

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA  
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة بادجي مختار – عنابة

Faculté : des sciences de l'ingénierat

Département : électromécanique

Domaine : science et technologie

Filière : maintenance industriel

Spécialité : maintenance industriel

## Mémoire Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

**Détection des défauts de moteur asynchrone par l'analyse  
de courant statorique**

Présenté par : *Belhait Housseem Eddine*

Encadrant : *Mr.Kerfali Samir*

Grade : MCB

**Université** : UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA

### Jury de Soutenance :

Mr.Rachdi M F	MCA	BADJI MOKHTAR - ANNABA	Président
Mr.Kerfali S	MCB	BADJI MOKHTAR - ANNABA	Encadrant
Md.Khalfa D	MCB	BADJI MOKHTAR - ANNABA	Examineur

Année Universitaire : 2019/2020

*Je dédie ce modeste Travail A mes chers et tendres  
Parents.*

*Ma mère symbole de sacrifice, douceur et courage.*

*Mon Père symbole de force et confiance.*

*À mes chers frères.*

*A mes collègues et à tous mes amis Sans exceptions.*

*A tous ceux qui m'ont aidée à réaliser ce mémoire.*

# *Remerciements*

Avant tout, je remercie DIEU le Tout- puissant de m'avoir

*donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'étude et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.*

*Je tiens à remercier Mr Rachdi. pour avoir accepté de présider le jury de cette soutenance*

*Je tien aussi a exprimé ma gratitude aux membres du jury notamment Madame Khalfa pour avoir accepté de jury ce modeste travail.*

*Je tiens à exprimer mon remerciement et ma gratitude à mon encadreur:*

*Mr. S. Kerfali qui m'a aidé pour rendre ce travail effectif.*

*Mes remerciement aussi au département de l'électromécanique de l'université d'Annaba et à tous les enseignants qui m'enseignés durant les années du cursus.*

*Enfin je remercie aussi toutes les personnes qui m'aidée de près ou de loin à la rédaction de ce travail.*

## ملخص:

تعد أخطاء عدم الاتزان والتحمل من أكثر الحالات الشاذة شيوعًا التي تؤثر على محركات قفص السنجاب غير المتزامن. يدرس هذا البحث عمليًا تشخيص واكتشاف هذه الإخفاقات البسيطة من خلال تقنيات التحليل الحالية للجزء الثابت. يُقترح الاستخدام المتزامن لمعالجة تيار الطور والتيار المحايد ومربع الشدة الأتية لتيارات الإمداد. يتم تقديم تحليل كامل للمنهجية المقترحة، ويتم عرض ومناقشة النتائج التجريبية للمحركات السليمة والمعيبة.

## Résumé :

Les défauts de balourd et des roulements figurent parmi les anomalies les plus courantes qui affectent les moteurs asynchrones à cage. Ce travail de recherche examine pratiquement le diagnostic et la détection de ces défaillances simples par des techniques de l'analyse du courant statorique. Il est proposé l'utilisation simultanée du traitement du courant de la phase, du courant neutre et du carré des intensités instantanées descourants d'alimentation. Une analyse complète de la méthodologie proposée est présentés, et les résultats expérimentaux pour les moteurs sains et défectueux sont montrés et discutés.

## Abstract:

Unbalance and bearing faults are among the most common anomalies affecting asynchronous squirrel cage motors. This research practically examines the diagnosis and detection of these simple failures by stator current analysis techniques. It is proposed the simultaneous use of the processing of the phase current, the neutral current and the square of the instantaneous intensities of the supply currents. A full analysis of the proposed methodology is presented, and experimental results for healthy and defective engines are shown and discussed.

# Sommaire

ملخص.....	I
Résumé : .....	I
Abstract: .....	I
Sommaire .....	II
Liste des figures.....	IV
Liste des tableaux.....	IV
<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 1 GENERALITES SUR LES MACHINES ASYNCHRONES .....</b>	<b>2</b>
1.1 Introduction : .....	2
1.2 Constitution du moteur asynchrone : .....	2
1.2.1 Définition.....	2
1.2.2 Constitution:.....	2
1.3 Fonctionnement du moteur asynchrone : .....	5
1.3.1 Caractéristiques de fonctionnement : .....	6
1.3.2 Exemples de charge : .....	7
1.3.3 Démarrage :.....	7
1.3.4 Freinage des machines asynchrones :.....	8
1.4 Machines asynchrones à plusieurs vitesses : .....	9
1.5 Conclusion :.....	10
<b>CHAPITRE 2 LES DIFFERENTS DEFAUTS DE LA MACHINE ASYNCHRONE .....</b>	<b>11</b>
2.1 Introduction : .....	11
2.2 Principaux défauts de la machine asynchrone triphasée à cage : .....	11
2.2.1 Défauts internes et externes :.....	11
2.2.2 Etudes statistique des défaillances de la machine asynchrone :.....	13
2.2.3 Cause des défauts : .....	13
2.3 Défaillances d'ordre électrique : .....	14
2.3.1 Défaillances des circuits électriques rotoriques : .....	14
2.3.2 Défaillances des circuits électriques statorique :.....	15
2.4 Défaillances d'ordre mécanique : .....	17
2.4.1 Défaillances des roulements : .....	17
2.4.2 Défaillances du flasque : .....	17
2.4.3 Défaillances de l'arbre : .....	17
2.5 Conclusion : .....	18
<b>CHAPITRE 3 MODELE TRIPHASE DE LA MAS .....</b>	<b>19</b>

3.1	Introduction :	19
3.2	Description du modèle triphasé:	19
3.3	Modèle biphasé équivalent :	21
3.3.1	Transformation de PARK :	22
3.3.2	Équations de la machine biphasée équivalente :	24
3.3.3	L'expression du couple électromagnétique et du couple mécanique :	24
3.4	Commande de la machine asynchrone :	25
3.4.1	Commande vectoriel :	25
3.4.2	Commande scalaire :	25
3.5	Conclusion :	26
<b>CHAPITRE 4 TRAVAIL EXPERIMENTAL</b>		<b>27</b>
4.1	Introduction:	27
4.2	Méthode de représentation tridimensionnelle des courants statoriques (3D) :	27
4.3	Description du banc d'essai:	27
4.4	Méthodologie de l'expérience :	28
4.5	Résultats ET Discussions :	30
4.6	Conclusion :	31
<b>CONCLUSION GENERALE :</b>		<b>32</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE :</b>		<b>33</b>

## Liste des figures

Figure 1.1 Parties constituantes d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil.	3
Figure 1.2 Stator du moteur	3
Figure 1.3 Rotor à cage d'écureuil	4
Figure 1.4 Rotor bobiné	4
Figure 1.5 Plaque signalétique d'un Moteur asynchrone triphasé	5
Figure 1.6 point de fonctionnement du moteur asynchrone	7
Figure 2.1 causes internes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage	12
Figure 2.2 causes externes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage	12
Figure 2.3 répartitions des causes des défauts pour une machine	14
Figure 3.1 Représentation des enroulements de la MAS triphasée dans l'espace électrique.	19
Figure 3.2 axes statorique abc – axes rotorique $\alpha\beta$ .	21
Figure 3.3 Repérage angulaire des systèmes d'axes dans l'espace électrique	22
Figure 3.4 Représentation des enroulements fictifs d'axes d et q	24
Figure 4.1 banc d'essai	29
Figure 4.2 la machine saine	30
Figure 4.3 Défaut roulement	30
Figure 4.4 Défaut balourd	31

## Liste des tableaux

Tableau 4-1 Caractéristiques du roulement	29
Tableau 4-2 Caractéristiques de MAS <sub>1</sub> et MAS <sub>2</sub>	30

# INTRODUCTION GENERALE

Les machines asynchrones spécialement les moteurs asynchrones jouent un rôle important dans le domaine de la conversion de l'énergie électromécanique. Du fait de sa simplicité de construction, d'utilisation et d'entretien, de sa robustesse et sont faible coût d'achat de fabrication. Mais les machines subissent de plus en plus de perturbation auxquelles sont sensibles. Certaines utilisations des moteurs asynchrones ne tolèrent pas les pannes intempestives. Ces pannes peuvent être dues aux moteurs et être d'origine mécanique (excentricité du rotor) ou électrique (court-circuit du bobinage statorique, rupture de barre ou l'anneau, cassure de dents...).

Il existe plusieurs procédures de diagnostic. Le choix d'une approche est lié à la connaissance que l'on souhaite acquérir sur le système, mais aussi à la complexité de ce système. Ainsi deux grandes familles de procédure sont utilisées dans le domaine du diagnostic: les méthodes de diagnostic à base de modèles analytique et les méthodes sans modèle. Les méthodes à base de modèle analytique reposent sur le suivi des paramètres et des grandeurs de la machine, au moyen d'algorithmes d'observation. Elles détectent les défaillances en comparant l'évolution de l'écart entre le modèle et le processus réel. Les méthodes sans modèle sont basées sur l'extraction d'informations par le biais du traitement des signaux mesurés. Les signaux mesurables (les courants, les tensions, la tension du neutre, la vitesse, les vibrations, la puissance instantanée), peuvent fournir des informations significatives sur les défauts [3].

Dans ce contexte le mémoire comporte quatre chapitres :

- Le premier chapitre de ce mémoire est consacré à l'étude des composants et du fonctionnement de la machine asynchrones.
- Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des principaux défauts courants aux niveaux de la machine asynchrone triphasée à cage (défauts internes, défauts externes) et leurs causes.
- Le troisième chapitre est consacré à la présentation du Modèle triphasé de la MAS.
- Le quatrième chapitre est consacré sure le travail pratique.



## Chapitre 1 GENERALITES SUR LES MACHINES ASYNCHRONES

### 1.1 Introduction :

Ce chapitre donne un aperçu sur les moteurs asynchrones. Les moteurs asynchrones sont les moteurs électriques les plus utilisés. En triphasés, ils entraînent de nombreuses machines industrielles et en monophasés, ils sont très répandus en faible puissance (électroménager, etc.) Ils ont l'avantage d'être très robustes, peu coûteux, et d'être alimentés directement par le réseau.

#### 1.1.1 Historique de la machine asynchrone :

La paternité de la machine asynchrone est controversée. Elle pourrait être attribuée à trois inventeurs en 1887, Nikola Tesla dépose un brevet sur la machine asynchrone puis en mai de l'année suivante. Pendant la même période Galileo Ferraris publie des traités sur les machines tournantes, avec une expérimentation en 1885, puis une théorie sur le moteur asynchrone en avril 1883. En 1888, Michail Ossipowitsch Doliwo-Dobrowolski, électricien allemand d'origine russe, invente le premier moteur asynchrone à courant triphasé à cage d'écureuil qui sera construit industriellement à partir en 1891. Du fait de sa simplicité de construction, d'utilisation et d'entretien, de sa robustesse et son faible prix de revient, la machine asynchrone est aujourd'hui très couramment utilisée comme moteur dans une gamme de puissance allant de quelques centaines de watts à plusieurs milliers de kilowatts. Quand la machine asynchrone est alimentée par un réseau à fréquence fixe, il est difficile de faire varier sa vitesse. En outre, au démarrage, le couple est faible et le courant appelé est très élevé. Deux solutions historiques ont résolu ce dernier problème : le rotor à encoches profondes et le rotor à double cage mis au point en 1912 par Paul Boucherot.

.Grâce aux progrès de l'électronique de puissance, l'alimentation par un onduleur à fréquence variable permet maintenant de démarrer la machine convenablement et de la faire fonctionner avec une vitesse réglable dans une large plage. C'est pourquoi il est utilisé pour la motorisation des derniers TGV ainsi que des nouveaux métros parisiens [2].

### 1.2 Constitution du moteur asynchrone :

**1.2.1 Définition:** On appelle machine asynchrone(MAS), une machine électrique de vitesse variable, à courant alternatif, quia deux enroulements dont un (statorique) est alimenté par un réseau électrique de pulsation  $\omega_s$  : alors que le deuxième (rotorique) est fermé sur lui-même.

**1.2.2 Constitution:** Le moteur asynchrone est constitué principalement de deux armatures coaxiales l'une est fixée appelée stator et l'autre est mobile appelée rotor; entre les 2 armatures il y a l'entrefer

Du point de vue mécanique, la machine asynchrone triphasée est composée de trois parties distinctes :

- Le stator c'est la partie fixe de la machine.

- Le rotor c'est la partie tournante de la machine.
- Les paliers c'est la partie mécanique qui supporte les bouts d'arbre du rotor tout en lui Assurant le degré de liberté de la rotation. [1]

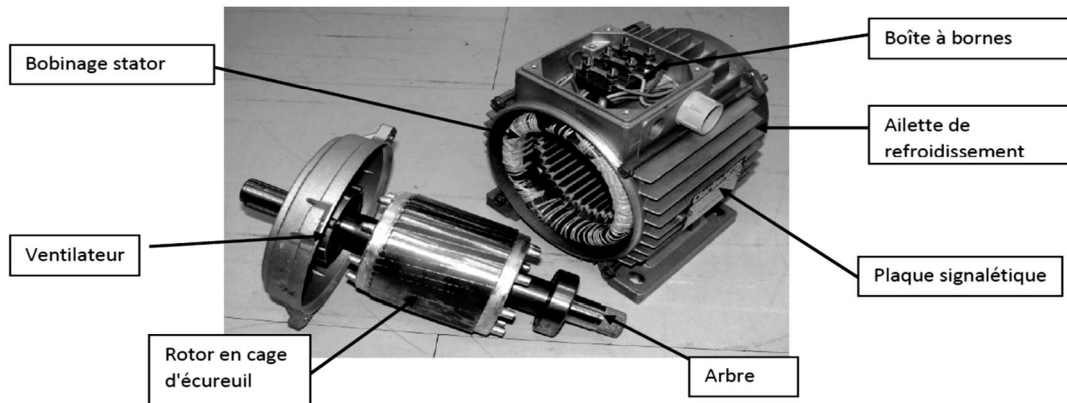


Figure 1.1 Parties constituant d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil.

**1 Le stator (partie fixe du moteur) :** Le stator est constitué de la carcasse, sur laquelle sont montés les bobinages formant un ensemble de trois enroulements correspondant aux trois phases du réseau d'alimentation (cas de MAS triphasé).

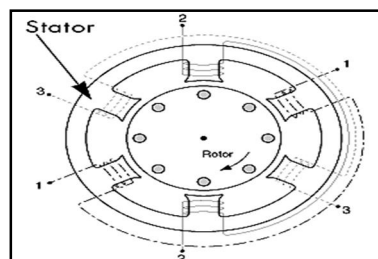


Figure 1.2 Stator du moteur

**2 Le rotor (partie mobile du moteur) :** Le rotor est claveté sur l'axe du moteur et tourne à l'intérieur du stator. Il est constitué de tôles d'acier empilées et formant un cylindre. Il présente deux types de rotors, Le circuit magnétique du rotor est constitué d'un assemblage de tôles ferromagnétiques rainurées. Dans les petits moteurs, les tôles sont découpées dans une seule pièce et assemblées sur un arbre. Dans les plus gros moteurs, chaque la minutions est constituée de plusieurs sections montées sur un noyau. On trouve deux types de rotor : bobiné ou à cage d'écureuil [3].

- **le rotor dit « à cage d'écureuil » :** Le rotor porte des barres en cuivre ou en aluminium logées dans des encoches et réunies à leurs extrémités par deux couronnes en Aluminium lui donnant l'aspect d'une cage d'écureuil. Le courant dans ses barres est induit uniquement par le champ statorique.

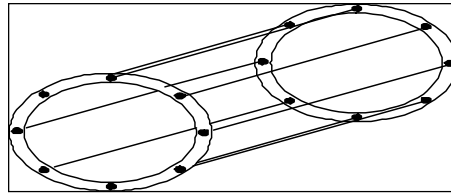


Figure 1.3 Rotor à cage d'écureuil

- **rotor bobiné (figure 1.4) :** Il s'agit d'un enroulement *triphase*, logé dans des encoches à la périphérie du rotor, dont le nombre de pôles  $2p$  est le même que celui du stator, et dont les phases sont couplées en étoile. Les extrémités de l'étoile sont reliées à trois bagues en cuivre calées sur l'arbre. Ces bagues frottent sur des balais fixes ce qui permet l'insertion d'un rhéostat triphasé en série avec le rotor.

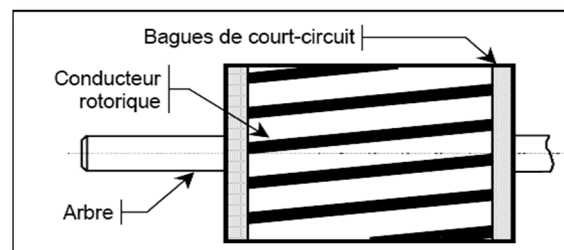


Figure 1.4 Rotor bobiné

**Avantage :** possibilité de modifier la résistance des enroulements rotoriques, donc la caractéristique mécanique

**Inconvénient:** fragilité des contacts glissants (balais frottant sur des bagues); coût élevé.

En fonctionnement normal, ces enroulements sont court-circuités.

### 3 Les Paliers :

Les paliers, qui permettent de supporter et de permettre la rotation de l'arbre rotoriques, 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 ou des tiges de serrage comme nous pouvons le visualiser sur la figure 1.1.

L'ensemble ainsi établi constitue alors la machine asynchrone à cage d'écureuil. [1]

### 4 Cas de machines asynchrones à aimants permanents :

L'introduction des aimants permanents dans la construction des machines électriques est relativement récente. Cela s'est surtout développé à partir des années 60, avec la découverte de l'aimante ferrite puis des terres rares :

- Les aimants en ferrites: Ce sont actuellement les plus utilisés. Ce sont des céramiques fabriquées à partir de matières premières à bas prix. Mais leurs performances magnétiques restent modestes (Induction rémanente  $\sim 0,4$  T) et ils résistent moyennement à la démagnétisation.

# CHAPITRE 1 GENERALITES SUR LES MACHINES ASYNCHRONES

- Les Alnicos : Ils constituent une faible proportion du marché [4]. Ils sont plus chers que les ferrites et ont une faible résistance à la démagnétisation. Cependant, ce sont les aimants à base de terre rare qui ont considérablement amélioré les performances des machines excitées par aimants, grâce à leur énergie magnétique élevée et leur capacité à supporter de fortes températures jusqu'à 350°C).
- Les aimants Samarium Cobalt: Ils ont des caractéristiques magnétiques très intéressantes (Induction rémanente ~ 0,9 à 1,1 T). Ils supportent des températures élevées (supérieures à 250°C) et ont une forte résistance à la démagnétisation. Cependant, leur coût est nettement supérieur à celui des ferrites.
- Les Néodyme Fer Bore : Ils possèdent des caractéristiques magnétiques encore meilleures (Induction rémanente ~ 1,1 à 1,4 T), mais leur température limite de fonctionnement est moins élevée. Leur coût est un peu inférieur à celui des Samarium Cobalt.

**5 Plaque signalétique:** Les plaques signalétiques des Moteurs asynchrone indiquent quel couplage réaliser en fonction de la tension composée du réseau, puis les grandeurs nominales du moteur pour le couplage considéré.

Exemple :

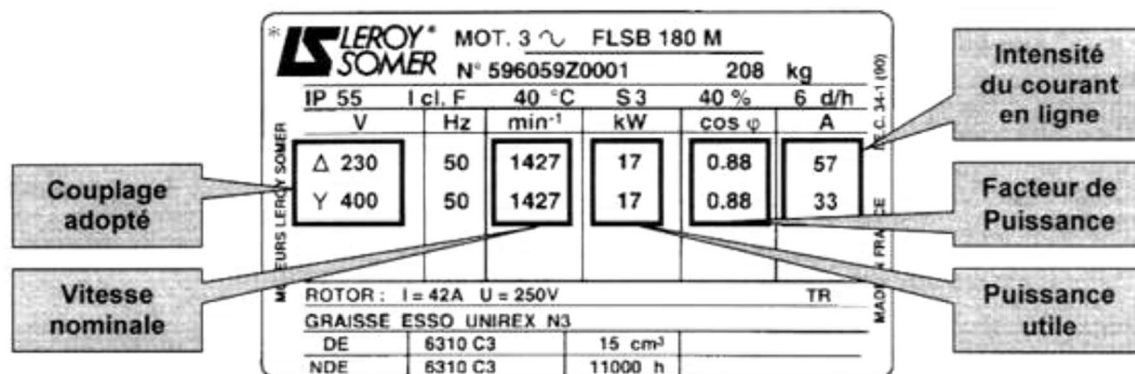
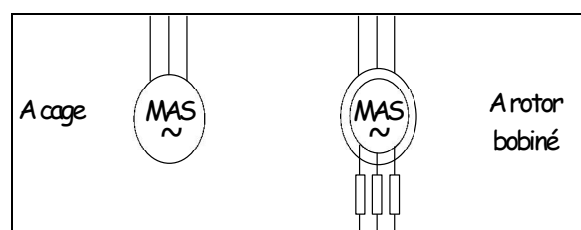


Figure 1.5 Plaque signalétique d'un Moteur asynchrone triphasé

## 6 Symboles :



### 1.3 Fonctionnement du moteur asynchrone :

Les courants alternatifs dans les bobinages du stator vont créer dans l'entrefer un champ magnétique tournant à la vitesse :  $\Omega_s = \omega_s / p$  avec  $\omega_s$  = pulsation des courants statoriques (fréquence  $n_s = f/p$ )

# CHAPITRE 1 GENERALITES SUR LES MACHINES ASYNCHRONES

Où :  $\Omega_S$  : pulsation de synchronisme du champ tournant en  $\text{rad.s}^{-1}$ .

$\omega_S$ : pulsation des courants alternatifs en  $\text{rad.s}^{-1}$ ,  $\omega_S = 2.\pi.f$ .

p : nombre de paires de pôles [4].

Le champ tournant balaie les bobinages rotoriques et va créer des courants induits dans le rotor en court-circuit (loi de Lenz). Ces courants (de pulsation  $g.\omega$ ) vont eux même entrainer un champ magnétique qui va s'opposer aux causes qui lui ont donné naissance. L'interaction de ces deux champs magnétiques va alors créer un couple qui va entrainer le rotor en rotation.

Le rotor tourne à une vitesse  $\Omega$  inférieure à la vitesse de synchronisme. (Fréquence n proche de  $n_S$ :  $n < n_S$ ). Il y a donc mouvement relatif du rotor par rapport au champ magnétique tournant statorique, à la fréquence de glissement notée  $n_g$ :  $n_g = n_S - n$ . On dit que le rotor « glisse » par rapport au champ tournant et alors une variable g caractérisant la vitesse de rotation du rotor est introduite.

$$g = \frac{n_S - n}{n_S} = \frac{\Omega_S - \Omega}{\Omega_S} = \frac{\omega_S - \omega}{\omega_S}$$

Avec

$n_S$  : vitesse de rotation de synchronisme du champ tournant ( $\text{tr.s}^{-1}$ ).

n : vitesse de rotation du rotor ( $\text{tr.s}^{-1}$ ).

$\Omega_S = 2\pi n_S$  ( $\text{rad.s}^{-1}$ ) et  $\Omega = 2\pi n$  ( $\text{rad.s}^{-1}$ ).

Ce glissement g va dépendre de la charge (g n'a pas d'unité et s'exprime en général en %).

- Au démarrage :  $n = 0$  et  $g = 1$
- A vide :  $n \approx n_S$  et  $g = 0$

## 1.3.1 Caractéristiques de fonctionnement :

**A. Fonctionnement à vide:** Le courant à vide  $I_0$  est relativement important (20% du courant nominal); le facteur de puissance  $\cos \varphi_0$  est faible. Ce courant à vide est donc essentiellement réactif, et correspond à la magnétisation du circuit magnétique. D'autre part, la fréquence de rotation  $n_0$  est pratiquement égale à la fréquence de synchronisme  $n_S$ .

**B. Fonctionnement en charge :** La fréquence de rotation n diminue peu quand la charge augmente, le moteur peut démarrer seul même en charge. Dans sa partie utile (partie linéaire), la caractéristique mécanique est pratiquement rectiligne,  $C_u$  est une fonction affine de n et le moment du couple utile est proportionnel à g. Le couple  $C_{em}$  est proportionnel à  $V^2$ . Avec V tension simple d'une tension d'alimentation. Si le point de fonctionnement dépasse le maximum de la caractéristique mécanique, le moteur décroche [4].

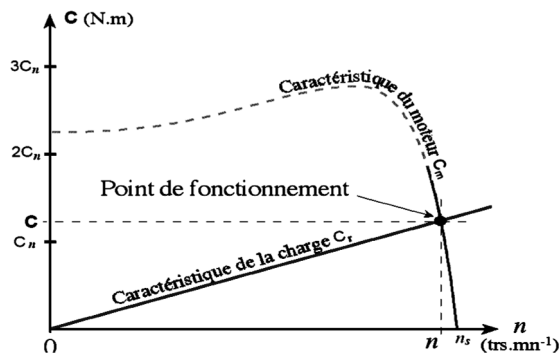


Figure 1.6 point de fonctionnement du moteur asynchrone

## 1.3.2 Exemples de charge :

<p><b>Machine à puissance constante</b> (enrouleuse, compresseur, essoreuse)</p>	<p style="text-align: center;"><math>T_r = \frac{k}{N}</math></p>	<p><b>Machine à couple constant</b> (levage, pompe)</p>	<p style="text-align: center;">Couple constant <math>T_r = k</math></p>
<p><b>Machine à couple proportionnel à la vitesse</b> (pompe volumétrique, mélangeur)</p>	<p style="text-align: center;"><math>T_r = k.N</math></p>	<p><b>Machine à couple proportionnel au carré de la vitesse</b> (ventilateur)</p>	<p style="text-align: center;"><math>T_r = k.N^2</math></p>

## 1.3.3 Démarrage :

Lors du démarrage d'une machine asynchrone on constate un pic de courant entre 4 et 8 fois le courant nominal.

**1) Moteurs à cage :** Pour les moteurs à cage la solution la plus couramment employée consiste à sous alimenter la machine pendant la phase de démarrage. Il faut cependant que la charge mécanique permette cette sous-alimentation car diminuer la tension dans un rapport  $1/n$  entraîne une diminution du couple dans un rapport  $1/n^2$ . Pour remédier à ce problème, plusieurs méthodes sont employées :

**A. Démarrage étoile - triangle :** il nécessite la sortie des 6 bornes du moteur et n'est envisageable que pour des petites puissances à cause de la brutalité des régimes transitoires lors des changements de couplage. C'est un procédé extrêmement simple et peu coûteux. Le couplage nominal de la machine doit être « triangle ».

**B. Insertion de résistances ou inductances statoriques** : cette méthode permet d'avoir plusieurs crans de démarrage. Les résistances sont de type métallique ou électrolytique à variation continue. Cette solution est de plus en plus abandonnée au profit de solutions électroniques d'un coût voisin, d'un volume moindre et d'un rendement bien meilleur.

**C. Démarrage par autotransformateur à une ou plusieurs prises** : il permet l'obtention d'un couple moteur plus élevé qu'avec une inductance statorique. Cette solution est également abandonnée au profit de solutions électroniques d'un coût inférieur.

**D. Démarrage par gradateur de tension** : il offre les mêmes performances que la solution précédente pour un coût et un encombrement moindre. Le couple résistant de la charge entraînée doit permettre un démarrage ; il sera donc nécessairement quadratique ( $C_r = k^2$  ventilation pompage...). Des fonctionnalités supplémentaires peuvent lui être adjointes (démarrage à courant constant, dégomme de pompe, rampes d'accélération et de décélération...).

**E. Utilisation d'un onduleur de tension** : Quoique plus souvent utilisé pour faire de la variation de vitesse, l'onduleur de tension peut permettre de faire un démarrage souple avec limitation du courant dans les situations où aucune baisse du couple n'est possible.

**2) Moteurs à rotor bobiné** : Pour les moteurs à rotor bobiné, on a la possibilité d'insérer, lors d'un démarrage, des résistances dans le circuit rotorique. Cette solution permet à la fois de diminuer le courant de démarrage et d'augmenter le couple moteur. Les résistances sont de type métallique ou électrolytique à variation continue. Dans ce cas, des solutions électroniques (gradateur rotorique) sont disponibles [4].

### 1.3.4 Freinage des machines asynchrones :

**A. Freinage par contre-courant**: Ce mode de freinage est obtenu par inversion de deux phases. Au moment de l'inversion, le glissement vaut presque 2, il se réduit ensuite rapidement sous l'effet du couple inverse par rapport au sens de rotation. Généralement, un dispositif électrique de coupure déconnecte le moteur du réseau au moment du passage à la vitesse nulle ( $g=1$ ). Le couple de freinage moyen est, en général, supérieur au couple de démarrage pour des moteurs asynchrones à cage. La variation du couple de freinage dépend fortement de la conception de la cage rotorique. Ce mode de freinage implique un courant absorbé important, approximativement constant et légèrement supérieur au courant de démarrage. Le temps de freinage approximatif peut être calculé au moyen de la formule suivante :

$$t_f = \frac{K_1(J_m + J_{ch})}{0,45(C_{max} + C_d)}$$

Où

$t_f$ : temps de freinage (s).

$K_1$  : constante dépendant du nombre de pôles du moteur.

$J_m$ : moment d'inertie du moteur ( $\text{kg.m}^2$ ).

$J_{ch}$ : moment d'inertie de la machine entraînée ramené à la vitesse du moteur ( $\text{kg.m}^2$ ).

$C_{max}$  : couple maxi du moteur (Nm).

$C_d$ : couple de démarrage du moteur (Nm).

**B. Freinage par injection de courant continu:** Dans ce mode de freinage, le moteur asynchrone est couplé au réseau et le freinage est obtenu par coupure de la tension alternative et application d'une tension continue au stator. Les sollicitations thermiques sont approximativement 3 fois moins élevées que pour le mode de freinage par contre-courant.

**C. Freinage en génératrice asynchrone:** Ce mode de freinage s'applique aux moteurs à multi-vitesses lors du passage à la vitesse inférieure ou aux moteurs alimentés en fréquence variable lorsque celle-ci descend. Il est impossible d'obtenir l'arrêt complet du moteur par ce procédé.

**D. Freinage mécanique:** Des freins électromagnétiques (excitation en courant continu ou en courant alternatif) peuvent être montés à l'arrière des moteurs. Ils peuvent venir en complément d'un freinage électrique pour l'arrêt complet du moteur et son maintien en position sans alimentation. Ces freins sont toujours à manque de courant c'est à dire que le freinage se fait en l'absence d'alimentation du frein[4].

## 1.4 Machines asynchrones à plusieurs vitesses :

Il est possible d'obtenir un nombre discret de vitesses en utilisant deux enroulements statoriques ou en modifiant le nombre de pôles apparent du stator.

**1) Double enroulements statoriques séparés :** Lorsque l'on souhaite obtenir deux vitesses qui ne sont pas dans un rapport de 2 à 1, on munit le stator de deux enroulements (toujours montés en étoile pour éviter les courants induits) que l'on alimente séparément.

**2) Couplage de pôles système Lundstrom/Dahlander :** Il est possible d'obtenir des moteurs à deux vitesses dans un rapport  $\frac{1}{2}$  avec un enroulement statorique constitué de 3 x 2 demi-enroulements qui par couplage feront apparaître un nombre de paires de pôles simples ou doubles.

**3) Couplage de pôles système PAM (Pole-Amplitude-Modulation) :** Avec ce système il est possible d'obtenir des moteurs à deux vitesses qui ne sont pas nécessairement dans un rapport  $\frac{1}{2}$ . Les couplages externes sont les mêmes que pour le système Lundstrom/Dahlander.

**4) Mixage des techniques :** En plaçant dans un stator deux enroulements à changement de pôles on peut avoir jusqu'à 4 vitesses pour un même moteur. C'est le maximum réalisable pratiquement



## **1.5 Conclusion :**

Le moteur asynchrone alimenté directement sur le réseau, représente la grande majorité des applications industrielles. Son seul point noir est l'énergie réactive, toujours consommée pour magnétiser l'entrefer.

Autrefois, le démarrage et variation de vitesse de ce moteur se révélaient compliqué mais tout cela s'est résolu grâce aux progrès de l'électronique de puissance. La conséquence de ce développement de l'électronique de commande fait que le moteur asynchrone est maintenant le plus utilisé dans des domaines très variés.

### CHAPITRE 2 LES DIFFERENTS DEFAUTS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

#### 2.1 Introduction :

De nombreuses défaillances peuvent apparaître sur les machines asynchrones. Elles peuvent être électriques, mécaniques.

Parmi les défauts qui nous intéressent dans cette étude est le défaut statorique; celui-ci représente 30 à 40% de l'ensemble des défauts qui affectent la machine, ce défaut est dû en Grande partie aux défauts d'isolement qui engendrent des court-circuit, que ce soit entre Phases ou par rapport à la terre [5][6].

#### 2.2 Principaux défauts de la machine asynchrone triphasée à cage :

Nous rappelons brièvement les différents défauts de la machine asynchrone triphasée à Cage ainsi que leurs origines sans pour autant prétendre à l'exhaustivité. Ces défauts apparaissent dans les différentes parties constituant la machine.

##### 2.2.1 Défauts internes et externes :

Il existe deux types de défauts principaux : **internes** et **externes**.

Les causes de ces défauts sont brièvement et respectivement décrites dans les organigrammes des figures 2.1 et 2.2. Nous pouvons ainsi remarquer que les défauts internes de la machine sont causés par les constituants de la machine (circuits magnétiques rotorique et statorique, bobinage statoriques, entrefer mécanique, cage rotorique,...) alors que les défauts *externes* sont provoqués, soit par les tensions d'alimentation et la charge mécanique, soit par l'environnement de l'utilisation de la machine.

D'après les organigrammes Figure 2.1 et Figure 2.2 les origines des défauts sont diverses Thermique, mécanique, électrique ou encore environnementale. A titre indicatif, les Démarrages fréquents provoquent des courants élevés dans les barres rotorique [7].

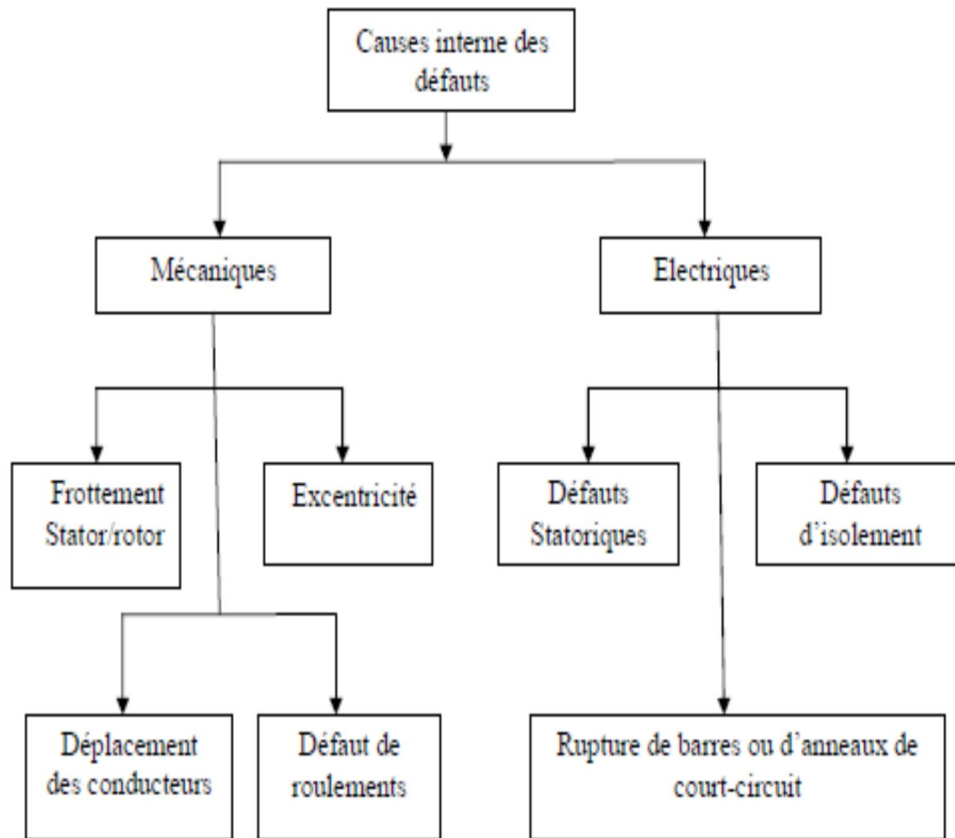


Figure 2.1 causes internes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage

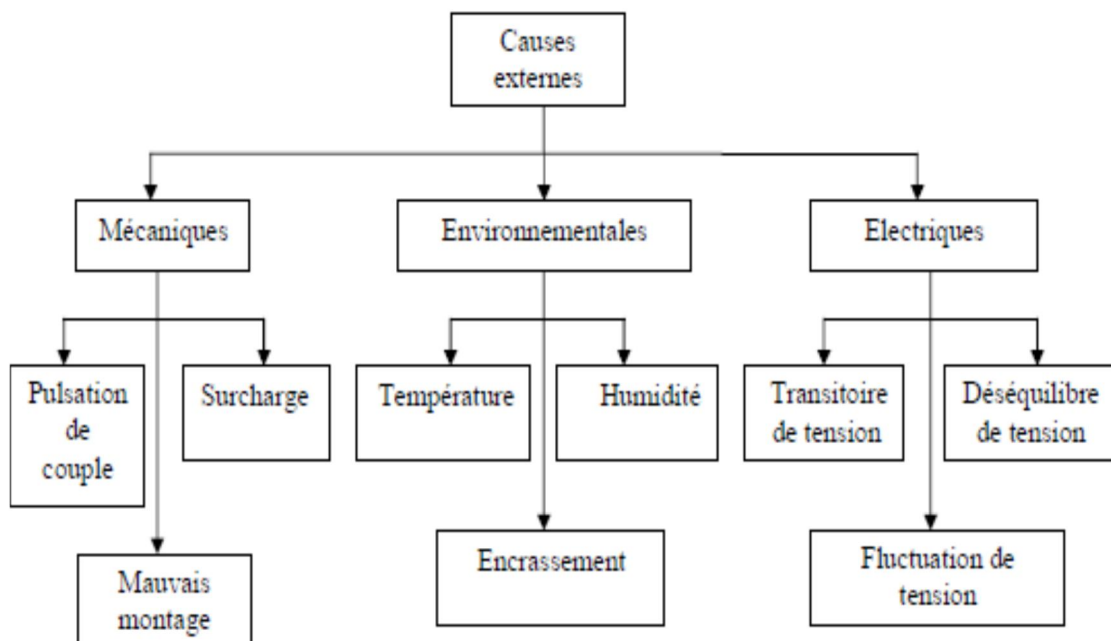


Figure 2.2 causes externes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage

## CHAPITRE 2 LES DIFFERENTS DEFAUTS DE LA MACHINES ASYNCHRONE

Celles-ci engendrent par conséquent des sur échauffements et des contraintes mécaniques conduisant à terme à des fissures puis à une cassure de barres. Par effet d'avalanche la barre cassée accélère la rupture des barres adjacentes pouvant aboutir jusqu'à la destruction totale du rotor. De même, les efforts électrodynamiques que subissent les conducteurs des phases se traduisent par des vibrations mécaniques ayant pour effet de détériorer l'isolation.

Sur le plan électrique, les fronts de tensions générés par les convertisseurs statiques accentuent le phénomène de décharges partielles et réduisent, par conséquent, la durée de vie

De l'isolant[7][8].

Quant aux origines environnementales, l'humidité et les produits corrosifs ou abrasifs sont les plus rencontrés au niveau de l'entrefer, les défauts se manifestent par une excentricité statique, une excentricité dynamique ou une excentricité mixte. Le défaut d'excentricité statique est généralement dû à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator. Le défaut d'excentricité dynamique peut être causé aussi bien par une déformation du cylindre rotorique que par une déformation du cylindre statorique. L'excentricité mixte est une combinaison des deux.

Au niveau de la cage, les défauts se manifestent par la rupture de barres ou d'anneaux de court-circuit. Ces ruptures de barres ou de portions d'anneau peuvent être dues, par exemple, à une surcharge mécanique (démarrages fréquents,..), à un échauffement local excessif ou encore à un défaut de fabrication (bulles d'air ou mauvaises soudures).

Au niveau des paliers nous pouvons citer le défaut de décentrage des flasques conduisant généralement à une excentricité statique alors qu'une détérioration de roulements à billes conduit le plus souvent à une excentricité dynamique.

Il est important de signaler que plusieurs études statistiques ont été menées dans le but de quantifier l'impact de chaque type de défaut sur la fiabilité de la machine et leurs pourcentages ont été cités dans plusieurs publications. Les résultats obtenus restent quand même assez différents d'une étude à l'autre. Cependant, toutes les études convergentes pour classer les défauts de paliers comme étant les plus fréquents, suivis par les défauts statoriques et, en dernier, les défauts de cage rotorique [7][8].

### **2.2.2 Etudes statistique des défaillances de la machine asynchrone :**

Nous allons dresser une liste des principaux défauts pouvant se produire dans les moteurs Asynchrones, leurs causes et statistiques d'occurrence.

### **2.2.3 Cause des défauts :**

La figure 2.3 présente les phénomènes à l'origine des défauts dans la machine ; la Principale source de défauts provient de la mécanique; la deuxième cause de défauts est la Surchauffe du moteur qui accentue le vieillissement des composants; la troisième cause de Défauts référencés est le claquage d'isolants conduisant à des courts-circuits[5][6].

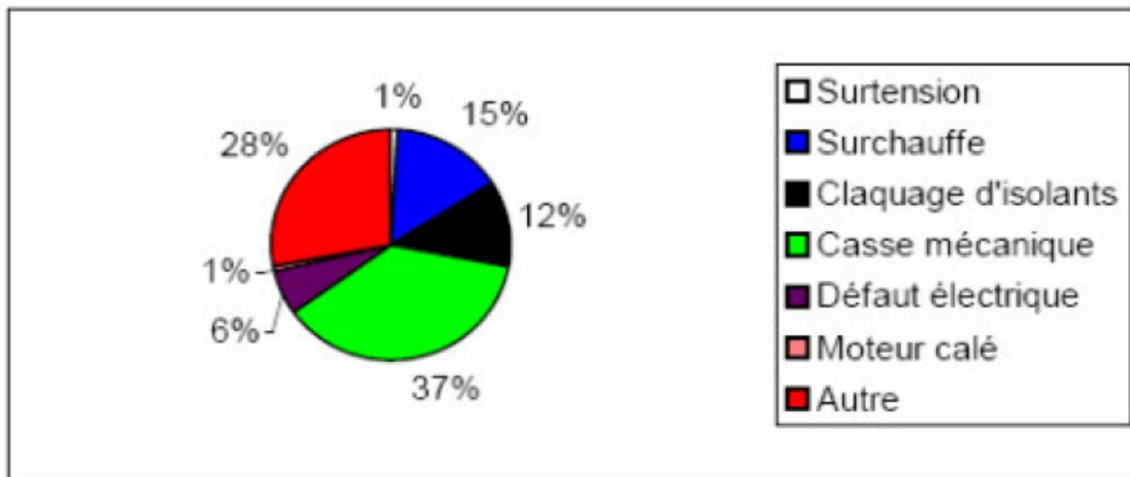


Figure 2.3 répartitions des causes des défauts pour une machine

### 2.3 Défaillances d'ordre électrique :

Les défaillances d'origine électrique peuvent, dans certain cas, être la cause d'un arrêt de la machine (au même titre que les défaillances d'ordre mécanique). Ces défaillances se séparent en deux catégories bien distinctes. Nous pouvons citer les défaillances qui apparaissent au niveau des circuits électriques statoriques et celles qui apparaissent au niveau des circuits électriques rotoriques[5][6][7].

#### 2.3.1 Défaillances des circuits électriques rotoriques :

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du rotor, peuvent être définis comme suit :

- Rupture de barres.
- Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit.
- Excentricité statique et dynamique.

##### 2.3.1.1 Ruptures de barres:

La cassure ou rupture de barre est un des défauts les plus fréquents au rotor. Elle peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotorique. 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 [5][6].

### 2.3.1.2 Ruptures d'anneaux :

La rupture de portion d'anneaux est un défaut qui apparait aussi fréquemment que cassure de barres .Ces ruptures sont dues 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 courante dans 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 [7][5][8]

### 2.3.1.3 Excentricité statique et dynamique :

Parfois, la machine électrique peut être soumise à un décentrement du rotor, se traduisant Par des oscillations de couple (décalage entre la rotation de l'arbre et le centre du rotor. Ce phénomène dont l'origine peut être lié à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut roulement (usure), à un défaut de charge, ou à un défaut de fabrication (usinage). Trois *cas* d'excentricité, sont généralement distingués :

- l'excentricité statique, le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe.
- l'excentricité dynamique, le rotor est positionné au centre de l'alésage mais, ne tourne plus autour de son axe. L'excentricité qu'on pourrait qualifier de 'mixte', associant les deux cas précédemment Cité

### 2.3.2 Défaillances des circuits électriques statorique :

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis comme suit :

- Défaut d'isolant.
- Court-circuit entre spires.
- Court-circuit entre phases.

### 2.3.2.2 Défauts d'isolant dans un enroulement :

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des courts- circuits. En effet, les différents pènes (Joule, fer, mécanique,...) 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 de température, de tension et de mécanique. De ce fait, si l'environnement de travail d'un matériau d'isolation dépasse une de ces limites, ce matériau se dégrade de manière prématurée ou accélérée, puis finit par ne plus assurer sa fonction.

## CHAPITRE 2 LES DIFFERENTS DEFAUTS DE LA MACHINES ASYNCHRONE

---

Dans ce cas, un court-circuit peut apparaître dans l'enroulement concerné Les différents causes pour ce type de défaut sont :

- Dégradation de l'isolant à la fabrication.
- Tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation.
- Courant important dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge. Ceci entraîne une élévation de la température dégradant prématurément le matériau d'isolation.
- Vibrations mécaniques.
- Vieillessement naturel des isolats. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie limitée. Même dans une utilisation 'normale', l'isolant finit naturellement par se dégrader le fonctionnement dans un environnement sévère [5][6][7][8].

### 2.3.2.3 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<sup>ème</sup> court-circuit). Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations proportionnelle au défaut [5][6][7].

### 2.3.2.4 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 très élevés qui conduiraient à la fusion des conducteurs d'alimentation et/ou à la disjonction 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 [5][6][7].

### 2.4 Défaillances d'ordre mécanique :

Les défaillances d'ordre mécaniques sont en général, les plus rencontrées parmi tous les défauts que compte la machine asynchrone. Ces défauts peuvent apparaître au niveau des roulements à billes, des flasques ou encore de l'arbre moteur.

#### 2.4.1 Défaillances des roulements :

Les roulements à billes jouent un rôle très important dans le fonctionnement de tout type de machines électriques. Les défauts de roulements peuvent être causés par un mauvais choix de matériau à l'étape de fabrication. Les problèmes de rotation au sein de la culasse du roulement causés par un roulement abîmé, écaillé ou fissure, peuvent créer des perturbations au sein de la machine. Nous savons que des courants électriques peuvent circuler au niveau des roulements d'une machine asynchrone ce qui peut provoquer la détérioration de ces derniers. La graisse, qui permet la lubrification et la bonne rotation des roulements peut, dans certaines applications, se rigidifier et causer une résistance à la rotation. L'analyse vibratoire de la machine ou l'analyse harmonique des courants statoriques permet de détecter ce type de défaillances

#### 2.4.2 Défaillances du flasque :

Les défauts créés par les flasques de la machine asynchrone sont le plus généralement causés à l'étape de fabrication. En effet, un mauvais positionnement des flasques provoque un désalignement des roulements à billes, ce qui induit une excentricité au niveau de l'arbre de la machine. Il est possible de détecter ce type de défaillance par une analyse vibratoire ou une analyse harmonique des courants absorbés par la machine.

#### 2.4.3 Défaillances de l'arbre :

L'arbre de la machine peut laisser paraître une fissure due à l'utilisation d'un mauvais matériau lors de sa construction. A court ou long terme, cette fissure peut mener à une fracture nette de l'arbre provoquant ainsi un arrêt irrémédiable de la machine asynchrone.

Les milieux corrosifs peuvent aussi affaiblir la robustesse de l'arbre de la machine. Par exemple :

- l'humidité peut provoquer des microfissures et conduire à une destruction complète de la machine.
- Une excentricité statique, dynamique ou mixte peut induire des efforts considérables sur l'arbre moteur, amenant ainsi une fatigue supplémentaire.

Une analyse vibratoire, une analyse par ultrason, une analyse fréquentielle des courants absorbés ou simplement une analyse visuelle de l'arbre de la machine permet de détecter ce type de défaillance [7][8].



### **2.5 Conclusion :**

Nous avons montré les défaillances qui peuvent arrêter intempestif de la machine asynchrone à cage d'écureuil. Nous nous sommes volontairement attardés sur les bobinages statoriques en détaillant les différents défauts fréquemment rencontrés, de même, au rotor. Nous avons dénombré les principaux défauts qui peuvent survenir soit dans la phase de fabrication, soit dans celle d'utilisation. Nous avons cité les causes de ces défaillances sur le comportement de la machine, et d'après l'étude statistique, on constate que, Les contraintes mécaniques sont les plus grandes pour ce type de machines ; ce qui explique la domination des défauts de roulements par rapport aux défauts électriques. C'est pour pallier ce problème que le diagnostic de défauts a pris une importance de plus en plus grandissante dans les milieux industriels.

## CHAPITRE 3 MODELE TRIPHASE DE LA MAS

### 3.1 Introduction :

Ce chapitre donne un modèle simplifié de la machine asynchrone triphasé et son modèle biphasé équivalent.

La machine asynchrone (MAS) triphasée comporte un stator fixe et un rotor mobile autour de l'axe de symétrie de la machine. Dans des encoches régulièrement réparties sur la face interne du stator sont logés trois enroulements identiques, leurs axes sont distants entre eux d'un angle électrique égale à  $(2\pi/3)$ .

A fin de simplifier la modélisation de la MAS, quelques hypothèses simplificatrices sont admises :

- Entrefer constant et effet des encoches négligé.
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer.
- Pertes ferromagnétiques négligeables (le circuit magnétique est parfaitement feuilleté).
- Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante, cela permet d'exprimer les flux comme fonctions linéaires des courants.
- La force magnétomotrice créée par chacune des phases est à répartition sinusoïdale, ce qui revient à ne considérer que la fondamentale. Ce qui signifie que le flux d'enroulement à travers chaque phase et l'inductance mutuelle entre un enroulement rotorique et statorique suivent une loi sinusoïdale en fonction de l'angle rotorique.
- De même, la machine est considérée comme symétrique et équilibrée.

### 3.2 Description du modèle triphasé:[11] [10][9]

Le modèle de la MAS triphasé est illustré par le schéma de la figure 3.1 :

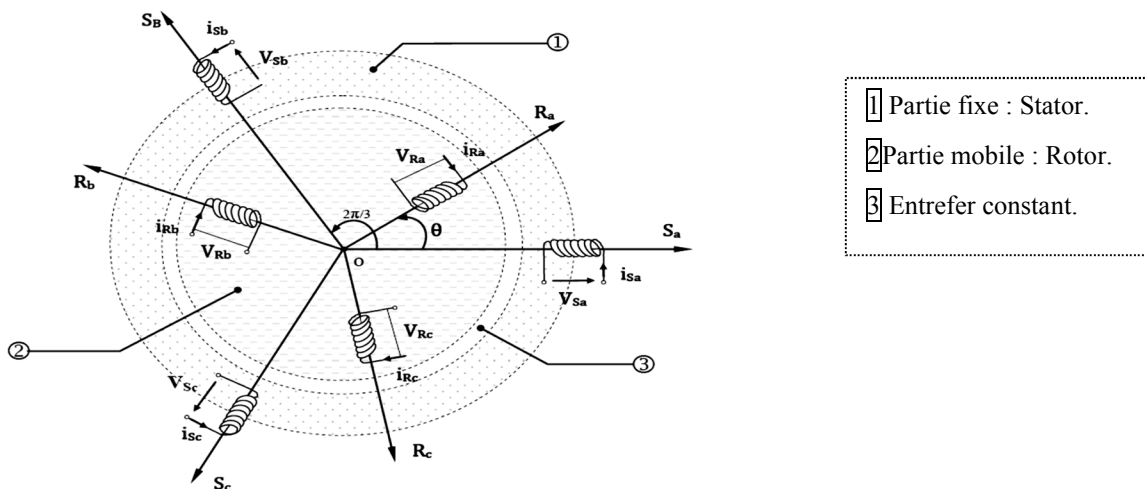


Figure 3.1 Représentation des enroulements de la MAS triphasée dans l'espace électrique.

## CHAPITRE 3 MODELE TRIPHASE DE LA MAS

Les armatures statoriques et rotoriques sont munies chacune d'un enroulement triphasé qui sont trois enroulements du stator : Sa, Sb et Sc et trois enroulements rotoriques : Ra, Rb et Rc , avec  $\theta$  : Angle entre l'axe de la phase statorique et la phase rotorique.

La loi de Faraday permet d'écrire :

### 1) Équation électrique :

$$v = Ri + \frac{d\varphi}{dt} \quad (3.1)$$

Pour les 3 phases statoriques on résume cette écriture par l'écriture matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + (d/dt) \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Sous sa forme matricielle condensée

$$[V_{sabc}] = [R_s][I_{sabc}] + (d/dt)[\varphi_{sabc}] \quad (3.3)$$

De même pour le rotor :

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + (d/dt) \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Sous sa forme matricielle condensée

$$[V_{rabc}] = [R_r][I_{rabc}] + (d/dt)[\varphi_{rabc}] \quad (3.5)$$

Le rotor étant en court-circuit, ses tensions sont nulles.

### 2) Équations magnétiques :

Chaque flux comporte une interaction avec les courants de toutes les phases y compris la sienne (notion de flux / inductance propre).

Exemple de la phase *a* statorique :

$$\varphi_{sa} = l_s I_{sa} + M_s I_{sb} + M_s I_{sc} + M_1 I_{ra} + M_3 I_{rb} + M_2 I_{rc} \quad (3.6)$$

Les expressions des flux statoriques et rotoriques sous la forme matricielle s'écrivent :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \\ \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s & M_1 & M_3 & M_2 \\ M_s & l_s & M_s & M_2 & M_1 & M_3 \\ M_s & M_s & l_s & M_3 & M_2 & M_1 \\ M_1 & M_3 & M_2 & l_r & M_r & M_r \\ M_2 & M_1 & M_3 & M_r & l_r & M_r \\ M_3 & M_2 & M_1 & M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \\ I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

La matrice des inductances  $[L(\Theta)]$  établit la relation entre les flux et les courants; elle comporte 36 coefficients dont la moitié dépend du temps, par l'intermédiaire de  $\Theta$  (position du rotor).

Où :

$$\begin{cases} M_1 = M_{sr} \cos(\theta) \\ M_2 = M_{sr} \cos(\theta - 2\pi/3) \\ M_3 = M_{sr} \cos(\theta + 2\pi/3) \end{cases} \quad (3.8)$$

La matrice des flux réels fait apparaître quatre sous matrices d'inductances :

$$[L_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}$$

Et

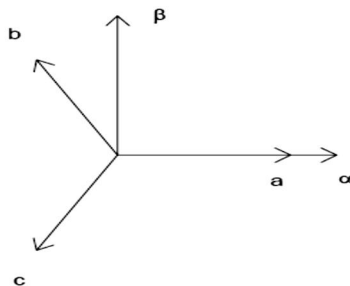
$$(3.10) \quad [M_{sr}] = [M_{rs}]^T = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Par conséquence les expressions des tensions statoriques et rotoriques sous la forme matricielle condensée s'écrivent :

$$(3.11) \quad \begin{cases} [V_{sabc}] = [R_s][I_{sabc}] + \frac{d}{dt} \{ [L_s][I_{sabc}] + [M_{sr}][I_{rabc}] \} \\ [V_{rabc}] = [R_r][I_{rabc}] + \frac{d}{dt} \{ [M_{sr}]^T [I_{sabc}] + [L_r][I_{rabc}] \} \end{cases}$$

### 3.3 Modèle biphasé équivalent : [11] [10] [9]

Le but de l'utilisation de cette transformation c'est de passer d'un système triphasé abc vers un système biphasé  $\alpha\beta$ .



**Figure 3.2 axes statorique abc – axes rotorique  $\alpha\beta$ .**

Il existe principalement deux transformations : **Clarke et Concordia**. La transformation de Clarke conserve l'amplitude des grandeurs mais pas la puissance ni le couple (on doit multiplier par un

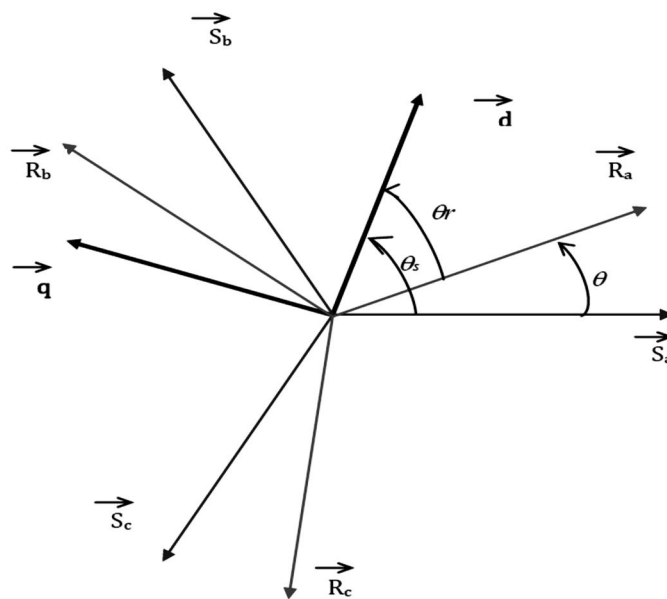
coefficient  $3/2$ ). Tandis que celle de Concordia, qui est normée, elle conserve la puissance mais pas les amplitudes.

Etant donné que les grandeurs statoriques sont liées aux grandeurs rotoriques à travers l'angle  $\theta$ .

Alors les grandeurs statoriques et les grandeurs rotoriques sont transformées vers un repère commun dit dq et ceci à l'aide de deux transformations dans le plan qui sont des rotations. Ce sont ces transformations ainsi que la transformation de Concordia ou de Clarke qui constitue la transformation **de Park**.

### 3.3.1 Transformation de PARK :

La transformation de Park consiste à transformer un système triphasé (abc) en un système biphasé équivalent (d-q), comme le montre la figure 3.



**Figure 3.3 Repérage angulaire des systèmes d'axes dans l'espace électrique**

Les repères de la transformation de Park des grandeurs statoriques et celle des grandeurs rotoriques doivent coïncider pour simplifier ces équations (Figure 3). Ceci se fait en liant les angles  $\theta_s$  et  $\theta_r$  par la relation  $\theta_s = \theta_r + \theta$  ( $\theta_s$ : étant l'angle entre la phase a du stator et l'axe d du référentiel).

Alors une matrice  $[A(\theta)]$  est définie, permettant le passage des composantes  $X_{abc}$  du système triphasé aux composantes  $X_{dq0}$  du système biphasé tournant à la même vitesse, telle que :

$$[A(\theta)] = (3.12) \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

Les courants, tensions et flux dans le nouveau repère sont définis comme suit :

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_o \end{bmatrix} = [A(\theta)] \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_o \end{bmatrix} [A(\theta)] \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \text{ et } \begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \\ \varphi_o \end{bmatrix} [A(\theta)] \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

En développant les expressions des flux, elles deviennent :

A. Au stator :  $[\varphi_{sdqo}] = [A(\theta_s)][[L_s][I_{sabc}] + [M_{sr}][I_{rabc}]]$

$$[\varphi_{sdqo}] = [A(\theta_s)][L_s][A(\theta_s)]^{-1}[I_{sdqo}] + [A(\theta_s)][M_{sr}][A(\theta_s)]^{-1}[I_{rdqo}] \quad (3.14)$$

B. Au rotor :  $[\varphi_{rdqo}] = [A(\theta_r)][[M_{sr}][I_{sabc}] + [L_s][I_{rabc}]]$

$$[\varphi_{rdqo}] = [A(\theta_r)][M_{sr}][A(\theta_s)]^{-1}[I_{sdqo}] + [A(\theta_r)][L_s][A(\theta_r)]^{-1}[I_{rdqo}] \quad (3.15)$$

Après calcul, on obtient :

$$(3.16) \quad \begin{bmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} \\ \varphi_{so} \\ \varphi_{rd} \\ \varphi_{rq} \\ \varphi_{ro} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s - M_s & 0 & 0 & 3M_{sr}/2 & 0 & 0 \\ 0 & l_s - M_s & 0 & 0 & 3M_{sr}/2 & 0 \\ 0 & 0 & l_s + 2M_s & 0 & 0 & 0 \\ 3M_{sr}/2 & 0 & 0 & l_r - M_r & 0 & 0 \\ 0 & 3M_{sr}/2 & 0 & 0 & l_r - M_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & l_r + 2M_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{so} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \\ I_{ro} \end{bmatrix}$$

On constate que :

- la transformation de Park rend les coefficients de la matrice des inductances indépendants du temps.
- le nombre de paramètres électromagnétiques se réduit à cinq qui sont :
  - $L_s = l_s - M_s$  : Inductances cycliques statorique.
  - $L_r = l_r - M_r$  : Inductances cycliques rotorique.
  - $M = 3M_{sr}/2$  : Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.
  - $L_{os} = l_s + 2M_s$  : l'inductance homopolaire statorique.
  - $L_{or} = l_r + 2M_r$  : l'inductance homopolaire rotorique.

Dans le cas où les sommes des courants statoriques des courants rotoriques sont nulles, les composantes d'indice (O) sont nulles.

Dans ces conditions de fonctionnement en mode non dégradé, les flux d'axes d et q sont simplement définis par les trois paramètres constants  $L_s$ ,  $L_r$  et  $M$  et reliés aux courants par la relation

$$(3.17) \quad \begin{bmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} \\ \varphi_{rd} \\ \varphi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix}$$

Les quatre sous matrices sont maintenant diagonales et ne dépendent plus de  $\theta$  (l'angle électrique entre le stator et le rotor).

**3.3.2 Équations de la machine biphasée équivalente :**

La substitution des enroulements fictifs  $S_d$  ,  $S_q$  ,  $R_d$  ,  $R_q$  aux enroulements triphasés permet, par interprétation de leur représentation à la figure 4 une écriture rapide de l'équation (3.17)

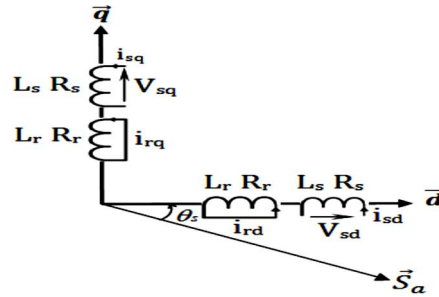


Figure 3.4 Représentation des enroulements fictifs d'axes d et q

Les équations de Park des tensions, statoriques et rotoriques s'écrivent :

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \phi_{sq} \frac{d\theta_s}{dt} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} - \phi_{sd} \frac{d\theta_s}{dt} \\ 0 = R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \phi_{rq} \frac{d\theta_r}{dt} \\ 0 = R_r i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} - \phi_{rd} \frac{d\theta_r}{dt} \end{cases} \quad (3.18)$$

Il existe trois possibilités de référentiels (système (d, q) associé de rotation) dans la pratique. Le choix se fait en fonction du problème étudié :

- ★ Référentiel fixe par rapport au stator : Il se traduit par la condition :  $\omega_a = 0$ .
- ★ Référentiel fixe par rapport au rotor : Il correspond aux transformations des grandeurs de la machine dans un référentiel tournant à la vitesse synchrone, c.-à-d. :  $\omega_a = \omega_r$ .
- ★ Référentiel fixe par rapport au champ tournant : La condition qui régit ce cas est:  $\omega_a = \omega_s$ .

**3.3.3 L'expression du couple électromagnétique et du couple mécanique :**

En posant:

$\omega_s = d\theta_s/dt$  la vitesse angulaire des axes d, q dans le repère statorique.

$\omega_r = d\theta_r/dt$  la vitesse angulaire des axes d, q dans le repère rotorique.

P : Nombre de pair de pole On déduit :

$$\omega_s - \omega_r = d\theta/dt = \omega = p\Omega \quad (3.19)$$

Cette relation cinétique interne montre que les vitesses angulaires des axes d, q respectivement dans les repères statorique et rotorique et liées rigidement à la vitesse angulaire du rotor  $\Omega$ .

**1) Équation du couple magnétique :**

$$C_e = (pL_m/L_r) (\phi_{rd}i_{sq} - \phi_{rq}i_{sd}) \quad (3.20)$$

**2) L'équation de la mécanique :**

L'équation du mouvement s'écrit :

$$(d\Omega/dt) + f\Omega = C_e - (3.21)$$

Avec :

J : moment d'inertie du rotor.

f : coefficient de frottement visqueux.

Cr : couple résistant de la charge.

### 3.4 Commande de la machine asynchrone : [9] [10]

On distingue deux types de commandes ; les commandes scalaires et les commandes vectorielles.

Commande scalaire	Commande vectorielle	Commande scalaire	Commande vectorielle
Basée sur le modèle régime permanent		Basée sur le modèle transitoire	
+ Simple à implanter		+ Précise et rapide	
- Dynamique lente		+ Contrôle du couple à l'arrêt	
		- Chère (encodeur incrémental ou estimateur de vitesse, DSP...)	

#### 3.4.1 Commande vectoriel :

La commande vectorielle a été introduite il y a longtemps. Cependant, elle n'a pu être implantée et utilisée réellement qu'avec les avancés en micro-électronique. En effet, elle nécessite des calculs de transformé de Park, évaluation de fonctions trigonométriques, désintégrations, des régulations ce qui ne pouvait pas se faire en pure analogique.

Le contrôle de la machine asynchrone requiert le contrôle du couple, de la vitesse ou même de la position. Le contrôle le plus primaire est celui des courants et donc du couple, puisque l'on a vu que le couple pouvait s'écrire directement en fonction des courants :

$C_e = pM(i_{qs}i_{dr} - i_{ds}i_{qr})$ . Il est évident que pour augmenter la vitesse, il faut imposer un couple positif, pour la diminuer il faut un couple négatif. Il apparaît alors clairement que la sortie du régulateur de vitesse doit être la consigne de couple. Ce couple de référence doit à son tour être imposé par l'application des courants ; c'est le rôle des régulateurs de courants.

#### 3.4.2 Commande scalaire :

Ils existent plusieurs commandes scalaires selon que l'on agit sur le courant ou sur la tension.

Elles dépendent surtout de la topologie de l'actionneur utilisé (onduleur de tension ou de courant). L'onduleur de tension étant maintenant le plus utilisé en petite et moyenne puissance, c'est la commande en V/f (V sur f) qui est la plus utilisée.



### 3.5 Conclusion :

La connaissance des éléments de construction de la machine asynchrone permet de trouver un modèle dédié à la simulation donnant ainsi une image approximative de l'état de la machine lors de ses régimes de fonctionnement (sain ou avec défaut).

La transformation de Park aide à obtenir par simulation des résultats dans le référentiel lié au stator. Ce modèle présente l'état normal de la machine asynchrone c'est-à-dire l'état sain.

En pratique, parfois la modélisation établie n'est pas suffisamment précise pour traduire fidèlement le comportement d'un système.

Mais suivant le but de la simulation (diagnostique, contrôle ou conception de la machine) les concepteurs ont recours aux modèles bien adéquats qui affectent généralement les dynamiques mal connues.

## CHAPITRE 4 TRAVAIL EXPERIMENTAL

### 4.1 Introduction:

Dans cette partie a porté sur une étude expérimentale menée sur le diagnostic et la détection de défaut mécanique (roulement et balourd) par la méthode 3D. Le banc expérimental réalisé dans le laboratoire C23 département d'électromécanique.

### 4.2 Méthode de représentation tridimensionnelle des courants statoriques (3D) :

Cette détection basée sur l'analyse des trois courants ( $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$ ). La plupart des méthodes employées pour identifier et classifier les défauts du moteur asynchrone défectueux sont basées sur l'analyse des courants statoriques. L'approche proposée emploie également l'analyse des courants statoriques, Cependant, dans cette méthodologie le problème est converti dans une analyse de reconnaissance des structures. Avec les conditions idéales pour le moteur asynchrone et une alimentation non équilibrée de tensions, les courants statoriques sont donnés par l'équation (4.1) [1][12].

$$\begin{cases} I_A = I_m \sin(\omega t - \varphi) \\ I_B = I_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \varphi) \\ I_C = I_m \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3} - \varphi) \end{cases} \quad (4.1)$$

$I_A$ ,  $I_B$ , and  $I_C$  :les courants statoriques des trois phases.

$I_m$  : la Valeur maximale du courant.

$\omega$ :Pulsation.

$\varphi$ : Angle de la phase.

$t$ : temps.

Dans l'approche proposée les courants sont identifiés en tant que modèles typiques pour chaque mode défectueux. Ceci est accompli en l'analysant dans un espace à trois dimensions. Pour un moteur sain, le modèle correspondant du courant est un cercle centré à l'origine des coordonnées [1].

$$R^2 = I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 \quad (4.2)$$

### 4.3 Description du banc d'essai:

Le banc expérimental réalisé comporte les éléments suivants :

- Moteur asynchrone à cage d'écureuil de 270 W.
- Un oscilloscope analogique numérique HAMEG507 lié par une sonde à un capteur de courant afin de traiter le signal du courant statorique d'une des trois phases. Cet oscilloscope possède les caractéristiques suivantes :
  - Echantillonnage temps réel 100MSa/s.

- Echantillonnage temps équivalent 2GSa/s.
- Interface RS232 pour la liaison avec le PC.
- 2 canaux, (0-50MHz), (1mV/div.-50V/div), 0,5s/div- 10ns/div).
- convertisseurs A/N Flash 8 bits.
- Un capteur de courant, avec un calibre de (0.01-10A) .
- Un micro-ordinateur.
- Les logiciels de traitement (*Logiciel d'acquisition de données et MATLAB*).

### 4.4 Méthodologie de l'expérience :

Un banc d'essai (fig4.1) a été nécessaire pour le diagnostic des défauts artificiels qu'on a fait subir successivement au moteur asynchrone à cage. Il est constitué essentiellement de deux moteurs identiques MAS<sub>1</sub> et MAS<sub>2</sub> entraînant un séparateur chacun et dont les caractéristiques sont données par le tableau1. La campagne d'essai s'est déroulée en trois étapes. A chaque étape, il a été procédé au captage et aux traitements des courants d'alimentation du moteur en fonctionnement. La première étape a concerné le moteur sain en service. Dans la deuxième étape, les essais ont été réalisés sur MAS<sub>2</sub> après avoir créé artificiellement d'un balourd par la fixation d'une masse de 90 grammes sur un disque solidaire à son bout d'arbre[1]. La troisième étape a consisté à la cassure volontaire de deux billes du roulement et la partie de la cage où logent ces dernières sur le roulement de la flasque arrière du moteur MAS<sub>1</sub>. L'acquisition des signaux pour le diagnostic a été faite par un oscilloscope HAMEG507 relié à un capteur de courant. Cet appareil permet l'acquisition du signal sur 8 bits avec une fréquence d'échantillonnage comprise entre 1 kHz et 2,5 MHz. La visualisation du signal sur l'écran du PC, se fait à l'aide du logiciel appelée *SP107 E*. Le courant statorique est acquis au moyen de la carte d'acquisition intégrée à l'oscilloscope. Le traitement des données est réalisé par le logiciel MATLAB à des fins d'analyse des signaux.[1]

## CHAPITRE 4 TRAVAIL EXPERIMENTAL

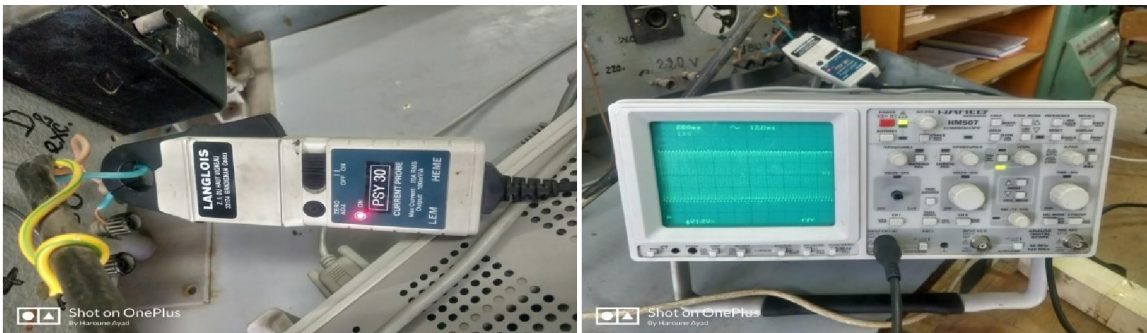
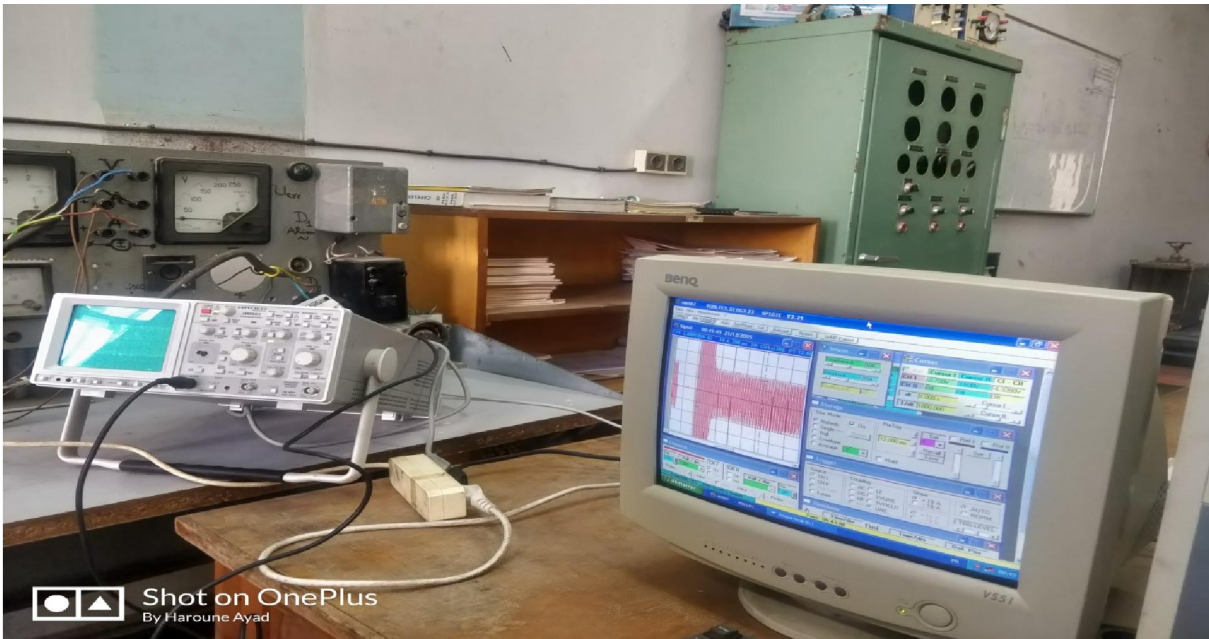


Figure 4.1 banc d'essai

MAS <sub>1</sub> et MAS <sub>2</sub>	
Puissance	270 w
Fréquence d'alimentation	50 HZ
Couplage du moteur	en étoile
Tension	220/380V
Courant	1,43 / 0,8A
Nombre de paires de pôles	2
Nombre de barres au	18

Description	Roulement
Type	6200
Nombre de billes	8
Diamètre moyen	40 mm
Diamètre de la bille	5 mm
Angle de contact	0°

Tableau 4-1 Caractéristiques du roulement

rotor	
Vitesse nominale	1400 trs/min

Tableau 4-2 Caractéristiques de MAS<sub>1</sub> et MAS<sub>2</sub>

## 4.5 Résultats ET Discussions :

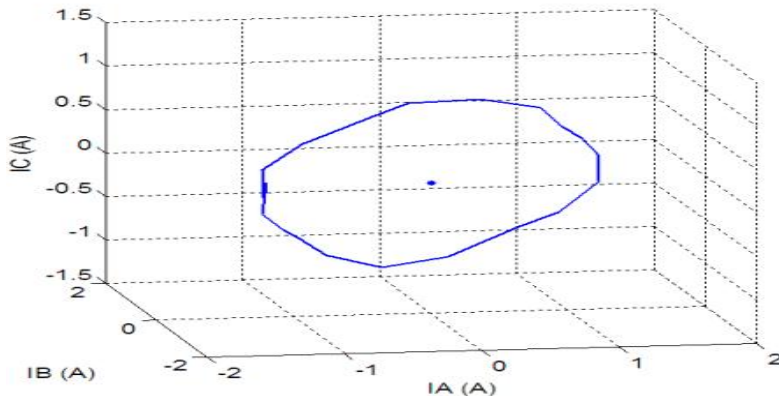


Figure 4.2 la machine saine [1]

La figure 4.2 expose le motif obtenu pour l'état sain du moteur. Il est à noter que l'orbite obtenue n'est pas parfaitement circulaire ; ceci est justifié par les imperfections de fabrication du moteur.

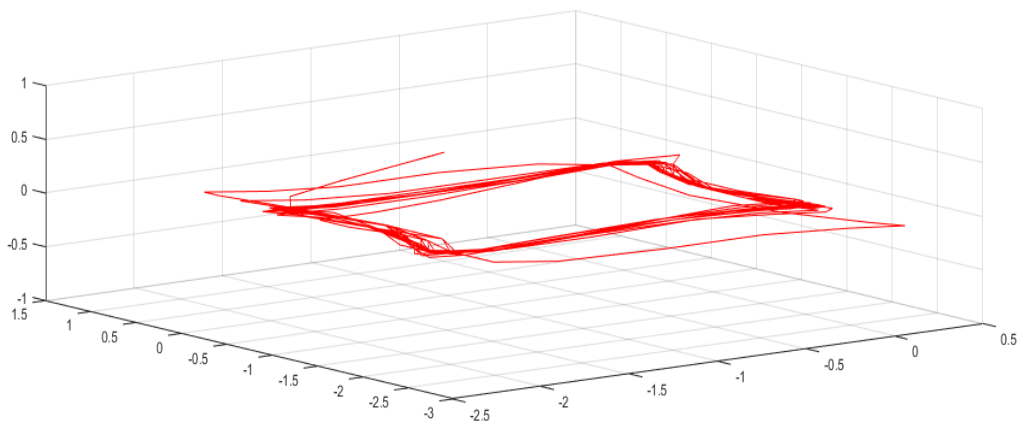
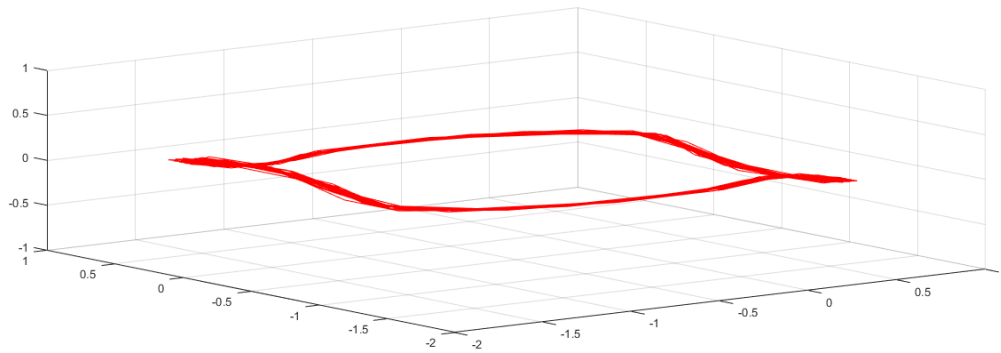


Figure 4.3 Défaut roulement

La figure 4.3 représente le motif traduisant la signature visuelle du défaut au niveau des billes du roulement. Suite à ce défaut mécanique une forme Semi-rectangulaire.



**Figure 4.4 Défaut balourd**

La figure 4.4 représente le motif obtenu suite au fonctionnement du moteur en présence du défaut mécanique de balourd où, l'orbite synonyme de cette défaillance n'est ni circulaire, ni ellipsoïdale. Son contour a la forme d'une hypocycloïde

### **4.6 Conclusion :**

Comparé au modeste diagnostic vibratoire traditionnel, le travail expérimental mené dans cette thèse innove par l'application simultanée de deux approches de diagnostic des défauts balourd et roulements séparément du moteur à induction et des mécanismes qui lui sont accouplés. La méthodologie est basée sur l'analyse des courants d'alimentation du moteur électrique associée aux motifs en 3D déduits de l'interprétation de la variation des carrés de leurs intensités. De par la simplicité de sa mise en œuvre matérielle et la facilité de son exploitation par des opérateurs pas forcément experts, cette technique peut s'imposer dans le milieu industriel. Cette méthodologie, exploitant la fusion d'approches des courants statoriques, permet de détecter des défauts mécaniques simples et multiples de façon fiable. Grâce à son lot d'informations, elle peut contribuer à apporter un plus pour la surveillance automatique en ligne des entraînements électriques.

## CONCLUSION GENERALE :

Le moteur asynchrone à cage de par son importance grandissante dans les entraînements électriques à vitesse constante ou variable occupe ces dernières décennies un intérêt particulier chez les chercheurs scientifiques et la communauté industrielle concernant la surveillance de son état de santé. La révolution dans la commande des moteurs asynchrones s'est aussi traduite malheureusement par l'apparition de nouvelles causes de pannes. En plus, des défauts traditionnels (électriques, mécaniques et thermiques) sont venus s'ajouter d'autres défauts (électronique, informatique,..). Ces défaillances peuvent avoir des conséquences destructrices immédiates, ce qui justifie soit leur diagnostic précoce, soit leur détection quasi instantanée suivi d'un arrêt paralysant immédiatement la production et entraînant une perte financière très importante.

Le but de ce travail était cibler deux défauts mécaniques (balourd et roulement),

La description mathématique ou modélisation de ces types de systèmes électromécaniques à l'état dégradé est complexe. Ceci nous a incités à contribuer en vue du diagnostic spécifique de la machine asynchrone par l'application des approches qui consistent à analyser les courants mesurés sur l'actionneur à l'état sain et défaillant en cours de fonctionnement.

Dans la partie expérimentale nous avons utilisé la représentation en 3D du courant statorique, en fonctionnement sain et en présence des défauts de balourds et du roulement.

Les approches de diagnostic précitées ont été validées expérimentalement par la création artificielle des défauts précités (balourd et roulement). Par une association de méthodes a été réalisé pour éclairer mieux cette méthodologie basée sur l'analyse de signaux réels et leurs traitements.

Comme perspective, Il s'agit d'une tentative de trouver des modèles analytiques de ces défauts mécaniques (balourd, roulement, etc.), afin de pouvoir les simuler numériquement et les comparer avec les résultats expérimentaux obtenus.

## BIBLIOGRAPHIE :

- [1] Thèse doctorat KERFALI SAMIR 2016 ‘‘ Contribution à la Surveillance et au Diagnostic des Défauts De la Machine Asynchrone’’
- [2] <https://bacmoteur.wordpress.com/>
- [3] Thèse doctorat Radouane BOUSSEKSOU 2012 ‘‘Modélisation analytique des machines Asynchrone application au diagnostic’’
- [4] Boubaker Kerchou & Bouskaya Ahmed , « Commande vectorielle du moteur asynchrone monophasé » ; Universite Larbi Ben M’hidi Oum El Bouaghi, 2010/2011.
- [5] thèse doctorat Gaetan didier 2004, ‘‘modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de defaillances’’
- [6] Hubert razik, gaëtan didier ‘‘notes de cours sur le diagnostic de la machine asynchrone’’
- [7] thèse doctorat Smail bachir19 92, ‘‘contribution au diagnostic de la machine asynchrone par estimation paramétrique’’
- [8] thèse doctorat Tarek Boumegoura, 2001’’recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d’observateurs en vue du diagnostic’’
- [9]Jean-Paul Louis, « Modélisation des machines électriques en vue de leur commande », édition LAVOISIER, 2004.
- [10] Y.MOREL ; « Le moteur asynchrone triphasé », <http://www.lepetitelectricien.com/2018/04>.
- [11] Etienne Gaucheron, « Les moteurs électriques » ; Cahier Technique Schneider Electric n° 207, édition juin 2004.
- [12] V. Fernao Pires a,c,\*, J.F. Martins b, A.J. Pires a,b ‘‘Eigenvector/eigenvalue analysis of a 3D current referential fault detection and diagnosis of an induction motor’’ Energy Conversion and Management 51 (2010) 901–907.