97], ou par des logiciels spécialisés.

I.4.1 Analyse de fréquences des défauts de roulements

On trouve pour les formules des fréquences caractéristiques des défauts de roulement des formules théoriques et autres approximatives, ces formules sont expliquées en détail dans cette partie.

I.4.1.1 Equation théorique (analytique)

Les fréquences analytiques (théoriques) et caractéristiques qui se trouvent dans le contenu spectral d'un signal de vibration sont [VAS93]:

- Défaut de la bague extérieure :

$$f_{be} = \frac{f_r \cdot N_b}{2} \left(1 - \frac{D_b}{D_m} \cos(\alpha) \right) \quad (\text{I. 11})$$

- Défaut de la bague intérieure :

$$f_{bi} = \frac{f_r \cdot N_b}{2} \left(1 + \frac{D_b}{D_m} \cos(\alpha) \right) \quad (\text{I. 12})$$

- Défaut de la cage :

$$f_c = \frac{f_r}{2} \left(1 - \frac{D_b}{D_m} \cos(\alpha) \right) \quad (\text{I. 13})$$

- Défaut de la bille :

$$f_{bille} = \frac{f_r}{2} \frac{D_m}{D_b} \left(1 - \left(\frac{D_b}{D_m} \cos(\alpha) \right)^2 \right) \quad (\text{I. 14})$$

– f_{be} : la fréquence caractéristique de la bague extérieure ;

– f_{bi} : la fréquence caractéristique de la bague interne ;

– f_r : la fréquence de rotation de la cage ;

– f_{bille} : la fréquence caractéristique de rotation des billes ;

– N_b : le nombre de billes ;

– D_b : le diamètre de la bille ;

– D_m : le diamètre du centre des billes (diamètre moyen = $D_m = \frac{D_{bag-ext} + D_{bag-int}}{2}$);

– α : l'angle de contact (le roulement oblique possède les valeurs de $\alpha=15^0$, 25^0 ou 40^0 et pour un roulement à gorge profonde, il présente une charge purement radiale $\alpha=0^0$).

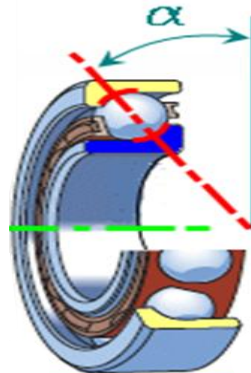


Figure I. 15. Angle de contact d'un roulement oblique.

Les autres relations entre ces fréquences sont les suivantes :

$$f_{be} + f_{bi} = N_b \cdot f_r \text{ et } f_{be} = N_b \cdot f_c$$

Cependant, elles ne sont connues que pour un roulement neuf géométriquement parfait et pour une vitesse de rotation donnée de la machine. Dûs à certains facteurs comme le vieillissement des roulements et les fluctuations de la vitesse de rotation de la machine, les fréquences caractéristiques actuelles peuvent *dévier* de celles théoriquement estimées [TAY94]. De plus, la présence des fréquences caractéristiques dépend de plusieurs facteurs comme : le type du défaut lui-même et la répartition de la charge [ONG00], [OCA01], [BES15-3], [BES16-4]. Parfois, le défaut peut aussi persister sans générer la fréquence caractéristique associée [HAR14]. On cite maintenant d'autres règles intéressantes qui expliquent le déplacement ou l'approximation des fréquences caractéristiques du défaut de roulement.

I.4.1.2 Modulation de la fréquence du signal

En tenant compte de la modulation du signal par fréquence f_m , les équations des fréquences caractéristiques sont modifiées ainsi [PHI09] :

- Défaut sur la bague intérieure :

$$f_{bi-Mod} = \frac{f_r \cdot N_b}{2} \left(1 + \frac{D_b}{D_m} \cos(\alpha) \right) \pm f_m \quad (\text{I. 15})$$

- Défaut sur la bille :

$$f_{bille-Mod} = \frac{f_r}{2} \frac{D_m}{D_b} \left(1 - \left(\frac{D_b}{D_m} \cos(\alpha) \right)^2 \right) \pm f_m \quad (\text{I. 16})$$

Cette modulation du signal résulte des imperfections de construction, de montage ou de fonctionnement.

I.4.1.3 Règles empiriques

Schoen [SCH95] a montré que les fréquences caractéristiques de vibration peuvent être rapprochées pour la plupart des roulements en prenant N_b entre 6 et 12 billes par les formules suivantes:

- Bague extérieure :

$$f_{be} = 0,4 \cdot N_b \cdot f_r \quad (\text{I. 17})$$

- Bague intérieure :

$$f_{bi} = 0,6.N_b.f_r \quad (\text{I. 18})$$

- Cage :

$$f_c = 0,4.f_r \quad (\text{I. 19})$$

I.4.1.4 Equations réelles déduites de l'expérimentation

Ces équations sont basées sur l'expérimentation de plus de 2000 roulements de différents types [SCHI89] :

▪ Bague extérieure :

$$f_{be} = f_r \cdot \left(0,5.N_b - 1,2 \right) \quad (\text{I. 20})$$

▪ Bague intérieure :

$$f_{bi} = f_r \cdot \left(0,5.N_b + 1,2 \right) \quad (\text{I. 21})$$

▪ Cage :

$$f_c = f_r \cdot \left(0,5 - \frac{1,2}{N_b} \right) \quad (\text{I. 22})$$

▪ Bille :

$$f_{bille} = f_r \cdot \left(0,2.N_b - \frac{1,2}{N_b} \right) \quad (\text{I. 23})$$

D'après ce calcul, nous confirmons qu'il y a une dispersion des fréquences entre les valeurs analytiques et expérimentales proposées. Il est clair que cette dispersion peut nous conduire à une divergence au niveau des résultats. La différence a été remarquée pour toutes les fréquences, et précisément à la fréquence de la *bille*. Tout écart, même infime, influe sur les placements des fréquences caractéristiques. D'autant plus que la machine a une vitesse pratiquement non constante, c.-à-d. un glissement qui se déplace. Pour cette raison, la fréquence de rotation du rotor f_r sera également changée, cette dernière fait donc le changement des fréquences caractéristiques de roulement à cause de l'intégration de celle-ci aux formules des fréquences.

Une autre notation, plus utilisée dans la littérature pour les fréquences caractéristiques de roulement, est la suivante :

- **BPFO** : la fréquence de passage des billes (ou rouleaux) sur la couronne externe pour un défaut sur la couronne externe (**B**all **P**ass **F**requency of **O**uter ring);
- **BPFI** : la fréquence de passage des billes (ou rouleaux) sur la couronne interne pour un défaut sur la couronne interne (**B**all **P**ass **F**requency of **I**nnner ring);
- **BSF**: la fréquence de rotation des billes (ou rouleaux) pour un défaut sur l'élément roulant (**B**all **S**pin **F**requency) ;
- **FTF** : la fréquence de cage pour un défaut de cage (**F**undamental **T**rain **F**requency).

Plusieurs chercheurs ont tracé pour objectif, la détection de défauts de roulements dans la machine asynchrone par l'analyse des signatures de courant statorique (ASCS ou MCSA en Anglais) [LN03], [BES16-2], [SAI17-2], [DON16]. Les défauts de roulements entraînent des oscillations du couple de charge à des fréquences caractéristiques du roulement [KLI97]. A cause de ces oscillations du couple de charge, on trouve des modulations aux courants de phase. Ces modulations de phase se manifestent dans le domaine fréquentiel par l'apparition d'une série d'harmoniques dans le spectre du courant qui sont utilisées pour la détection des défauts de roulements. Les fréquences caractéristiques du défaut de roulement dans le spectre du courant, sont définies par la formule suivante :

$$f_{caract} = |f_s \pm k \cdot f_v| \quad (\text{I. 24})$$

où, f_v est la fréquence caractéristique de vibration ($f_v = f_{be}, f_{bi}, f_c$ ou f_{bille}) et $k=1, 2, 3, \dots$ etc.

On peut résumer toutes les fréquences caractéristiques de chaque défaut au tableau (I.1).

Tableau I.1. Synthèse des signatures des défauts.

Type de défaut	Signaux et signatures	
	Courants statoriques	Vibrations
Cassure de barres	$f_{cb} = (1 \pm 2kg).f_s$ ou $f_{cb} = \left[\frac{k}{p}(1-s) \pm s \right].f_s$ et $(k/p=1,5,7,11,\dots)$	$f_r \pm 2.s.f_s$ ou $\left[\frac{(1-s)}{p} \pm 2 \right].f_s$
Excentricité: - Statique - Dynamique - Mixte	Statique : $f_{ES} = \left[\left(\frac{kn_b}{p} \right) (1-s) \pm n_{os} \right].f_s$ Dynamique : $f_{ED} = \left[\left(\frac{kn_b \pm n_d}{p} \right) (1-s) \pm n_{os} \right].f_s$ Mixte : $f_{mix} = f_s \pm kf_r $	Statique : $2.f_s$ ou $k.f_r \pm f_s$ Dynamique : $f_r \pm 2.s.f_s$ ou f_r
Roulement : -Bague extérieure -Bague intérieure -Cage -Bille	Bague extérieure : $f_{c-be} = f_s \pm k.f_{be}$ Bague intérieure : $f_{c-bi} = f_s \pm k.f_{bi}$ Cage : $f_{c-cage} = f_s \pm k.f_{cage}$ Bille : $f_{c-bille} = f_s \pm k.f_{bille}$	Bague extérieure : $f_{be-vib} = k.f_{be} = 0,4.k.N_b.f_r$ Bague intérieure : $f_{bi-vib} = k.f_{bi} = 0,6.k.N_b.f_r$ ou $f_{bi-vib} = f_{bi} \pm k.f_r$ Cage : $f_{cage-vib} = k.f_{cage} = 0,4.k.f_r$ Bille : $f_{bille-vib} = k.f_{bille} = 2,32.k.f_f$
Désalignement	$f_{désal} = \left[1 \pm \frac{k.(1-s)}{p} \right].f_s$	f_r et $2.f_r$