



Université de Ghardaïa

N° d'ordre :
N° de série :

Faculté des Sciences et Technologies
Département d'automatique et électromécanique

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Domaine : *Sciences et Technologies*

Filière : *Electromécanique*

Spécialité : *Maintenance Industriel*

Par : **REZZAG Djaber**

HAMEL Toufik

Thème

**Maintenance et Techniques de Diagnostic d'une Machine
Asynchrone**

Soutenu publiquement le 25/06/2019

Devant le jury :

SBAA Hadj Yahya	MCB	Université de Ghardaïa	Président
BOUCHELGA Fatma	MAB	Université de Ghardaïa	Examineur
AKERMI Fouzi	MAA	Université de Ghardaïa	Examineur
MEDOUKALI Hemza	MAB	Université de Ghardaïa	Encadreur

Année universitaire 2018/2019

Remerciement

Notre premier remerciement va à "**Allah** Soubhanahou wa-taala" de nous avoir donné le courage, la patience et la santé durant toutes ces années et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Mes vifs remerciements s'adressent à mon aimable encadreur Monsieur **MEDOUKALI Hemza** enseignant à l'université de **Ghardaïa** qui, par son expérience et son efficacité n'a ménagé aucun effort pour mener à bien ce travail.

Nous remercions également les membres de juré d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Notre profonde reconnaissance et nos respects les plus distingués à l'ensemble des enseignants de la faculté des Sciences et Technologies de l'université de Ghardaïa, qui ont assuré notre formation tout au long de nos années d'études.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis qui nous ont toujours soutenu et encouragé pour la réalisation de ce mémoire.

Dédicace

✿ *Je dédie cette mémoire ...* ✍

A ma très chère mère *kheira RECHACHE*
Tu es l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.

A mon cher père *Aboubakeur*
Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation.

A mon petit frère *Yasser*
A mes sœurs *Radia et Wassila.*

Dédicace spécial à *Meriem el-batoul.BH*
Je dédie aussi ce travail à toute ma famille, mes oncles, mes tantes, mes cousins et mes cousines.

A chers amis *Aouissi , Hamou , Mouaiz*
A tout mes amis que j'ai connu dans ma vie surtout les amis de promotion 2019

A mes enseignants de l'école primaire jusqu'à l'université dont les conseils précieux m'a guidée; qu'ils trouvent ici l'expression de ma reconnaissance.

Djaber REZZAG

Dédicace

✿ *Je dédie cette mémoire ...* ✍

*A ma très chère mère **Fatima HAMEL**
Tu es l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de
m'encourager et de prier pour moi. Puisse Dieu, le
tout puissant, te préserver et t'accorder santé,
longue vie et bonheur.*

*A mon chère père **Abdelkader**
Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et
nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce
travail est le fruit de tes sacrifices que tu as
consentis pour mon éducation et ma formation.*

A tous mes frères et ma famille

*Je dédie aussi ce travail à mes oncles, mes tantes,
mes cousins et mes cousines.*

*A chers amis **Abdelghani, Chikh, Ilyas, Yasser,**
A tout mes amis que j'ai connu dans ma vie surtout
les amis de promotion 2019*

*A mes enseignants de l'école primaire jusqu'à
l'université dont les conseils précieux m'a guidée;
qu'ils trouvent ici l'expression de ma
reconnaissance.*

Toufik HAMEL

SOMMAIRE

Remerciement	
Dédicaces	
Sommaire	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Notations	
Introduction générale	2

Chapitre I : Conception et défauts de la Machine asynchrone

I.1 Introduction	5
I.2 Historique	5
I.3 Définition	5
I.4 Généralité	5
I.5 Constitution du moteur asynchrone	6
I.5.1 Stator	6
I.5.2 Rotor (induit)	7
I.5.2.1 Rotor à cage d'écureuil	7
I.5.2.2 Rotor bobiné à bagues	8
I.5.3 Organes mécaniques	8
I.6 Principe de fonctionnement de M.A.S	9
I.7 Bilan De Puissance d'un Moteur Asynchrone	11
I.7.1 Rendement	11
I.8 Défaut de la machine asynchrone	11
I.8.1 Défauts mécaniques	12
I.8.1.1 Défauts d'excentricités	12
I.8.1.2 Défauts de roulements	13
I.8.1.3 Rupture de barres et d'anneaux	14
I.8.2 Défauts électriques	15
I.8.2.1 Défauts court-circuit	17
I.8.3 Défauts thermiques	17

I.9 Etude statistique	18
I.12 Conclusion	19

Chapitre II : Maintenance et diagnostic

II.1 Introduction	22
II.2 Maintenance	22
II.2.1 But de la maintenance	22
II.2.1.1 Fiabilité	23
II.2.1.2 Maintenabilité	24
II.2.1.3 Disponibilité	24
II.2.1.4 Sécurité	24
II.2.1.5 Qualité	24
II.2.2 Temps de la maintenance	24
II.2.3 Organigramme de la maintenance	25
II.2.3.1 Différentes formes de maintenance	25
II.2.4 Niveaux de maintenance	26
II.2.4.1 1 ^{ème} Niveau	27
II.2.4.2 2 ^{ème} Niveau	27
II.2.4.3 3 ^{ème} Niveau	27
II.2.4.4 4 ^{ème} Niveau	28
II.2.4.5 5 ^{ème} Niveau	28
II.2.5 Types de la maintenance	29
II.2.5.1 Maintenance préventive	29
II.2.5.2 Maintenance prévisionnelle	32
II.2.5.3 Maintenance corrective	32
II.2.6 Rôle de la maintenance	32
II.2.7 Opérations de maintenance	33
II.2.7.1 Opérations de maintenance corrective	33
II.2.7.2 Opérations de maintenance préventive	33
II.3 Qu'est-ce que le diagnostic ?	33
II.3.1 Définitions de diagnostic	34
II.3.2 Objectif du diagnostic	34
II.3.3 Différentes étapes de diagnostic	34
II.3.3.1 Détection	34
II.3.3.2 Localisation	35
II.3.3.2 Identification	35

II.3.4	Considération générales sur les systèmes de diagnostics	35
II.3.5	Surveillance	37
II.3.6	Défaut	38
II.3.6.1	Défaillance	38
II.3.2.2	Classification de la défaillance	38
II.4	Conclusion	39
Chapitre III : Techniques de diagnostic da la Machine asynchrone		
III.1	Introduction.....	41
III.2	Principe de diagnostic de défaut.....	41
III.2.1	Redondance physique (matérielle).....	41
III.2.2	Redondance analytique.....	41
III.3	Techniques de diagnostic.....	42
III.3.1	Approche signal.....	42
III.3.1.1	Analyse des grandeurs électriques mesurables.....	43
III.3.1.2	Surveillance des fluctuations de la vitesse.....	43
III.3.1.3	Surveillance du couple électromagnétique.....	43
III.3.1.4	Surveillance du champ magnétique.....	44
III.3.2	Approche système.....	44
III.4	Méthodes de diagnostic fréquemment utilisées.....	44
III.4.1	Méthodes de diagnostic des défauts basées sur l'analyse spectrale des signaux.....	44
III.4.1.1	Analyse fréquentielle du courant statorique.....	45
III.4.1.2	Analyse fréquentielle de la puissance instantanée :.....	46
III.4.1.3	Analyse fréquentielle de la tension du neutre :.....	48
III.4.1.4	Analyse des flux.....	49
III.4.1.5	Analyse du couple électromagnétique.....	50
III.4.1.6	Analyses vibratoires de la machine :.....	51
III.4.2	Diagnostic de défaut par l'estimation paramétrique.....	52
III.5	Conclusion.....	53

Chapitre IV : Modèle orienté au diagnostic des défauts de court-circuit

IV.1 Introduction.....	55
IV.2 Modèle triphasé-triphasé de la MAS en l'absence de défaut.....	55
IV.2.1 Présentation du modèle.....	55
IV.2.2. Equations électriques de la machine asynchrone.....	56
IV.2.3. Equations mécaniques de la machine.....	58
IV.2.4. Résultats de simulation d'un fonctionnement sain.....	58
IV.3 Modèle triphasé-triphasé de la MAS avec défauts statoriques de type court-circuit.....	60
IV.3.1 Résultats de simulation avec défaut de court-circuit.....	62
IV.3.2 Analyse spectrale du courant statorique.....	64
IV.4 Conclusion.....	67
Conclusion générale	69
Référence bibliographique	
Annexe	
Résumé	

LISTE DES FIGURES

Figure	Titre	Page
Chapitre I : Conception et défauts de la Machine asynchrone		
Figure I.1	Éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil	06
Figure I.2	Stator de la machine asynchrone	07
Figure I.3	Rotor à cage d'écureuil	08
Figure I.4	Rotor bobiné à bague	08
Figure I.5	Principe de fonctionnement de Machine asynchrone	09
Figure I.6	Arbre des puissances	11
Figure I.7	Représentation de l'excentricité statique et dynamique	13
Figure I.8	Dimension du roulement à bille	14
Figure I.9	Fissure entre barre et anneau	15
Figure I.10	Représentation des différents défauts statoriques possible	15
Figure I.11	Détérioration typiques d'isolation menant à des court-circuit dans les enroulements statorique de la machine asynchrone	16
Figure I.12	Défaut court-circuit statorique	17
Figure I.13	Répartition des défauts selon leur localisation.	18
Figure I.14	Répartition des défauts liés au stator	19
Chapitre II : Maintenance et diagnostic		
Figure II.1	Objectifs de la maintenance	23
Figure II.2	Temps de maintenance	24
Figure II.3	Organisation de maintenance	26
Figure II.4	Organisation de la maintenance conditionnelle	31
Figure II.5	Différentes étapes de diagnostic	35
Figure II.6	Surveillance d'un équipement	37
Figure II.7	Evolution du taux de défaillance en fonction du temps	39
Chapitre III : Mesures vibratoires sur la machine asynchrone		
Figure III.1	Redondance physique et analytique	42
Figure III.2.a	Spectre fréquentiel du courant statorique expérimental pour un rotor sain	45
Figure III.2.b	Spectre fréquentiel du courant statorique expérimental pour un rotor défaillant (une barre cassée)	46
Figure III.3.a	Spectre fréquentiel du courant statorique expérimental pour un rotor sain	47
Figure III.3.b	Spectre fréquentiel de la puissance instantané expérimental pour un rotor défaillant (une barre cassée)	48
Figure III.4.	Spectre de la tension du neutre dans la bande [100-200] (harm3) état sain	48
Figure III.5	Spectre de la tension du neutre dans la bande [100-200] (harm 3), 3 barres cassées	49
Figure III.6	Mesures vibratoires sur la machine asynchrone	52
Chapitre IV : Modèle orienté au diagnostic des défauts de court-		

Liste des figures

	circuit	
Figure IV.1	Représentation du modèle triphasé/triphasé	56
Figure IV.2	Résultats de simulation de la MAS démarrage à vide suivie d'une application de charge de $4 N.m$ à $t= 1s$	59
Figure IV.3	Court-circuit de spires sur la phase b du stator	61
Figure IV.4	Résultats de simulation de la MAS avec défaut de court-circuit « 10%, 20% et 30% de court-circuit »	64
Figure IV.5	Analyse spectrale du courant statorique dans l'état sain	65
Figure IV.6	Analyse spectrale du courant statorique cas d'un défaut de court-circuit « de 10% »	65
Figure IV.7	Analyse spectrale du courant statorique cas d'un défaut de court-circuit « de 20% »	66
Figure IV.8	Analyse spectrale du courant statorique cas d'un défaut de court-circuit « de 30% »	66

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Titre	Page
	Chapitre I : Conception et défauts de la Machine asynchrone	
Tableau I.1	Causes et conséquences de défauts mécaniques	12
Tableau I.2	Causes et conséquences de défauts électriques	16
Tableau I.3	Causes et conséquences de défauts thermiques	18
	Chapitre II : Maintenance et diagnostic	
Tableau II.1	Niveaux de maintenance	29
Tableau II.2	Avantages et inconvénients de la maintenance préventive systématique	30
Tableau II.3	Avantages et inconvénients de la maintenance préventive conditionnelle	30
Tableau II.4	Avantages et inconvénients de la maintenance corrective	32
Tableau II.5	Critères d'évaluations d'un Système de diagnostic	36
	Chapitre IV : Modèle orienté au diagnostic des défauts de court-circuit	
Tableau IV.1	Amplitudes des spectres	67

Notations

θ : Angle électrique entre le stator et le rotor

$[V_{sabc}]$, $[V_{rabc}]$: vecteurs des tensions statorique et rotoriques

$[I_{sabc}]$, $[I_{rabc}]$: vecteurs des courants statoriques et rotoriques

$[\varphi_{sabc}]$, $[\varphi_{rabc}]$: Vecteurs des flux statoriques et rotoriques

Ω : Vitesse angulaire mécanique du rotor

ω : Vitesse électrique de rotor

C_e : Couple électromagnétique

C_r : Couple mécanique résistant

C_f : Couple de frottement fluide

g : Glissement [sans unités]

J : Moment d'inertie des parties tournantes

M.A.S : Machine asynchrone

f : Fréquence d'alimentation (fréquence des courant statorique)

ω : Pulsation mécanique

n_s : Nombre de spires par phase

m_s : Inductance mutuelle entre deux phases du stator

m_r : Inductance mutuelle entre deux phases du rotor

R_s : Résistance statoriques

R_r : Résistance rotorique

$[R_s], [R_r]$: Matrices des résistances statoriques et rotoriques

L_s : Inductance propre d'une phase statorique

L_r : Inductance propre d'une phase rotorique

$[L_s], [L_r]$: Matrices des Inductances propres statoriques et rotoriques

M_{sr} : Inductance mutuelle maximale entre une phase du stator et la phase correspondante du rotor (leurs axes magnétiques sont alignés)

$[M_{sr}]$: Matrice des inductances mutuelles entre les phases du stator et du rotor

P : Nombre de paires de pôles

θ_{cc} : Angle électrique, repérant le bobinage en court-circuit par rapport à l'axe de référence de la phase a_s

n_{cc} : Rapport de court-circuit

B_{cc} : Bobinage de court-circuit dans la phase b_s

I_{cc} : Courant de court-circuit

R_{cc} : Résistance de court-circuit

L_{cc} : Inductance de court-circuit

φ_{cc} : Flux de court-circuit

$[M_{scc}]$: Mutuelle inductance entre les phases statoriques et la bobine en court-circuit

$[M_{rcc}]$: Mutuelle inductance entre les phases rotoriques et la bobine en court-circuit

n_{cc} : Nombre de spires en court-circuit

Introduction générale

Introduction générale

Actuellement, les machines asynchrones « MAS » sont considérées comme l'outil de conversion électromécanique le plus utilisé dans le milieu industriel. Cet engouement pour ce type de machine est justifié par sa simplicité de construction, son faible coût d'achat et sa robustesse mécanique.

Des applications de la machine asynchrone à vitesse variable, ont vu le jour dans divers domaines en débutant de la robotique et dans certains mécanismes industriels à haute précision. Toutefois, cette machine peut être affectée par des défauts potentiels qui se répercutent sur la sécurité de la production, la qualité du service et la rentabilité des installations. Par conséquent, il est très intéressant de développer des systèmes de diagnostic pour détecter de manière anticipée les défauts pouvant apparaître dans ce type de machines.

La surveillance d'un dispositif implique le diagnostic des défauts : il consiste en la détection d'un changement anormal dans le comportement ou l'état d'un système et dans la localisation de sa cause. Le but est de garantir la sécurité et la continuité de service et d'enregistrer les événements utiles pour la maintenance curative ou le retour d'expérience. C'est dans cette optique est orientée. Elle s'intéresse, en effet au développement des techniques et méthodes de diagnostic des défauts des machines asynchrones, en l'occurrence, les défauts de stator « court-circuit », du rotor « cassure de barres, excentricité, ... ».

À cela, notre travail est subdivisé en quatre chapitres distincts :

- Dans le premier chapitre, nous présenterons les éléments de construction de la machine à cage d'écureuil, leur principe de fonctionnement, les différents types de défauts qui peuvent apparaître souvent dans cette machine ainsi que leurs causes et leurs conséquences.
- Le deuxième chapitre sera consacré à la présentation de différentes formes de la maintenance, ainsi que les notions, et les étapes du diagnostic des défauts.
- Le troisième chapitre présente en premier lieu les deux approches des techniques de diagnostic. Puis, dans la deuxième partie nous décrivons les méthodes de diagnostic de la MAS les plus fréquemment utilisées sont décrites.

- Le dernier chapitre sera consacré à la présentation du modèle de simulation. Nous utiliserons le modèle triphasé-triphasé de la machine asynchrone triphasée à cage pour analyser le comportement de la machine en absence et en présence de défaillances.

Nous terminerons par une conclusion générale sur l'ensemble de cette étude.

Chapitre I :

Conception et défauts de la Machine asynchrone



I.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons l'état des différents origines (électriques, mécaniques,...) des défaillances qui peuvent se produire sur la machine asynchrone. On débute par un rappel sur la constitution de la machine asynchrone et ses principes de fonctionnement. Nous évoquerons essentiellement des défauts qui peuvent apparaître tant au stator qu'au rotor et l'enroulement de la machine.

I.2 Historique

La machine asynchrone, connue également sous le terme « anglo-saxon » de machine à induction, est une machine à courant alternatif sans connexion entre le stator et le rotor. Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de ces machines n'est pas forcément proportionnelle à la fréquence des courants qui la traversent. Son invention est attribuée à *Nikola* Tesla en 1887. En 1889 Michail Ossipowitsch Doliwo-Dobrowolski (ou Michael von Dolivo-Dobrowolski), électricien allemand d'origine russe, invente le premier moteur asynchrone à courant triphasé à cage d'écurie qui sera construit industriellement à partir de 1891.

On distingue deux types de la machine asynchrone :

- **Les machines d'induction** : une armature, le rotor ordinaire n'est pas alimenté. les courants qui y circulent sont induits par l'autre armature.
- **Les machines à collecteur** : l'armature tournante est reliée au réseau par un collecteur ce qui permet de prélever la puissance au moteur sans imposer la fréquence des courants dans celui-ci [1].

I.3 Définition

La machine asynchrone est un convertisseur électromécanique basée sur l'électromagnétisme permettant la conversion bidirectionnelle d'énergie entre une installation électrique parcourue par un courant électrique (ici alternatif) et un dispositif mécanique [2].

I.4 Généralités

Le moteur asynchrone couplé à un variateur de fréquence est de loin le type de moteur le plus utilisé pour les applications où il est nécessaire de contrôler la vitesse et le déplacement d'une charge.

Le système moteur-variateur convient bien pour des applications tels que les ascenseurs car on recherche une excellente précision à la fois au niveau de la vitesse (confort des utilisateurs) et de la précision de la position de la cabine par rapport aux paliers.

Quant au MAS seul, sa popularité résulte du peu d'entretien nécessaire, de la simplicité de construction, de sa standardisation et de sa robuste [3].

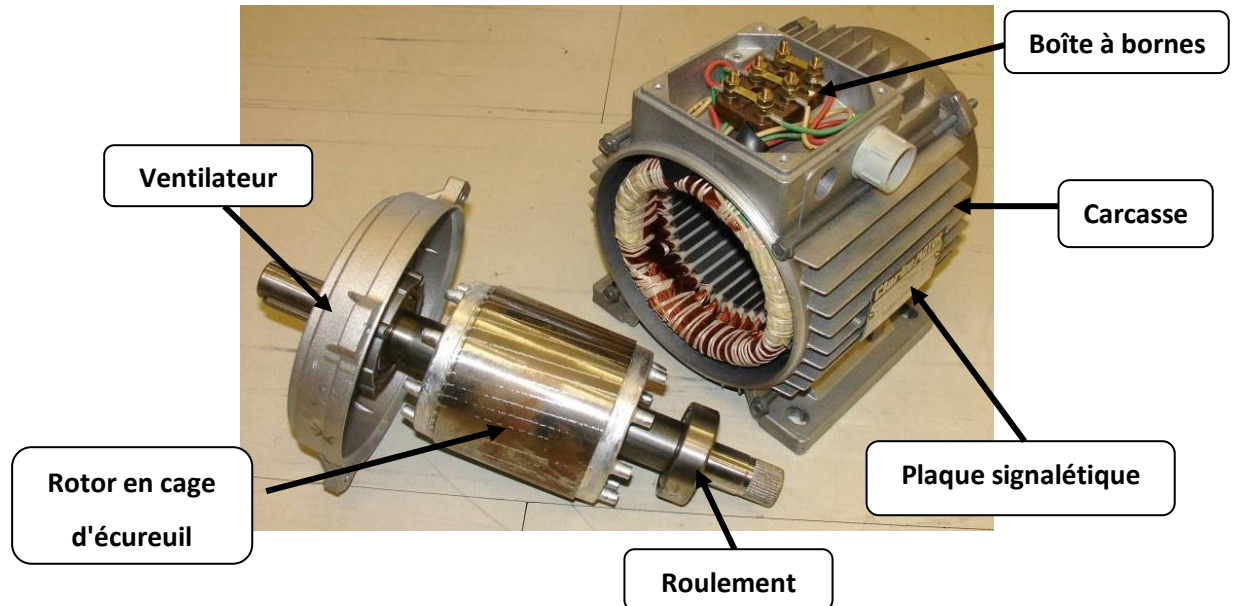


Figure I.1 : Éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil

I.5 Constitution du moteur asynchrone

Les machines asynchrones triphasées à cage d'écureuil sont composées, du point de vue mécanique, en trois parties : le stator, le rotor et les paliers.

I.5.1 Stator

C'est la partie fixe de la machine où est connectée l'alimentation électrique [4]. Le circuit magnétique est un empilement de tôles fines d'acier découpées, faisant apparaître les différentes encoches statoriques. On utilise des tôles minces dont l'épaisseur varie entre (0.35 et 0.5) mm pour minimiser les pertes dans le circuit magnétique. De plus, afin de limiter l'effet des courants de Foucault, on isole habituellement les tôles d'une mince couche de vernis ou de silicate de soude. Le bobinage statorique est constitué de deux parties (Figure I.2) : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines. Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en

organisant leur circulation, l'objectif étant d'obtenir une répartition des forces magnétomotrices et du flux la plus sinusoïdale possible dans l'entrefer, pour limiter les oscillations du couple électromagnétique.

Physiquement, on peut effectuer les bobinages statoriques de plusieurs façons, mais on utilise habituellement trois types d'enroulements : l'enroulement imbriqué, l'enroulement concentrique et l'enroulement ondule. Chaque type présente des avantages dans certaines applications. Pour les petits moteurs, et particulièrement lorsque la réalisation du bobinage est mécanisée, on utilise généralement l'enroulement concentrique [1].

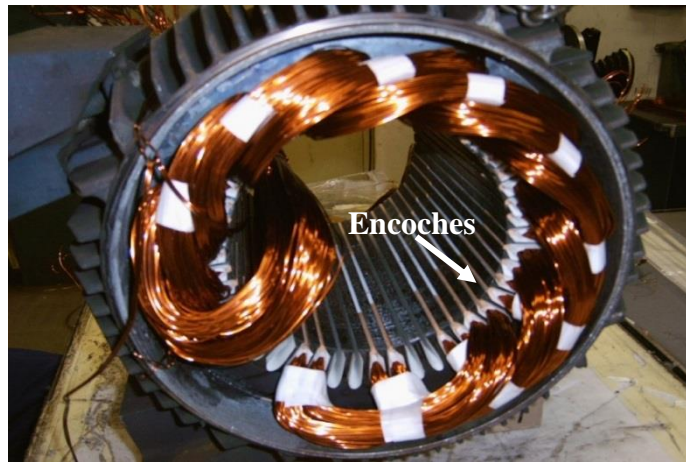


Figure I.2 : Stator de la machine asynchrone

I.5.2 Rotor (induit)

C'est la partie tournante qui permet de mettre en rotation la charge mécanique. Les rotors de machines asynchrones peuvent être de deux types : bobinés ou à cage d'écureuil, cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique analogue à celui du moteur à rotor bobiné [4].

I.5.2.1 Rotor à cage d'écureuil

Il est constitué de barres métalliques identiques dont les extrémités sont réunies entre elles par des couronnes métalliques peu résistantes. L'ensemble présente une résistance électrique très faible, on dit que le rotor est en court-circuit (Figure I.3) [5]. Les barres sont faites en cuivre, en bronze ou en aluminium suivant les caractéristiques mécaniques et électriques recherchées par le constructeur [1].

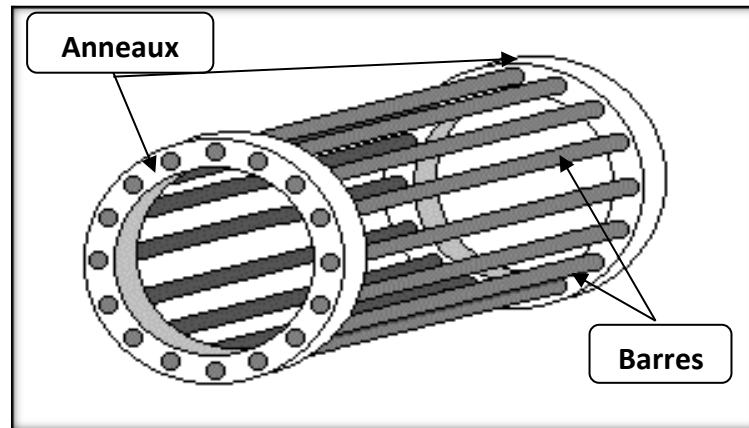


Figure I.3 : Rotor à cage d'écureuil

I.5.2.2 Rotor bobiné à bagues

Le rotor bobiné comprend un bobinage triphasé, semblable à celui du stator, placé dans les encoches. Il est composé de trois enroulements raccordés en étoile ; l'extrémité libre de chaque enroulement est reliée à une bague tournant avec l'arbre.

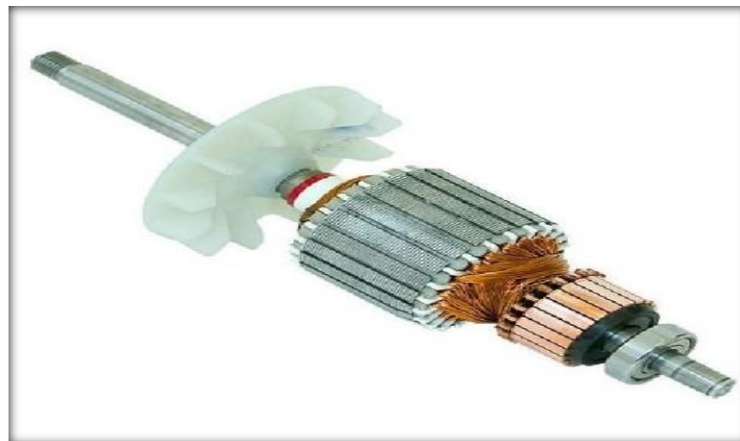


Figure I.4 : Rotor bobiné à bague

Ces bagues permettent, par l'intermédiaire de trois balais, d'insérer une résistance extérieure en série avec chacun des trois enroulements lors du démarrage du moteur. En fonctionnement normal, les trois balais sont court-circuités [6].

I.5.3 Organes mécaniques

La carcasse sert de support, elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur.

L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur lequel est fixé un demi-accouplement.

Il est généralement constitué en acier moulé ou forgé. Son dimensionnement est en fonction des efforts de flexion (force centrifuge qui s'exerce sur lui, attraction magnétique radiale, etc...), des efforts radiaux et tangentiels dus aux forces centrifuges, des efforts de torsion (couple électromagnétique transmis en régime permanent, transitoire). Il est supporté par un ou plusieurs paliers. Ces paliers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation. Le second palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre. Une isolation électrique de l'un des paliers assure l'élimination des courants dans l'arbre dûs aux dissymétries des réluctances du circuit magnétique. Ils sont généralement à roulements pour les machines de petite et moyenne puissance [4].

I.6 Principe de fonctionnement de Machine asynchrone :

Le principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone est basé :

- D'une part sur la création d'un courant électrique induit dans un conducteur placé dans un champ magnétique tournant. Le conducteur en question est l'un des barreaux de la cage d'écurieul ci-dessous constituant le rotor du moteur. L'induction du courant ne peut se faire que si le conducteur est en court-circuit (c'est le cas puisque les deux bagues latérales relient tous les barreaux).
- D'autre part, sur la création d'une force motrice sur le conducteur considéré (parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique tournant ou variable) dont le sens est donné par la règle des trois doigts de la main droite.

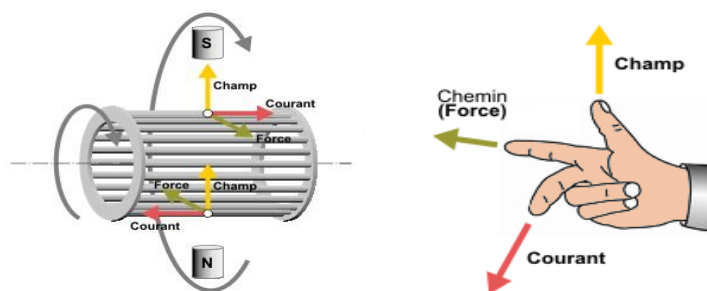


Figure I.5 : Principe de fonctionnement de M.A.S

Comme c'est démontré sur le schéma ci-dessus, le champ tournant, à un instant donné, est orienté vers le haut. En considérant deux conducteurs diamétralement opposés, on constate que les courants induits dans ces deux conducteurs sont en sens inverse et, associés au champ magnétique, créent des forces motrices en sens inverse. Le rotor étant libre de tourner sur

l'axe X-Y, les deux forces s'associent pour imprimer aux deux conducteurs un couple permettant la rotation de la cage d'écureuil : le moteur électrique est inventé.

Pour entretenir la rotation du moteur, il est nécessaire de faire varier soit le courant dans les conducteurs de la cage, soit le champ magnétique. Dans un moteur asynchrone, c'est le champ magnétique qui varie sous forme de champ tournant créé dans le stator.

Au démarrage le champ tournant balaye les conducteurs de son flux à la vitesse angulaire de synchronisme. Le rotor mis en rotation tend à rattraper le champ tournant. Pour qu'il y ait un couple entretenu au niveau des conducteurs, la variation de flux doit être présente en permanence, ce qui signifie que si les conducteurs tournent à la vitesse de synchronisme comme le champ tournant, la variation de flux sur les conducteurs devient nulle et le couple moteur disparaît. Un rotor de moteur asynchrone ne tourne donc jamais à la vitesse de synchronisme (50 Hz). Pour un moteur à une paire de pôles (à 50 Hz, la vitesse de rotation du champ tournant est de 3 000 [tr/min]) la vitesse de rotation du rotor peut être de 2 950 [tr/min] par exemple : intervient ici la notion de glissement [3].

La vitesse de synchronisme est la vitesse de rotation du champ tournant :

$$N_s = \frac{f}{p} \quad \text{et} \quad \Omega_s = \frac{W}{P} = \frac{2\pi f}{p} \quad (\text{I.1})$$

Le glissement mesure l'écart relatif entre la vitesse de rotation de la machine et la vitesse de synchronisme :

$$g = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (\text{I.2})$$

Avec :

g : Le glissement

n_s : La fréquence de rotation de synchronisme [tr/s]

n : La fréquence de rotation [tr/s]

On en déduit que : $n = n_s \cdot (1 - g)$

La vitesse de synchronisme des moteurs asynchrones triphasés est proportionnelle à la fréquence du courant d'alimentation et inversement proportionnelle au nombre de paires de pôles constituant le stator. Par exemple :

$$N_s = 60 \frac{f}{p} \quad (\text{I.3})$$

Avec :

- N_s : vitesse de synchronisme en [tr/min],
- f : fréquence en [Hz],
- p : nombre de paires de pôles.

I.7 Bilan De Puissance d'un Moteur Asynchrone :

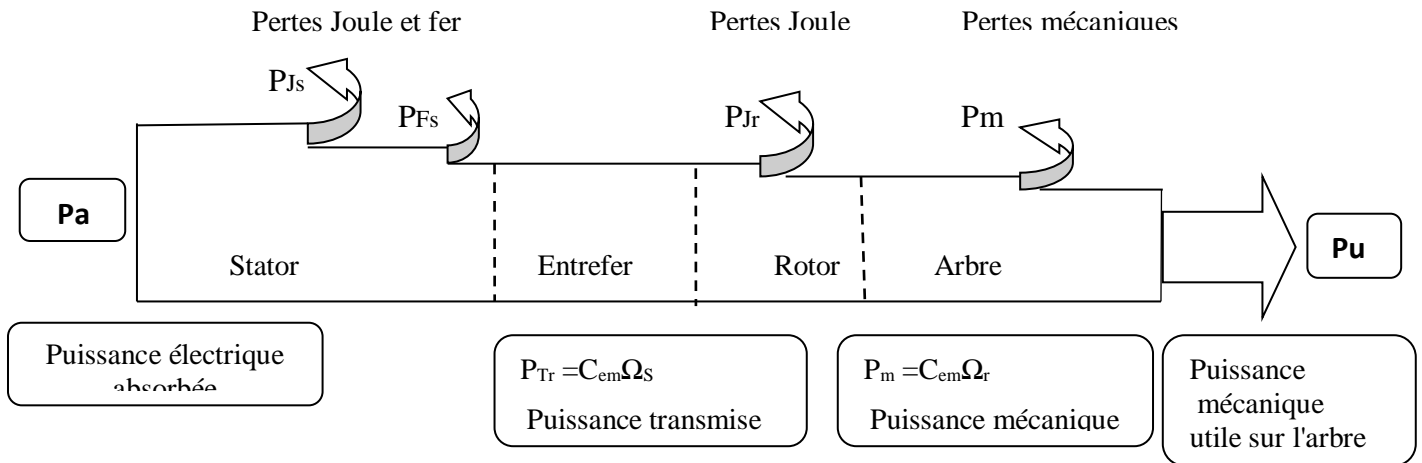


Figure I.6 Arbre des puissances

I.7.1 Rendement :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_a - (p_{Js} + p_{Fs} + p_{Jr} + p_m)}{P_a} = \frac{(P_a - p_{Fs} - p_{Js})(1 - g) - p_m}{P_a} \quad (I.4)$$

I.8 Défauts de la machine asynchrone

La machine asynchrone à cage d'écurieil peut parfois présenter différents types de défauts. Ces défauts peuvent être soit d'origine électrique ; mécanique ou thermique. Mais on peut classer les causes des défauts en trois groupes :

- les *initiateurs* de défauts : surchauffe du moteur, usures des éléments mécaniques (roulements à billes), rupture de fixations, problème d'isolation électrique, surtension transitoire...
- les *contributeurs* aux défauts : surcharge fréquente, température ambiante élevée, ventilation défaillante, humidité, fortes vibrations, vieillissement...
- les *défauts sous-jacents* et *erreurs humaines* : défauts de fabrication, composants défectueux, protections inadaptées, absence de maintenance...

I.8.1 Défauts mécaniques

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

Nous énumérons, dans la suite du document, certains de ces défauts sans pour autant en donner les détails. Nous pouvons trouver dans la littérature des ouvrages très complets qui traitent ces divers problèmes [4].

Dans le tableau ci-dessous nous allons en mentionnant quelques des causes les plus importantes des défauts mécaniques et des leurs conséquences.

Tableau I.1 les causes et conséquences de défauts mécaniques.

Causes	Conséquences
<ul style="list-style-type: none"> • Fatigue mécanique (vibrations, mauvais montage mécanique) ; • Corrosion, problème de lubrification ; • Stator ovale ; • Excentricité (statique) du rotor, jeux excessifs ; • Flexion (déformation) du rotor ; • Vitesse critique ; • Résonance avec la commande de vitesse ; • Défaut roulement. 	<ul style="list-style-type: none"> • Billes cassées, bague interne ou externe fêlée ; • Cage endommagée ; • Entrefer irrégulier ; • Entrefer variable avec la rotation ; • Fluctuations au niveau du couple et de la vitesse ;

I.8.1.1 Défauts d'excentricités

Les défauts mécaniques se manifestent généralement au niveau de l'entrefer par des défauts d'excentricité statique, dynamique ou mixte. L'excentricité de la machine est le résultat d'uniformité d'entrefer. Ce défaut peut être la cause d'une flexion de l'arbre, d'un mauvais positionnement du rotor par rapport au stator, de l'usure du roulement ou encore d'un déplacement du noyau statorique (voir figure (I.7)).

Il est pourtant bon de préciser que les défauts d'excentricité sont inévitables étant donné qu'il existe avant même le fonctionnement de la machine, soit, lors de sa construction trois catégories d'excentricité sont généralement distinguées [13,14]

- L'excentricité statique (figure (I.7)) généralement due à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator. La cause principale c'est un défaut de centrage des flasques.
- L'excentricité dynamique (Figure (I.7)) correspond, elle à un centre de rotation du rotor différent du centre géométrique du stator, mais, de plus, le centre du rotor tourne autour du centre géométrique de ce stator [15]. Ce type d'excentricité est causé par une déformation du cylindre rotorique, une déformation du cylindre statorique ou la détérioration des roulements à billes.
- L'excentricité mixte est la somme des deux cas présentés ci-avant.



Figure I.7 Représentation de l'excentricité statique et dynamique

I.8.1.2 Défauts de roulements

Les roulements se composent généralement de deux bagues, une bague intérieure et une autre extérieure entre lesquelles existe un ensemble de billes ou de rouleaux tournants (figure (I-8)). En fonctionnement normal, la défaillance due à la fatigue commence par de petites fissures situées au-dessous des surfaces du chemin de roulement et de l'élément roulant, qui se propage graduellement sur la surface. Les défauts de roulements entraînent une augmentation du niveau sonore et l'apparition de vibrations dans le couple de charge de la machine. Ces défauts ont des causes multiples telles que la contamination du lubrifiant, une charge excessive ou encore des causes électriques comme la circulation des courants de fuites induits par les onduleurs.

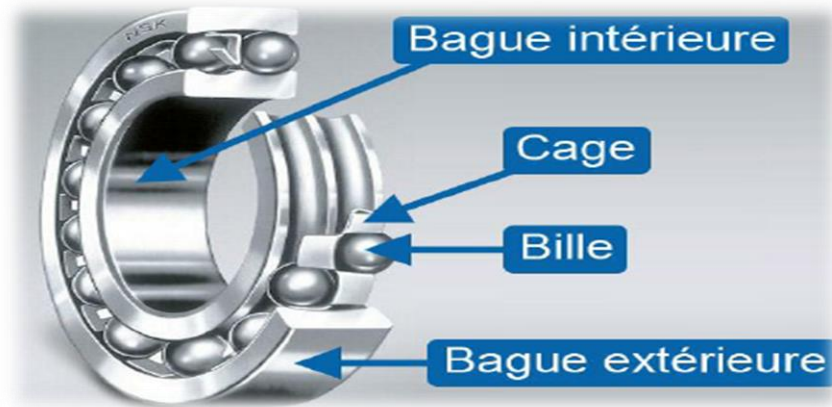


Figure I.8 Dimension du roulement à bille

I.8.1.3 Rupture de barres et d'anneaux

La cage étant composée de barres et d'anneaux de court-circuit d'aluminium ou de cuivre, une rupture partielle ou totale d'un de ces composants peut être considérée comme un défaut électrique rotorique. L'apparition de ce type de défaut peut être d'origine diverse. En effet, la rupture d'une barre ou d'un segment d'anneau de court-circuit peut être due à plusieurs causes qui sont souvent indépendants les uns des autres.

Parmi ceux-ci, Nous pouvons citer par exemple une mauvaise utilisation de la machine asynchrone (charge trop importante) ou encore l'environnement hostile dans lequel elle fonctionne. Parmi les causes premières, nous pouvons énumérer :

- les forces électromagnétiques et les vibrations mécaniques excessives.
- les démarrages trop fréquents induisant des courants élevés dans les barres ou dans les segments d'anneaux.
- la soudure qui relie les barres avec les deux anneaux de court-circuit, généralement provoque une fragilité de la cage d'écureuil dans ces endroits.

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 barres croît rapidement avec le nombre de barres cassées.

- 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 barre.

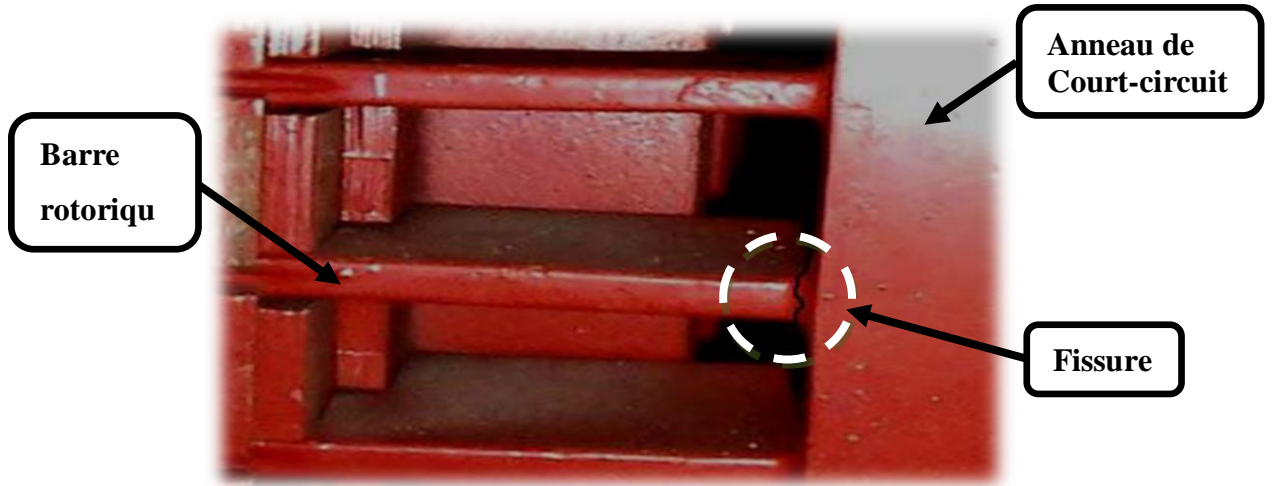


Figure I.9 Fissure entre barre et anneau

I.8.2 Défauts électriques

Les défauts d'origine électrique peuvent, dans certain cas, est la cause d'un arrêt de la machine (au même titre que les défauts d'ordre mécanique). Ces défaillances distinguent en deux catégories bien distinctes. Nous pouvons citer les défauts qui apparaissent au niveau des circuits électriques statoriques et celles qui apparaissent au niveau des circuits électriques rotoriques [4].

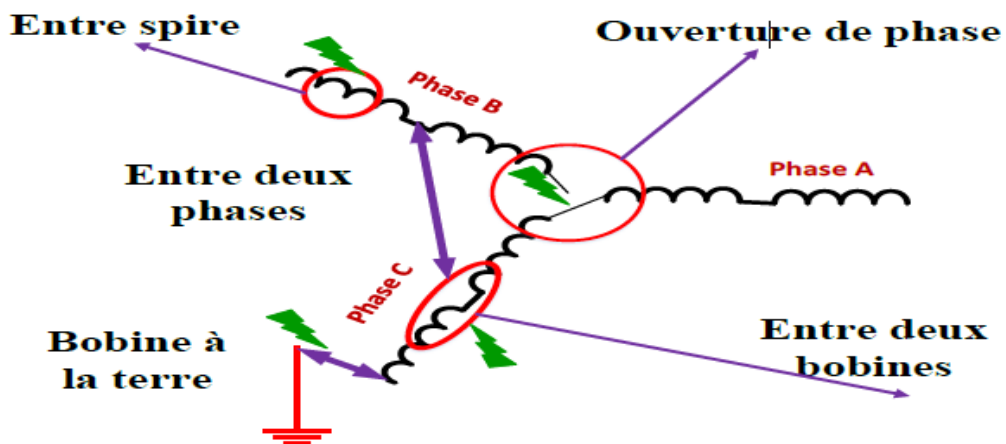


Figure 1.10 Représentation des différents défauts statoriques

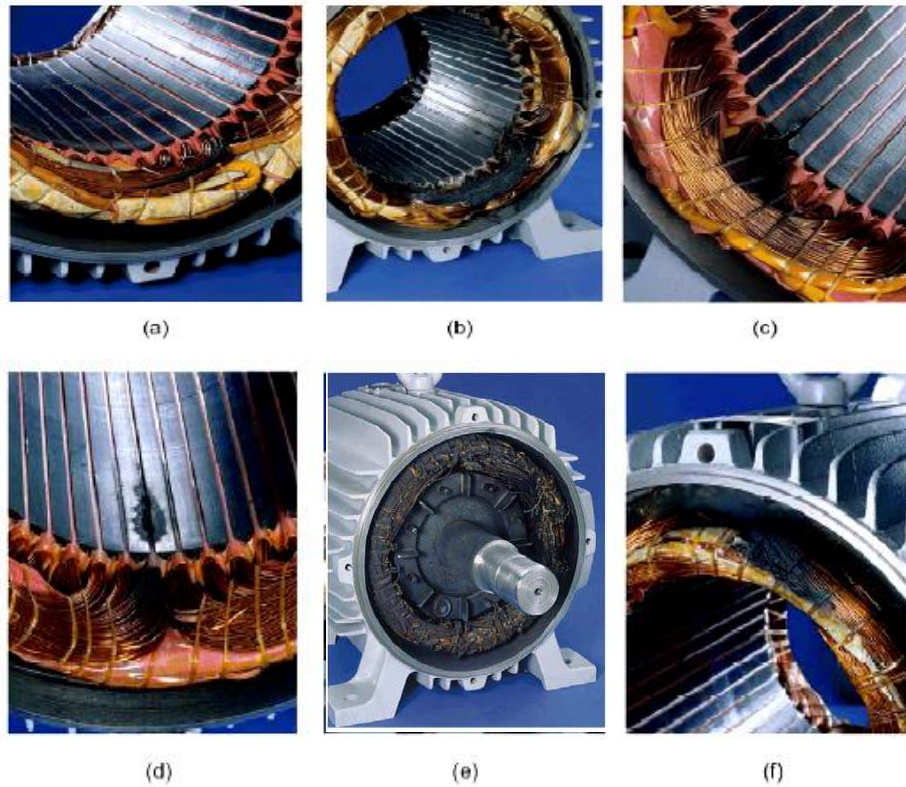


Figure I-11 détérioration typiques d'isolation menant à des courts-circuits dans les enroulements statorique de la machine asynchrone : (a) court-circuit entre de la même phase. (b) Enroulement court-circuité. (c) court-circuit entre l'enroulement et le noyau statorique à l'extrémité de l'encoche statorique. (d) court-circuit entre l'enroulement et le noyau statorique au centre de l'encoche statorique. (e) court-circuit dans une phase due au rotor bloqué. (f) court-circuit entre phases.

Tableau I.2 les causes et conséquences de défauts électriques

Causes	Conséquences
<ul style="list-style-type: none"> • Vieillessement des isolants (influence de la température) ; Défauts de fabrication ; • Contraintes thermiques (dilatation) ; • Mauvaise connexion des têtes d'enroulements, décharges électriques ; • Tensions et transitoires d'alimentation, inverseurs, air de refroidissement ; • Mauvais courant de charge, surcharges, humidité. 	<ul style="list-style-type: none"> • Court-circuités (francs ou non) entre spires, entre phases ou entre phase et carcasse ; • Phase ouverte ; • Barre cassée ou dessoudée de l'anneau de court-circuit ; • Déséquilibre au niveau de la tension et du courant de ligne ; • Créé des pertes de production.

I.8.2.1 Défauts court-circuit

Le court-circuit entre spires de la même phase est un défaut fréquent qui peut apparaître soit au niveau des têtes de bobines soit dans les encoches, ce qui entraîne une diminution du nombre de spires effectives de l'enroulement, d'autre part, il entraîne aussi une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases et dans le cas des machines asynchrones, il amplifie les courants dans le circuit rotorique .

La contrainte thermique amenée par le courant de court-circuit risque d'entraîner la propagation du défaut à d'autres spires, ce qui peut conduire au déclenchement des protections électriques dans l'alimentation.

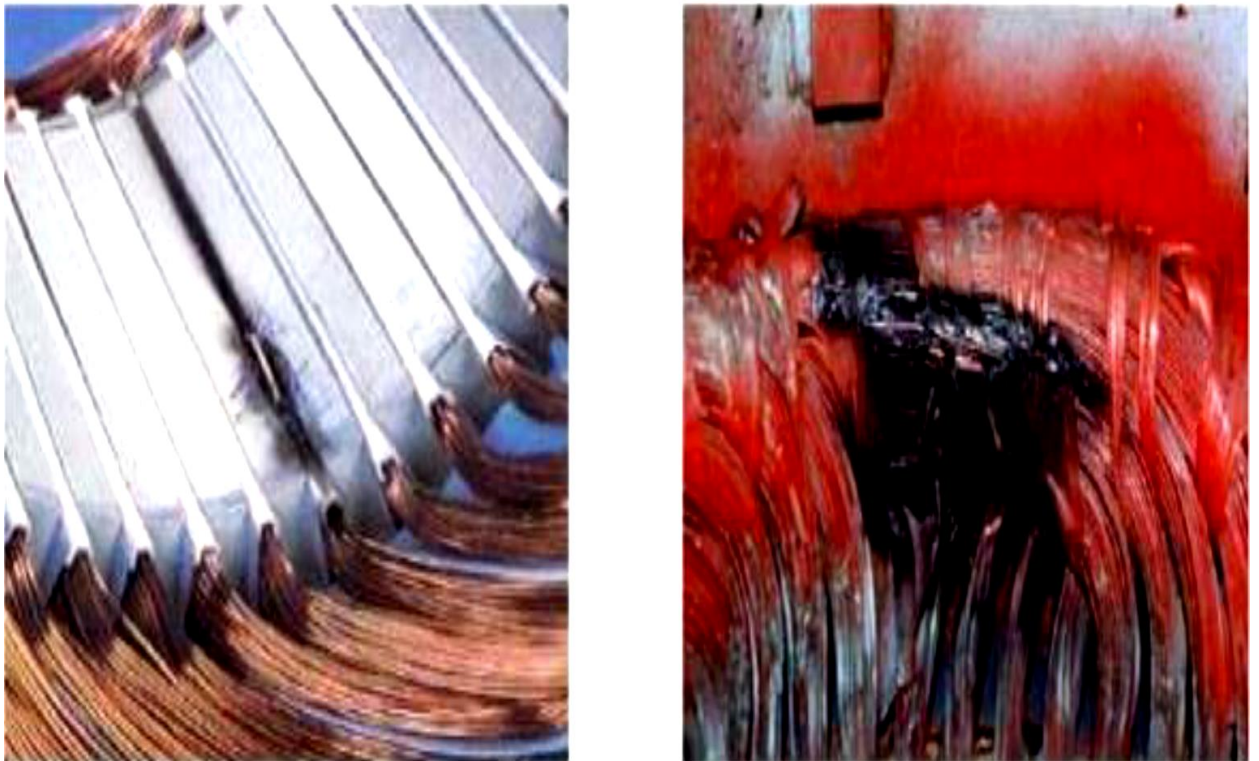


Figure I.12 Défaut court-circuit statorique

I.8.3 Défauts thermiques

Les défauts thermiques sont des défauts très importants parce que lorsque un défaut thermique temporaire ou réversible peut induire des défauts permanents et non réversibles par vieillissement accéléré des isolants ou dilatation mécanique [4].

Tableau I.3 les causes et conséquences de défauts thermiques.

Causes	Conséquences
<ul style="list-style-type: none"> • Sources de chaleur imprévue ; • Température ambiante excessive ; • Obstruction des ouïes d'aération ; • Auto ou moto-ventilation déficiente ; • Epuisement de la durée de vie du moteur. 	<ul style="list-style-type: none"> • Surchauffe des machines ; • Augmentations des arrêts non programmés.

I.9 Etude statistique

A la fin de ce chapitre nous avons présentés une étude statistique des différents défauts pouvant intervenir dans une machine électrique. Citons comme exemples :

[05] où la répartition a été faite comme suit :

40 à 50% pour les défauts de roulements

30 à 40% pour les défauts statoriques

5 à 10% pour les défauts rotoriques

Le reste pour les autres défauts

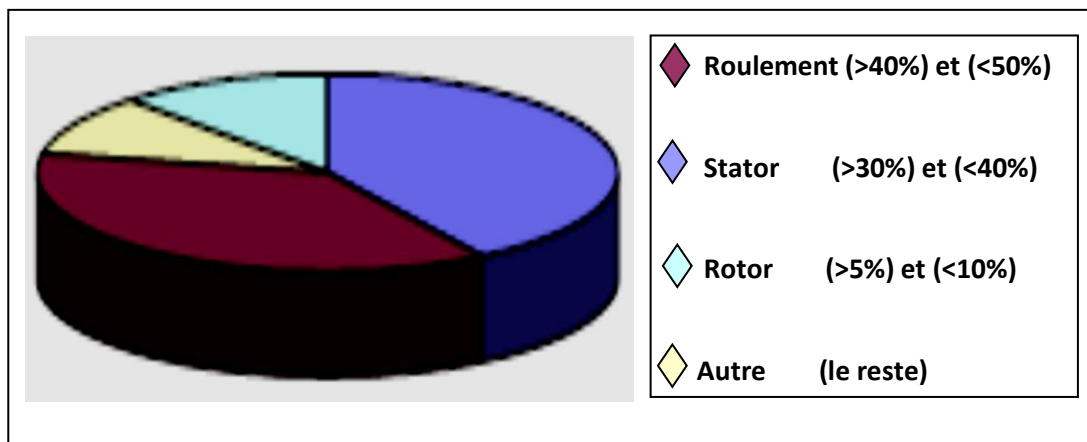


Figure I.13 Répartition des défauts selon leur localisation

[06] où l'étude statistique a été faite sur des machines de grande puissance (de 100KW à 1MW) et qui a donné les résultats suivants :

51%	Enroulements statoriques
22%	Défauts au rotor
9%	Tôlerie stator
8%	Roulements
10%	Autres

[7] où il a fait une répartition plus consacrée aux défauts statoriques :

(61%) pour les défauts d'isolement par rapport à la terre, (11%) pour l'isolement entre tous, (8%) pour les défauts de braçage, (3%) pour les défauts de cale, (3%) pour les défauts de structures, (3%) pour les défauts des circuits magnétiques et (11%) pour les autres défauts.

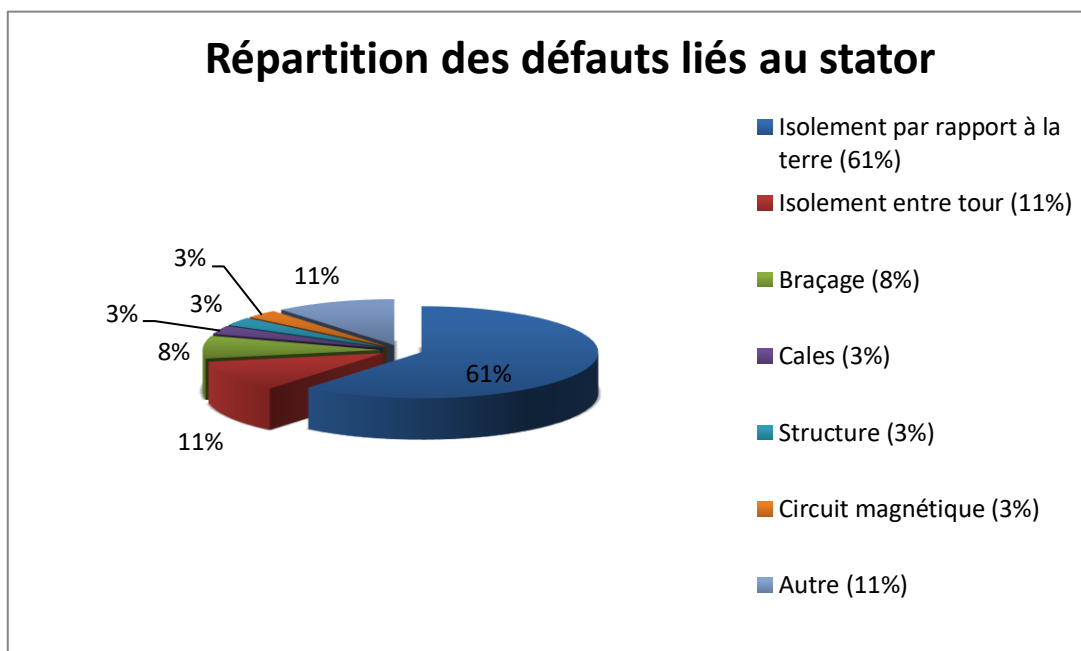


Figure I.14 Répartition des défauts liés au stator [7]

I.10 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons rappelé les éléments constructifs de la machine asynchrone à cage d'écureuil, des études statistiques ont été présentées pour illustrer l'impact de ces défauts dans le domaine industriel. Nous avons également décrit la majorité des défauts qui peuvent apparaître sur le comportement de la machine avec leurs causes et leurs conséquences.

La connaissance des éléments de construction de la machine asynchrone à cage permet d'implanter des modèles de simulation qui permet de donner une image approximative de l'état de la machine lors de ses régimes de fonctionnement.

Après la présentation des différents défauts qui peuvent apparaître dans la machine asynchrone nous avons présenté quelques techniques de diagnostic des défauts appliqué à la machine asynchrone dans le troisième chapitre.

Chapitre II :

Maintenance et diagnostic

II.1 Introduction

Ce chapitre apporte d'une part ; une description de la fonction maintenance, ses différentes formes et ses différents niveaux qui nous permettra une compréhension exhaustive de ce concept. Une d'autre part ; cette partie est indiquée la notion, l'objectif et les différentes étapes de diagnostic. Des définitions et terminologies utilisées dans ce domaine sont notées.

II.2 Maintenance

La maintenance c'est un ensemble des activités destinées à maintenir, à rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise [7].

II.2.1 But de la maintenance

Les objectifs de la maintenance peuvent être classés en deux types :

1. Objectifs financiers

- Réduire au minimum les dépenses de maintenance ;
- Assurer le service de maintenance dans les limites d'un budget.

2. Objectifs opérationnels

- Maintenir l'équipement dans les meilleures conditions possibles ;
- Assurer la disponibilité maximale de l'équipement à un prix minimum ;
- Augmenter la durée de vie des équipements ;
- Entretenir les installations avec le minimum d'économie et les remplacer à des périodes prédéterminées ;
- Assurer un fonctionnement sûr et efficace à tout moment [8].

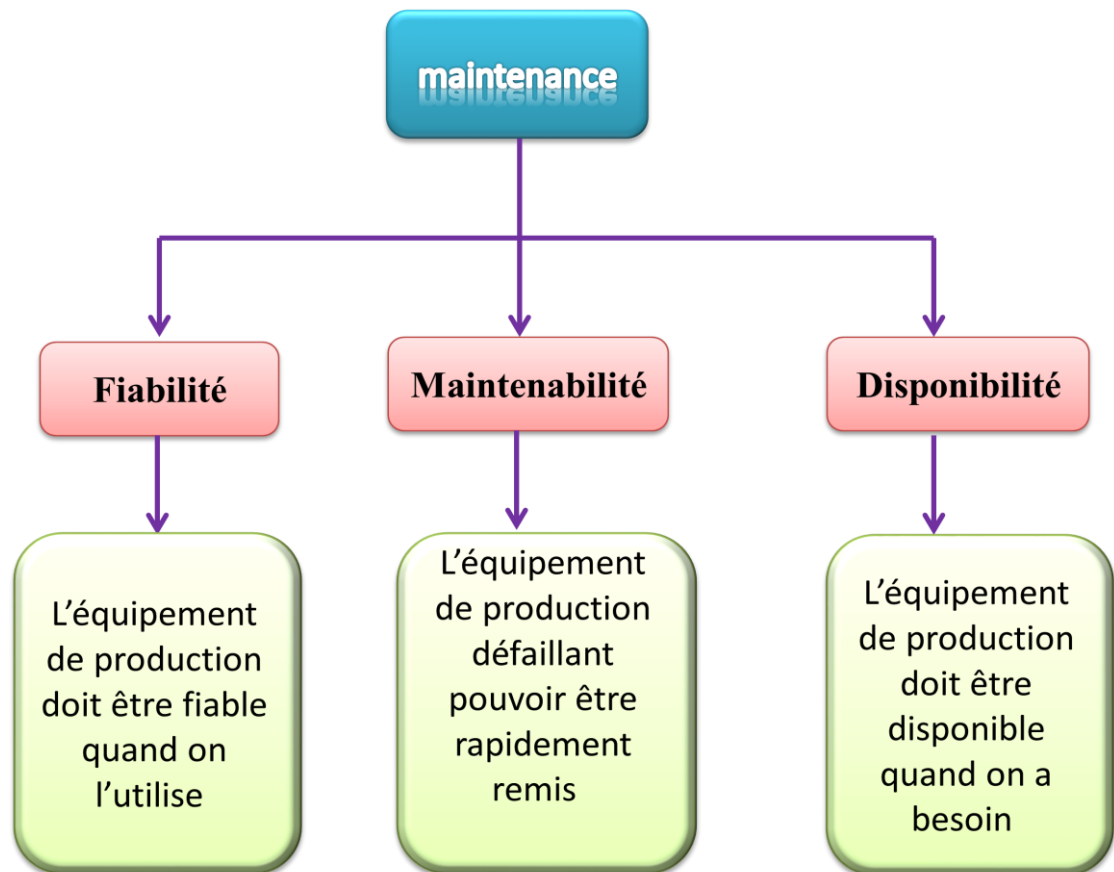


Figure II.1 Objectifs de la maintenance

II.2.1.1 Fiabilité

a- Définition

La fiabilité est une caractéristique d'un système mesurée par la probabilité qu'il accomplisse les fonctions requises dans des conditions données pendant une durée spécifiée. Elle est donc concernée par un fonctionnement sans défaillance du système pendant une durée donnée et elle est caractérisée par la fonction de répartition $R(t)$ des durées jusqu'à défaillance (fonction fiabilité).

b- Types de fiabilité

- Fiabilité opérationnelle : elle est obtenue après une durée de fonctionnement d'un dispositif et par suite de défaillances potentielles.
- Fiabilité prévisionnelle : Fiabilité estimée avant le fonctionnement d'un dispositif, de façon théorique (banques de données, calculs de durée de vie) ou de façon expérimentale (essais).

II.2.1.2 Maintenabilité

Dans les conditions d'utilisation données pour lesquelles il a été conçu, la maintenabilité est l'aptitude d'un bien à être maintenu ou rétabli dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits. (NF EN 13306) [10].

II.2.1.3 Disponibilité

Faculté d'un matériel ou d'un système à pouvoir fonctionner chaque fois que cela est nécessaire, chaque fois que l'on le sollicite, c'est-à-dire que l'on assure une fiabilité totale pendant les phases de fonctionnement. La disponibilité nécessite des opérations de maintenance préventive afin de prévenir tout vieillissement ou défaillance.

II.2.1.4 Sécurité

La sécurité est l'ensemble des méthodes ayant pour objet, sinon de supprimer, du moins de minimiser les conséquences qui ont un effet destructif sur le personnel, ou l'environnement de l'un et de l'autre. Sachant qu'un incident mécanique, une panne, peuvent provoquer un accident, sachant aussi que la maintenance doit maintenir en état le matériel de protection ou même que certaines opérations de maintenance sont elles-mêmes dangereuses, il apparaît que la relation entre la maintenance et la sécurité est particulièrement étroite.

II.2.1.5 Qualité

Degré (ou mesure) avec lequel un produit convient aux besoins du client. La qualité totale est fonction de la qualité du projet, qui mesure la valeur intrinsèque du projet par rapport aux besoins du client, et de la qualité de fabrication, qui mesure la fidélité avec laquelle le produit fabriqué est conforme au projet.

II.2.2 Temps de la maintenance

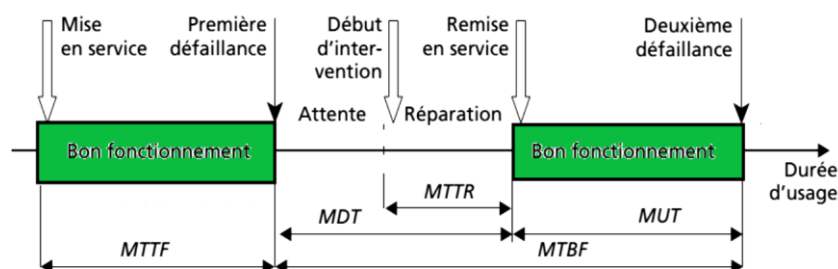


Figure II.2 Temps de maintenance

MTTF : (*mean time to [first] failure*) : temps moyen avant-première défaillance ;

MTBF : (*mean time between failure*) : temps moyen entre deux défaillances successives ;

MDT : (*mean down time*) : temps moyen d'indisponibilité ou temps moyen d'arrêt propre ;

MUT : (*mean up time*) : temps moyen de disponibilité ;

MTTR : (*mean time to repair*) : temps moyen de réparation

II.2.3 Organigramme de la maintenance :

II.2.3.1 Différentes formes de maintenance

a- Concepts

L'analyse des différentes formes de maintenance repose sur 4 concepts :

- **Les événements qui sont à l'origine de l'action** : référence à un échancier, la subordination à un type d'événement (auto diagnostic, information d'un capteur, mesure d'une usure, etc....), l'apparition d'une défaillance.
- **Les méthodes de maintenance qui leur seront respectivement associées** : maintenance préventive systématique, maintenance préventive conditionnelle, maintenance corrective.
- **Les opérations de maintenance proprement dites** : inspection, contrôle, dépannage, réparation, etc.
- **Les activités connexes** : maintenance d'amélioration, rénovation reconstruction, modernisation, travaux neufs sécurité, etc. Cette réflexion terminologique et conceptuelle représente une base de référence pour :
 - l'utilisation d'un langage commun pour toutes les parties (conception, production, prestataires de service, etc....)
 - la mise en place de systèmes informatisés de gestion de la maintenance.

b- Méthodes

Le choix entre la méthode maintenance s'effectue dans le cadre de la politique de la maintenance et doit s'opérer en accord avec la direction de l'entreprise. Le diagramme suivant synthétise selon la norme NF EN 13306 les méthodes de maintenance [10] :

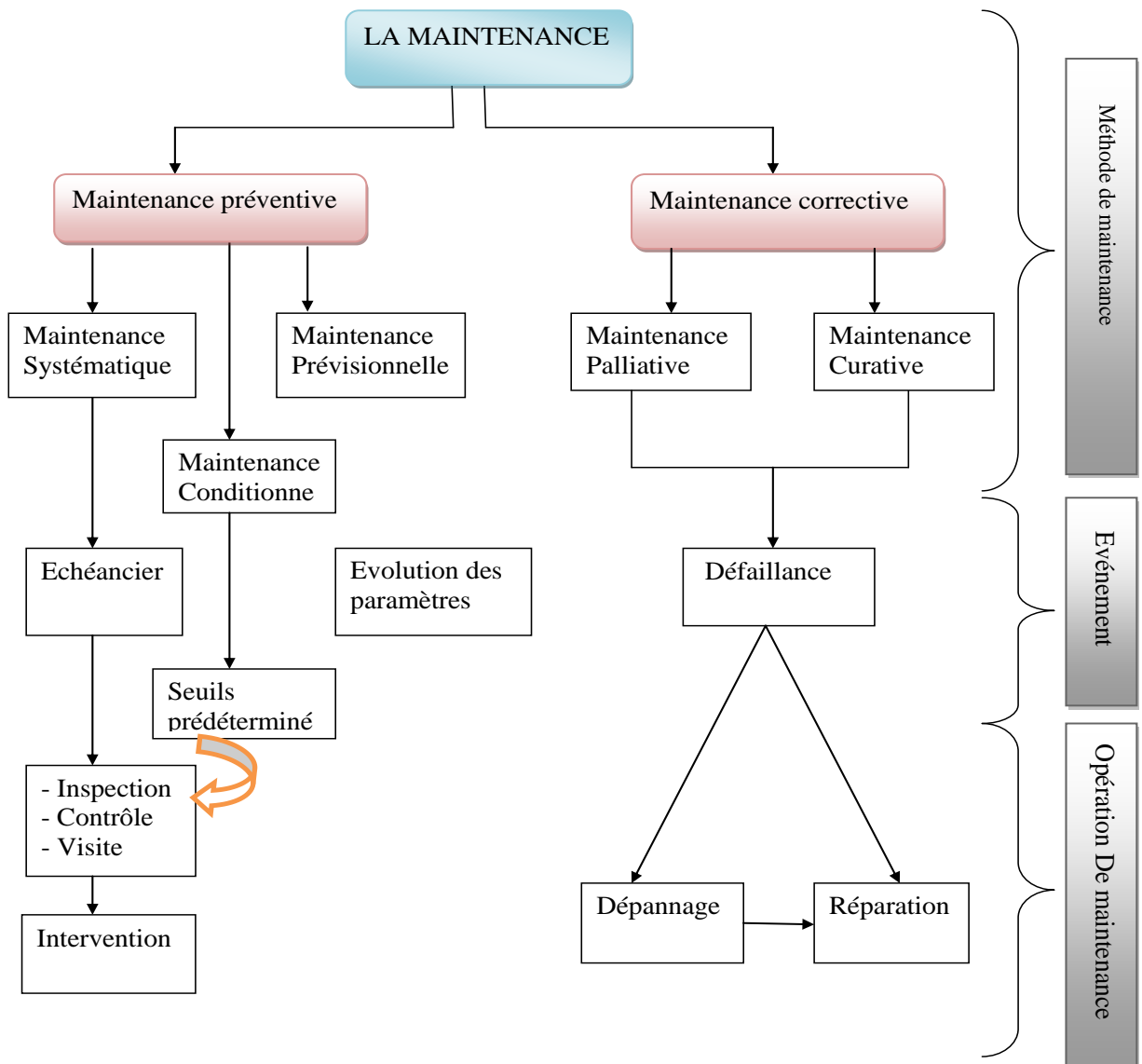


Figure II.3 Organisation de maintenance

II.2.4 Niveaux de maintenance

La maintenance et l'exploitation d'un bien s'exercent à travers de nombreuses opérations, parfois répétitives, parfois occasionnelles, communément définies jusqu'alors en 5 niveaux de maintenance.

La classification de ces opérations permet de les hiérarchiser de multiples façons. Ce peut être en fonction des critères suivants [1] :

- Le personnel de production ;
- Le personnel de maintenance en tenant compte de la qualification de l'intervenant ;
- Le personnel de l'entreprise ou un sous-traitant ;
- Une combinaison des 3.

II.2.4.1 1^{ème} Niveau

Ce type d'intervention peut être effectué par l'exploitation du bien sur lieu, sans outillage et à l'aide des instructions d'utilisation. Le stock de pièces consommables obligatoires est très faible [1].

Exemples en maintenance préventive : ronde de surveillance d'état, graissage journalier, manœuvre manuelle d'organe mécaniques, relevés de valeurs d'état ou d'unité d'usage, test de lampes sur pupitre, purge d'éléments filtrants, contrôle d'encaissement des filtres.

- **Exemples en maintenance corrective** : remplacement des ampoules, ajustage, remplacement d'éléments d'usure ou cassés, sur des éléments composants simples et accessibles.

I.2.4.2 2^{ème} Niveau

Ce type d'intervention peut être effectué par un technicien habilité de qualification moyenne, sur place, avec l'outillage portable défini par les instructions de maintenance, et à l'aide de ces mêmes instructions.

On peut se procurer les pièces de rechange transportable obligatoire sans délai et à proximité immédiate du lieu d'exploitation [1].

- **Exemple en maintenance préventive** : Confirmation de paramètres sur équipements en fonctionnement à l'aide de moyen de mesure intégrés au bien ; réglage simples (alignement de poulies, alignement pompe moteur, etc.) ; Contrôle des organes de coupure (capteur, disjoncteurs, fusibles), de sécurité, etc. ; graissage à faible périodicité (hebdomadaire, mensuelle) ; remplacement de filtre difficiles d'accès.
- **Exemple en maintenance corrective** : Remplacement par échange standard de pièces (fusibles ; courroies ; filtres à air, etc.) remplacement de tresses, de presse-étoupe, etc. ; lecture de logigramme de correction pour remise en cycle ; remplacement de composant individuels d'usure ou détériorer par échange standard (rail, glissière ; galet ; rouleaux ; chaîne ; fusible ; courroie,...).

II.2.4.3 3^{ème} Niveau

Ce modèle d'intervention peut être effectué par un technicien spécialisé, sur place ou dans le locale de maintenance, à l'aide de l'outillage prévu dans les instructions de maintenance ainsi que des appareils de mesure et de réglage, et éventuellement des banc d'essais et de

contrôle des équipements et en utilisant l'ensemble de la documentation nécessaire à la maintenance du bien ainsi que les pièces fournies par le magasin [1].

- **Exemple de maintenance préventive** : Contrôle de réglages impliquant l'utilisation d'appareils de mesure externes aux biens ; visite de maintenance préventive sur les équipements complexes ; contrôle d'allumage et de combustion (chaudières) ; intervention de maintenance préventive intrusive ; relevé de paramètres techniques d'état de biens à l'aide de mesure effectuée d'équipements de mesure individuels (prélèvement de fluides ou de matière, etc.).
- **Exemple de maintenance corrective** : Diagnostic ; réparation d'une fuite de fluide frigorigène (groupe de froid) ; reprise de calorifuge ; remplacement d'organes et de composants par échange standard de technicité générale, sans usage de moyens de production par usage de moyens de mesure et de diagnostic individuels.

II.2.4.4 4^{ème} Niveau

Ce type d'intervention peut être effectué par une groupe comprenant un encadrement technique très spécialisé, dans un atelier spécialisé doté d'un appareillage générale (moyens mécanique, de câblage, de nettoyage, etc.) et éventuellement des bancs de mesure et des étalons de travail nécessaire, à l'aide de toutes documentations générales ou spécifiques [1].

- **Exemples en maintenance préventive** : Révision partielles ou générale ne nécessitant pas de démontage complet de la machine ; analyse vibratoire ; analyse des lubrifiants ; thermographie infrarouge ; relevé de paramètres techniques nécessitants des moyens de mesure collectifs (oscilloscope, collecteur de données vibratoires) avec étude des données ; révision d'une pompe en atelier, suite à dépose préventive.
- **Exemples en maintenance corrective** : Remplacement de clapets de compresseur ; remplacement de tête de câble en BTA. Réparation d'une pompe sur site, suite à une défaillance ; dépannage de moyens de production par usage de moyens de mesure ou de diagnostic collectifs et/ou de fort complexité (valise de programmation automate, système de régulation et de contrôle des commandes numériques, variateurs, etc.).

II.2.4.5 5^{ème} Niveau

Opération dont les procédures impliquent un savoir-faire, faisant appel à des techniques ou technologie particulières, des processus et/ou des équipements de soutien industriels. Par définition, ce type d'opération de maintenance (rénovation, reconstruction, etc.) est effectué

par le constructeur ou par un service ou société spécialisée avec des équipements de soutien définis par le constructeur et donc proche de la fabrication du bien concerné [1].

Tableau II.1 Niveaux de maintenance

Niveau	Activités
Niveau 01	- Ronde, petit entretien, graissage
Niveau 02	- Echange standard, contrôle du bon fonctionnement
Niveau 03	- Diagnostic, petites réparations, opérations mineures préventives
Niveau 04	- Travaux de maintenance préventive et corrective, réglage des moyens de mesure
Niveau 05	- Rénovation, reconstruction et réparations importantes

II.2.5 Types de la maintenance

Nous distinguons plusieurs types de maintenance (figure II.3).

II.2.5.1 Maintenance préventive

Maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien. C'est une politique qui s'adresse aux éléments provoquant une perte de production ou des coûts d'arrêts imprévisibles, mais importants.

Les matériels visés sont ceux dont le coût des pannes est élevé (20 % des pannes représentant 80 % des coûts), la mise en pratique nécessite de décomposer les sous-systèmes en éléments maintenable (palier, réducteur, etc...) la périodicité des visites s'établit par l'étude des lois statistiques de la durée de vie. Des gammes d'entretien sont élaborées de façon à préciser le travail à exécuter et de garder la traçabilité de l'entretien [7].

II.2.5.1.a Maintenance préventive systématique

Définition d'après la Norme NF X 60010 « Maintenance préventive effectuée selon un échéancier établi selon le temps ou le nombre d'unités d'usage ».

Généralement, la maintenance préventive s'adresse aux éléments dont le coût des pannes est élevé, mais ne revenant pas trop cher en changement (les meilleurs exemples sont le changement systématique de l'huile, changement de la courroie de synchronisation,...).

Tableau II.2 Avantages et inconvénients de la maintenance préventive systématique

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Planification des arrêts d'entretien ; ➤ Optimisation de l'intervention (préparation) ; ➤ Limite les risques de panne. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Coût de maintenance élevé ; ➤ Approche statistique ; ➤ Risque induit par une intervention parfois non nécessaire. [7]

II.2.5.1.b Maintenance préventive conditionnelle

Définition d'après la Norme NF X 60010, la maintenance préventive conditionnelle définit comme « une maintenance préventive subordonnée à un type d'événement prédéterminé (auto diagnostic, information d'un capteur, mesuré d'une usure, révélateur de l'état de dégradation du bien) ».

Tableau II.3 Avantages et inconvénients de la maintenance préventive conditionnelle

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Optimisation de la durée de fonctionnement ; ➤ Optimisation de l'intervention (préparation) ; ➤ Evaluation réelle de l'état de la machine ; ➤ Evite les pertes de production. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Coût de l'investissement (homme / matériel) ; ➤ Astreindre à un programme suivi. [7]

II.2.5.1.b.1 Organisation de la maintenance conditionnelle

On définit l'organisation de la maintenance conditionnelle par l'organigramme suivant [8] :

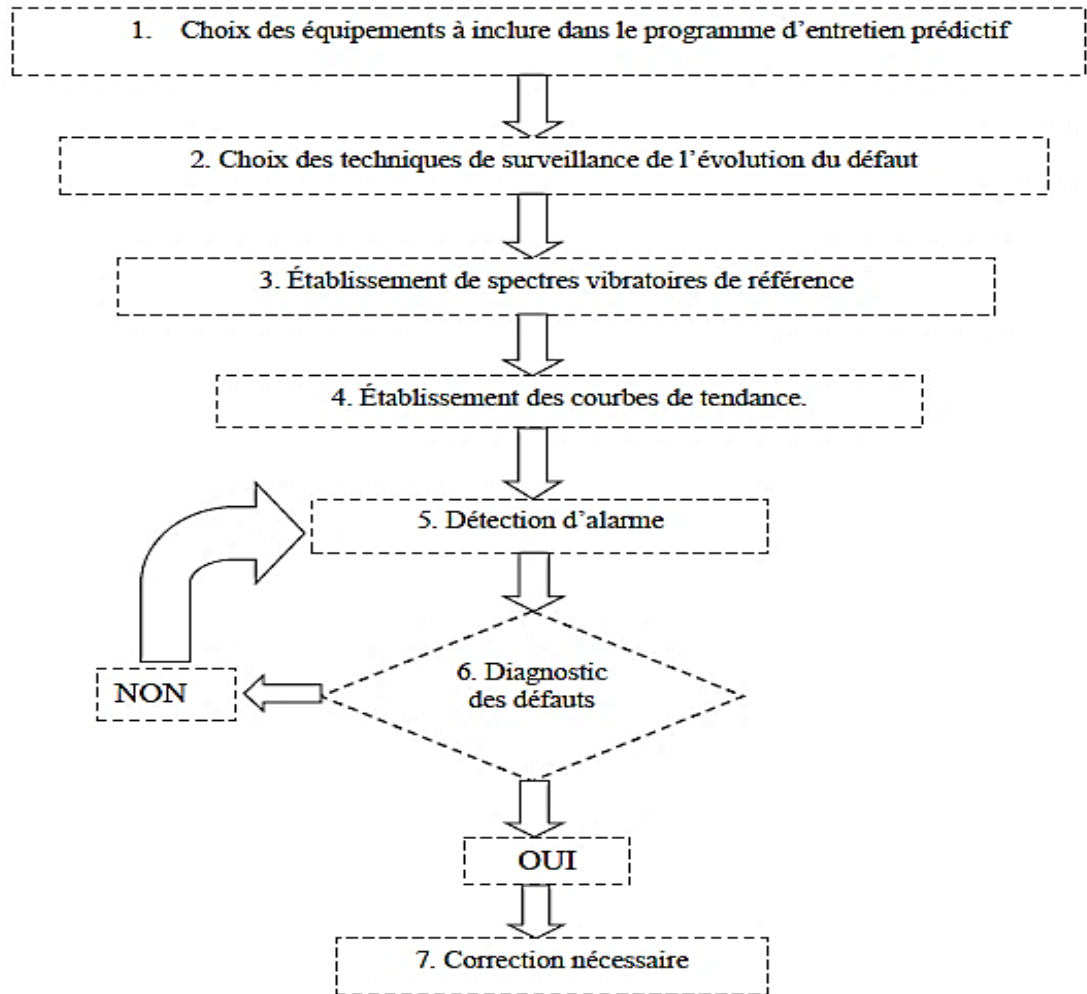


Figure II.4 : Organisation de la maintenance conditionnelle [8]

1. Cette étape comprend la codification des équipements, l'inventaire et la sélection du type d'entretien appliqué à chaque équipement,
2. Cette étape comprend le choix de la technique de mesure, leur périodicité, leur endroit et repérage, la création d'une route et des dossiers de suivi,
3. Cette étape s'occupe de la détermination des alarmes,
4. Cette étape comprend la prise de mesure, l'enregistrement et la gestion des données vibratoires,
5. vérification du seuil d'alarme,
6. déterminer l'élément défaillant,
7. Changer ou corriger l'élément défaillant.

II.2.5.2 Maintenance prévisionnelle :

Maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien (EN 13306) [7].

II.2.5.3 Maintenance corrective

Qui vise à intervenir à la suite de pannes, cela ne veut pas dire que toutes ces pannes n'ont pas été prévisibles, ce type de maintenance sera facilité par une bonne maintenabilité (aptitudes à maintenir ou à rétablir un dispositif, dans un état, lui permettant d'accomplir sa fonction), il pourra permettre d'améliorer la fiabilité globale en analysant les problèmes rencontrés en contrôle techniques ou cercles de qualité ou avec les constructeurs.

- **Maintenance curative** : ayant pour objet de rétablir un bien état spécifique ou de lui permettre d'accomplir une fonction requise.
- **Maintenance palliative** : activité de maintenance corrective destinée à permettre à bien accomplir provisoirement tout ou partie d'une fonction requise.

Tableau II.4 Avantages et inconvénients de la maintenance corrective

Avantages	Inconvénients
➤ Pas d'investissement en contrôle.	➤ Dommages conséquents ; ➤ Coût de réparation élevé ; ➤ Pas de planification ; ➤ Pertes de production si la machine est critique. [8]

II.2.6 Rôle de la maintenance corrective

Est la maîtrise de la disponibilité opérationnelle de équipements à fin qu'ils soient unis à la disposition de la production par ces actions, la maintenance doit être effectuée pendant la durée de vie de l'équipement par :

- La réduction des coûts de maintenance
- L'accroissement de la durée rentable de vie des équipements
- Réduction des accidents et des risques concernant la sécurité des hommes et de l'environnement.

II.2.7 Opérations de maintenance

Ne sont vues ici que les opérations essentielles :

II.2.7.1 Opérations de maintenance corrective

II.2.7.1.a Dépannage

Actions physiques exécutées pour permettre à un bien en panne d'accomplir sa fonction requise pendant une durée limitée jusqu'à ce que la réparation soit exécutée (EN 13306 : avril 2001). Le dépannage n'a pas de condition d'application particulières. La connaissance du Comportement du matériel et des modes de dégradation n'est pas indispensable même si cette connaissance permet souvent de gagner du temps [1].

II.2.7.1.b Réparation

Action physique exécutées pour rétablir la fonction d'un bien en panne (EN 13306 : avril 2001). L'application de la réparation peut être décidée soit immédiatement à la suite d'un incident ou d'une défaillance, soit après un dépannage, soit après une visite de maintenance préventive conditionnelle ou systématique [1].

II.2.7.2 Opérations de maintenance préventive

II.2.7.2.a Inspections

Contrôles de conformité réalisent mesurant, observent, testant ou calibrant les caractéristiques significatives d'un bien. En générale, l'inspection peut être réalésée avant, pendant ou après d'autre activités maintenance (EN 13306 : avril 2001) [1].

II.2.7.2.b Visites

Opération de surveillance qui, dans le cadre de la maintenance préventive systématique, s'opèrent selon une périodicité déterminée. Ces interventions correspondent à une liste d'opérations définies préalablement qui peuvent entraîner des démontages d'organes et une immobilisation du matériel .une visite peut entraîner une action de maintenance corrective [1].

II.2.7.2.c Contrôles

Vérification de conformité par rapport à des données rétablies suivies d'un jugement [1].

II.3 Qu'est-ce que le diagnostic ?

Le diagnostic est une tache hautement cognitive centrale dans de nombreux domaines, l'objectif vise par le diagnostic consiste à déterminer les causes d'un dysfonctionnement à partir

d'observation et de symptômes constatés c'est-à-dire la détection et la localisation d'un composant ou un élément défectueux dans un système dynamique [10].

II.3.1 Définitions

Le terme diagnostic en grec "diagnosis" (par connaissance), désigne l'identification d'une maladie par ses symptômes. Dans cette courte définition on retrouve les trois mots clés :

- **Maladie** : il ne peut y avoir diagnostic que par rapport à une défaillance fonctionnelle (nous dirons anomalie). Dans notre cas les défauts des machines tournantes, encore faut-il pour parler de maladie que la présence de ce défaut constitue une entrave pour le bon fonctionnement de la machine.
- **Symptôme** : pour effectuer un diagnostic, il faut disposer d'informations significatives qui permettant de reconnaître le défaut si on veut être efficace. Il faut que l'information soit adoptée au besoin d'où la nécessité en général, de traiter celle-ci.
- **Identification** : c'est la démarche par laquelle on effectue le tri des informations qui sont en notre disposition pour sélectionner un ou plusieurs défauts possibles.

II.3.2 Objectif du diagnostic

L'objectif d'un système de diagnostic est de prévoir l'apparition d'un défaut le plus rapidement possible et le plus précisément possible. Pour pouvoir expliquer ce principe avec plus de précision, nous allons tout d'abord définir ce que nous entendons par défaut, puis nous rappellerons les fonctions du diagnostic telles que la détection, la localisation, et l'identification des défauts [13].

II.3.3 Différentes étapes de diagnostic

Le terme diagnostic correspond à la caractérisation du défaut, pour effectuer ce dernier il faut passer par un certain nombre d'étapes qui s'enchaînent.

II.3.3.1 Détection

Cette opération permet de décider si le système est en fonctionnement normal ou non.

- Probabilité de fausse détection : conduit à des arrêts ou des reconfigurations inutiles,
- Probabilité de non détection : peut conduire à une panne intolérable dans les systèmes à haut niveau de sécurité (aéronautique, nucléaire, ...etc).

II.3.3.2 Localisation

C'est l'identification de l'élément qui a causé le défaut. Parfois il est impossible de localiser les interactions entre les composants du système et l'instrumentation. La solution est d'isoler un sous-système comportant des composants susceptibles de contenir le ou les défauts [17].

II.3.3.3 Identification

L'objectif de l'identification est de caractériser plus finement le défaut et déterminer les causes qui ont engendré la défaillance constatée.

Dans le diagramme suivant, nous allons expliquer une méthode simplifiée de détermination des défauts et les causes qui ont engendré cette défaillance.

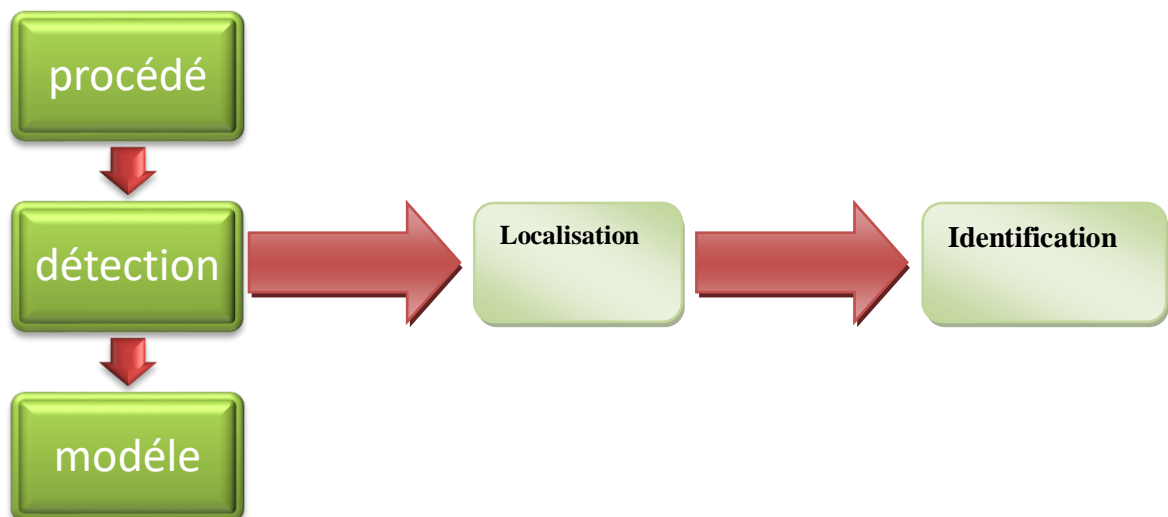


Figure II.5 Différentes étapes de diagnostic

II.3.4 Considération générales sur les systèmes de diagnostics

Il existe plusieurs critères permettant d'évaluer les performances d'un système de diagnostic. De manière générale, on note :

- Rapidité ;
- Isolabilité ;
- Robustesse ;

- Adaptabilité ;
- Identification de défauts multiples ;
- La sensibilité.

Dans le tableau ci-dessous, nous définirons certains critères permettant d'évaluer ce système et la manière de l'appliquer.

À la fin de tout cela, nous connaissons les systèmes de diagnostic et comment ils évaluent leurs prouesses et les solutions qu'ils proposent.

Tableau. II.5 Critères d'évaluations d'un Système de diagnostic.

Critères d'évaluations	Définitions
Rapidité	Lors de dysfonctionnement de la chaîne de production, le système de surveillance doit réagir rapidement dans cette situation, ainsi que, un système de diagnostic rapide permet d'éviter des dégâts matériels et humains [16].
Isolabilité	D'après [17] [18], c'est l'aptitude du système de surveillance à distinguer les différents modes de dysfonctionnement du processus. Une défaillance engendre souvent une cascade d'alarmes et il peut être difficile de remonter à l'organe défaillant. Le degré d'isolabilité des défaillances est lié à la structure des résidus (signal de détection de défaut) et à la procédure de détection mise en œuvre.
Robustesse	Il s'agit de vérifier l'aptitude du système de surveillance à détecter et à isoler les défauts affectant le processus surveillé dans un environnement incertain. Il convient de noter que le critère de la robustesse concerne non seulement les méthodes de génération des résidus mais aussi les méthodes d'évaluation. L'évaluation robuste des résidus avait tout particulièrement concerné le problème du seuillage avec l'objectif de minimiser les fausses alarmes [16].

Sensibilité	Caractérise l'aptitude du système de diagnostic à détecter des défauts d'une certaine amplitude, elle dépend non seulement de la structure des résidus mais aussi du rapport entre le bruit de mesure et le défaut [19].
--------------------	--

II.3.5 Surveillance

La surveillance peut être définie comme un ensemble d'actions réalisées manuellement ou automatiquement, destinées à observer l'état d'un bien ou d'un service et à détecter l'apparition d'une éventuelle défaillance.

Les informations nécessaires à ces actions peuvent provenir de grandeurs physiques directement prélevées sur le système ou reconstituées à partir de mesures indirectes. La surveillance consiste en la mise en œuvre de techniques reposant sur l'analyse des variations des paramètres ou des grandeurs de fonctionnement de l'entité, visant à évaluer son état de dégradation, pour décider de la nécessité d'une inspection ou d'une réparation préventive afin d'éviter sa défaillance. Si la surveillance permet de détecter une défaillance, le diagnostic consiste d'une part à observer les effets de la défaillance et, d'autre part, à identifier si possible les causes et l'importance de cette défaillance.

Un examen strict des définitions de la surveillance et du diagnostic montre que ce sont des outils de la maintenance qui visent à améliorer la sûreté de fonctionnement d'une entité à laquelle ils sont appliqués.



Figure II.6 Surveillance d'un équipement

II.3.6 Défaut (panne, défaillance)

Évènement engendrant une modification du fonctionnement du procédé. L'état du système ne correspond plus à un fonctionnement normal. Le système n'est plus apte à assurer totalement sa fonction.

II.3.7.1 Défaillance

➤ Définition

Une défaillance est une « altération ou cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise ». Des synonymes de « défaillance » sont également utilisés dans certains secteurs industriels ou suivant des habitudes corporatives : dommage, anomalie, avarie, défaut, panne, incident, dégradation.

II.3.7.2 Classification de la défaillance

- Défaillance *progressive* : c'est une défaillance due à une évolution dans le temps des caractéristiques d'une entité. Il y a donc possibilité de prévoir une telle défaillance par un examen ou une surveillance antérieurs (exemple : usure des bagues d'un roulement à billes).
- Défaillance *soudaine* : elle ne se manifeste pas par une perte progressive des performances et ne peut donc pas être prévue par un examen ou une surveillance antérieurs (exemple : claquage d'un composant électronique).

La figure II.8 montre que l'évolution du taux de défaillance en fonction du temps présente trois domaines :

- Domaine (I) : apparition de défaillances dues à des défauts de fabrication et à des contrôles insuffisants. Les essais de rodage (matériel mécanique) ou de déverminage (équipements électroniques) ont pour but d'éliminer la période (I).
- Domaine (II) : apparition de défaillances aléatoires sans cause systématique. Cette période est très longue pour les composants électroniques et courts pour les composants mécaniques et les mécanismes.
- Domaine (III) : dégradations progressives et irréversibles. C'est le cas de composants mécaniques / mécanismes.

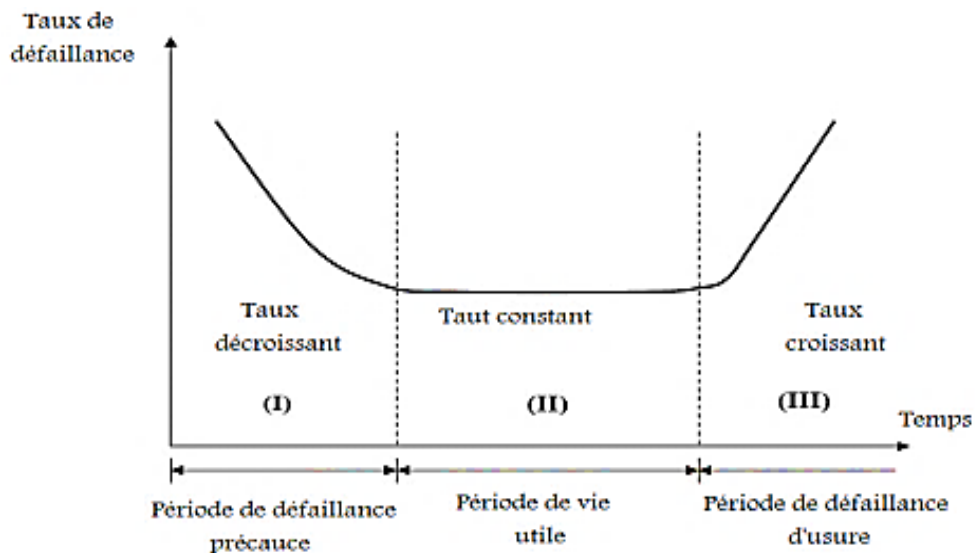


Figure II.7 Evolution du taux de défaillance en fonction du temps

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons essayé de regrouper le maximum d'information sur la maintenance, la surveillance et le diagnostic.

Comme nous l'avons vu au premier chapitre, les contraintes sur les moteurs asynchrones induits des défaillances qui peuvent conduire à des arrêts non programmés. Une stratégie de maintenance de la MAS, des systèmes de diagnostics et de surveillances efficaces doivent être fournis pour assurer la continuité de la production.

Diverses techniques de diagnostic des défauts des moteurs asynchrones seront présentées au chapitre III.

Chapitre III :

Techniques de diagnostic de la Machine asynchrone



III.1 Introduction

Le diagnostic est une tâche hautement cognitive centrale dans de nombreux domaines, l'objectif visé par le diagnostic consiste à déterminer les causes d'un dysfonctionnement à partir d'observation et de symptômes constatés c'est-à-dire la détection et la localisation d'un composant ou un élément défectueux dans un système dynamique.

A ce jour, c'est l'analyse fréquentielle des grandeurs mesurables qui est la plus utilisée pour le diagnostic de défaut, car la plupart des défauts connus peuvent être détectés avec ce type d'approche.

Pour effectuer le diagnostic d'une installation industrielle, les opérateurs de maintenance analysent un certain nombre de signaux issus de la machine. En effet, l'évolution temporelle et le contenu spectral de ces signaux, peuvent être exploités pour détecter et localiser les anomalies qui affectent le bon fonctionnement de la machine. Elles font toute partie de la famille des méthodes d'estimation spectrale non- paramétriques. Les grandeurs accessibles et mesurables d'une machine asynchrone peuvent être :

- Les courants absorbés.
- Le flux de dispersion.
- La tension d'alimentation.
- Le couple électromagnétique.
- La vitesse de rotation mécanique.
- Les vibrations.

Cependant, l'équipement nécessaire pour l'acquisition et traitement des signaux reste assez coûteux.

III.2 Principe de diagnostic de défaut

III.2.1 Redondance physique (matérielle)

La redondance physique consiste à utiliser plusieurs capteurs, actionneurs, processeur et logiciels pour mesurer et/ou contrôler une variable particulière. Un principe de vote majoritaire est appliqué sur les valeurs redondantes pour savoir s'il y a une faute ou non. Elle entraîne un coût important en instrumentation mais fiable, sûr et simple à implanter [15].

III.2.2 Redondance analytique

Son rôle est d'exploiter les contraintes liant les différentes variables du système. Ces dernières peuvent s'exprimer sous la forme de relation analytique liant les variables connues

(relation entrée/sortie ou sortie/sortie). Le diagnostic utilisant la redondance analytique consiste à vérifier si les relations analytiques sont égales à zéro en utilisant les mesures prélevées en ligne sur le système. Le concept de redondance analytique repose sur l'utilisation d'un modèle mathématique du système à surveiller [15].

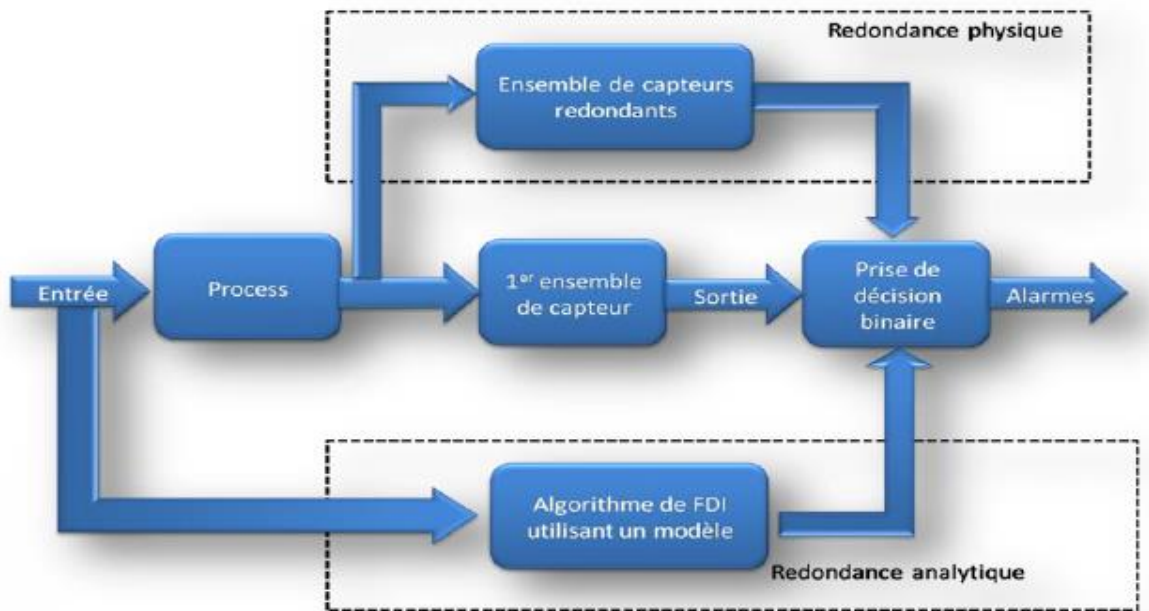


Figure III.1 : Redondance physique et analytique

III.3 Techniques de diagnostic

Dans la littérature, les techniques de diagnostic proposées visent, soit à la mise en valeur ou l'extraction de l'information pertinente contenu dans le signal, soit à la recherche des procédures de traitement automatique depuis l'acquisition jusqu'à la prise de décision. Nous pouvons, de ce fait, classer ces techniques sous deux approches distinctes :

- La première est *l'approche signal*, elle repose sur la surveillance de l'évolution temporelle et du contenu spectral du signal.
- La seconde est *l'approche système* dont l'objectif est la mise en œuvre d'une procédure de classification ou d'automatisation des défauts [1].

III.3.1 Approche signal

III.3.1.1 Analyse des grandeurs électriques mesurables

Les méthodes reposent sur une analyse directe du spectre de la variable mesurée (courant ou tension). Elles permettent d'extraire une fréquence particulière (démodulation, filtrage),

une bande de fréquence (filtrage, FFT), il s'agit des méthodes dites MCSA (analyse de la signature du courant statoriques du moteur) [1].

- **Analyse des courants**

Les méthodes basées sur l'examen du courant statorique sont désignées sous le nom de « l'analyse des signatures des courants du moteur » (MCSA). Cette méthode consiste à détecter les défauts par l'étude de certains composants fréquentiels ou par la vérification de la variation de certains des composants déjà existant [1].

- **Analyse des flux**

La conversion électromécanique de l'énergie est localisée dans l'entrefer. Cette conversion peut être affectée par tout déséquilibre de type (magnétique, électrique ou électromagnétique au niveau du rotor ou du stator).

Le flux d'entrefer, le flux embrassé par les enroulements statoriques ou encore le flux de fuite dans l'axe du rotor sont des paramètres qui, à cause de leur sensibilité à tout déséquilibre de la machine, méritent d'être analysés. Par exemple, le flux axial est toujours présent dans les machines électriques à cause des dissymétries inhérentes à leur fabrication.

L'étude des variations de ce flux est donc considérée par beaucoup d'auteurs comme une solution pour détecter et localiser un défaut. La méthode consiste à placer des bobines exploratrices à l'extérieur de la machine perpendiculairement à l'axe du rotor [1].

III.3.1.2 Surveillance des fluctuations de la vitesse

Détecte les défaillances en mesurant les fluctuations dans la période de rotation du moteur. Cette méthode est particulièrement utile pour détecter les défauts au rotor, les vibrations, l'excentricité, l'asymétrie du rotor, des roulements défaillants et des désalignements d'arbre. Cependant, la machine fonctionnant généralement à vitesse et couple de charge variables, les instruments de mesure doivent être capables de distinguer les variations de vitesse dues au couple de charge et celles dues à des défauts au rotor [1].

III.3.1.3 Surveillance du couple électromagnétique

Permet la détection de défauts lors de la mise en service ou en fonctionnement. Cette méthode peut détecter des barres de rotor cassées et des courts-circuits au stator. La forme du couple électromagnétique peut être utilisée pour distinguer des déséquilibres engendrés par des barres de rotor cassées ou des enroulements stator défaillants. Le couple

électromagnétique peut être soit mesuré, soit estimé par le biais d'observateur d'état par exemple [1].

III.3.1.4 Surveillance du champ magnétique

Permet de détecter les défauts au stator et au rotor qui peuvent causer des modifications de l'évolution du champ magnétique. Les défauts au rotor peuvent être détectés par une spire de mesure placée au stator de la machine. Les défauts cités peuvent introduire des variations dans la répartition du flux d'entrefer et conduire à un flux axial qui peut être détecté par une spire de mesure placée autour de l'axe de la machine ou des capteurs à effet Hall. En surveillant le flux de fuite axial, il est souvent possible d'identifier de nombreux défauts : barre de rotor cassée, court-circuit dans un enroulement stator [1].

III.3.2 Approche système

Son principe repose sur un prétraitement du signal et sur sa classification. Après l'adaptation du signal selon l'application désirée (soit par un descripteur, un espace de représentation, une distance...), la classification se fait, en général, soit selon la sévérité du défaut s'il y en a un seul ou par le type de défaut s'il y en a plusieurs. La procédure de classification s'exprime en termes de séparation des classes. Elle est déterminée par un espace de représentation où les classes sont maximalelement séparées et une règle de décision utilisant au mieux cette séparation. La procédure de classification est constituée d'un certain espace de représentation des données et d'une règle de décision qui affecte un individu à une classe à l'aide d'une fonction discriminante (par exemple une distance d). Ici, l'espace de représentation peut être le domaine temporel, fréquentiel, temps-fréquence, doppler-retard, temps-échelle(ou l'espace de paramètres issus d'une modélisation autorégressive (AR)) [1].

III.4 Méthodes de diagnostic fréquemment utilisées

La surveillance est un moyen de garantir le bon fonctionnement des systèmes. Le diagnostic est une partie de la surveillance qui a pour objectif de trouver la cause des défauts.

III.4.1 Méthodes de diagnostic des défauts basées sur l'analyse spectrale des signaux

L'analyse spectrale est utilisée depuis de nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines électriques, essentiellement les ruptures de barres au rotor des machines

asynchrones, la dégradation des roulements, les excentricités et les court-circuités dans les bobinages. Ces cas se prêtent bien à cette approche dans la mesure où de nombreux phénomènes se traduisent par l'apparition de fréquences directement liées à la vitesse de rotation ou à des multiples de la fréquence d'alimentation.

La surveillance par analyse spectrale de la machine asynchrone consiste donc à effectuer une simple transformée de Fourier des grandeurs affectées par le défaut, et à visualiser les fréquences parasites constituant la signature d'un défaut dans la machine [16].

III.4.1.1 Analyse fréquentielle du courant statorique

L'analyse du courant statorique dans le domaine fréquentiel reste la méthode la plus couramment utilisée car le spectre résultant contient une source de renseignement sur la majorité des défauts électriques et magnétiques pouvant apparaître au sein d'une machine asynchrone.

Grâce à l'analyse spectrale du courant de ligne, on doit pouvoir observer, en présence d'une rupture de barre, les composantes qui apparaissent autour du fondamental dont les fréquences sont $(1 \pm 2k/g)$ à titre d'exemple, nous présentons sur les figures (III.2.a et b) le spectre du courant statorique lorsque la machine fonctionne avec un rotor sain, et un rotor défailant (une barre cassée), on constate l'apparition des composantes en symétrie autour de la fréquence du réseau, ce qui traduit la présence d'un défaut au sein de la cage d'écuriel.

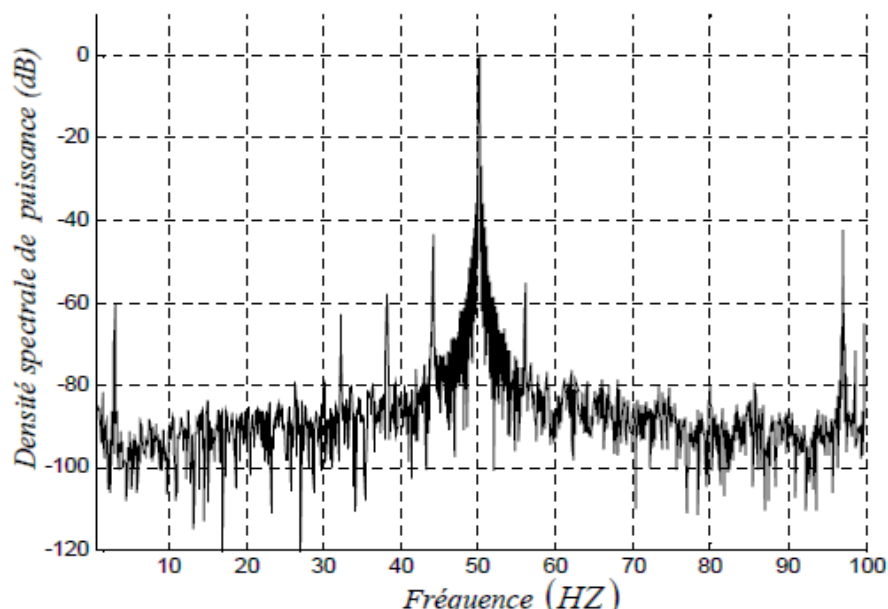


Figure III.2 a Spectre fréquentiel du courant statorique expérimental pour un rotor sain [16]

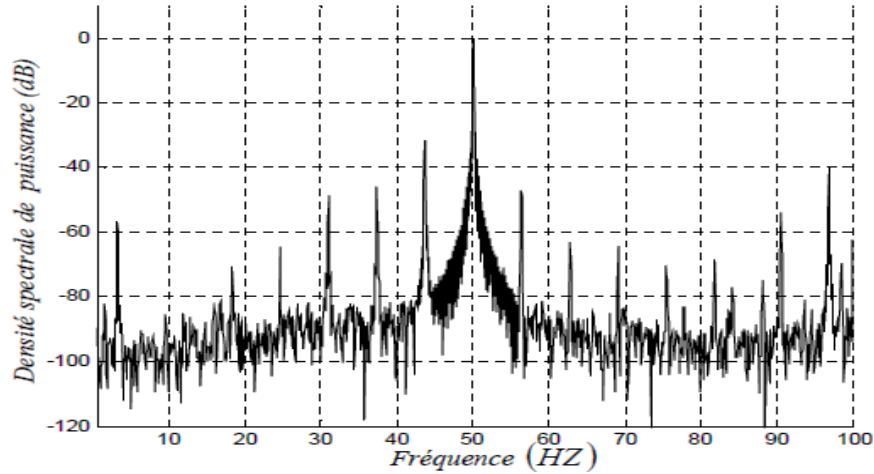


Figure (III.2) b : Spectre fréquentiel du courant statorique expérimental pour un rotor défaillant (une barre cassée) [16]

Dans la littérature, sont présentées plusieurs techniques de détection de défauts par l'analyse fréquentielle du courant statorique [17].

III.4.1.2 Analyse fréquentielle de la puissance instantanée

L'utilisation de la puissance instantanée pour la détection des défauts dans les moteurs asynchrones, a fait l'objectif de nombreux travaux. La puissance instantanée est le produit de la tension d'alimentation et le courant absorbé par le moteur. Donc, la quantité d'informations apportée par cette grandeur, est plus grande que celle apportée par le courant, le spectre de la puissance instantanée contient une composante additionnelle située à la fréquence de défauts comme le montre la relation suivante [17].

La tension et le courant d'une phase statorique peuvent se mettre sous la forme suivante :

$$V_s(t) = \sqrt{2} V_{LL} \cos(\omega_s t) \quad (\text{III.1})$$

$$I_{s0}(t) = \sqrt{2} I_{LL} \cos(\omega_s t - \varphi) \quad (\text{III.2})$$

Ce qui nous donne, en termes de la puissance instantanée :

$$p_{s0}(t) = V_{LL} I_{LL} [\cos(2\omega_s t - \varphi) + \cos \varphi] \quad (\text{III.3})$$

En présence d'un défaut rotorique. L'équation du courant devient :

$$I_{s0}(t) = \sqrt{2} I_{LL} \cos(\omega_s t - \varphi) + m \cos((\omega_s - \omega_f)t - \varphi) + m \cos((\omega_s + \omega_f)t - \varphi) \quad (\text{III.4})$$

En multipliant l'équation (III.1) par l'équation (III.4), l'expression de la puissance instantanée d'une phase statorique, en présence d'un défaut, donne :

$$P_s(t) = p_{s0}(t) + m \frac{V_{LL} I_{LL}}{2} \left[\cos((2\omega_s - \omega_f)t - \varphi) + \cos((2\omega_s + \omega_f)t - \varphi) + 2 \cos(\varphi) \cos(\omega_f t) \right] \quad (\text{III.5})$$

Avec :

$P_s(t)$: la puissance instantanée d'une phase statorique.

V_{LL} : la valeur RMS de la tension entre phases.

I_{LL} : courant de ligne.

m : l'indice de modulation.

ω_f : la pulsation d'oscillation (pulsation du défaut, par exemple dans le cas d'une cassure de barre $\omega_s = 2k_g \omega_s$.

ω_s et φ représentent respectivement, la pulsation des courants statoriques et l'angle de déphasage entre le courant absorbé par le moteur et la tension.

La figure (III.3.a et b), montre la présence des composantes basses fréquences lorsque la cage de la machine présente une défaillance.

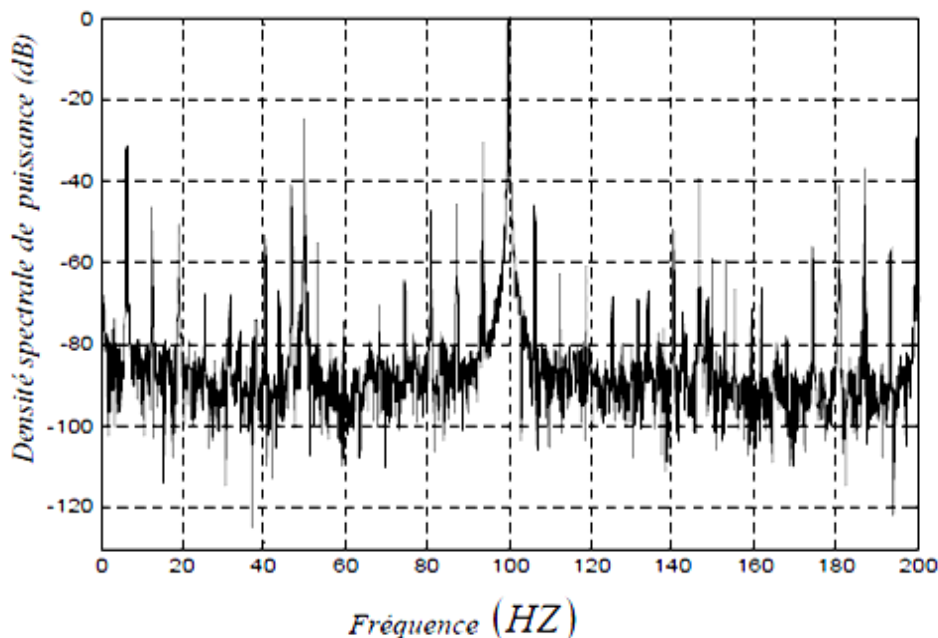


Figure III.3 a : Spectre fréquentiel du courant statorique expérimental pour un rotor sain [16]

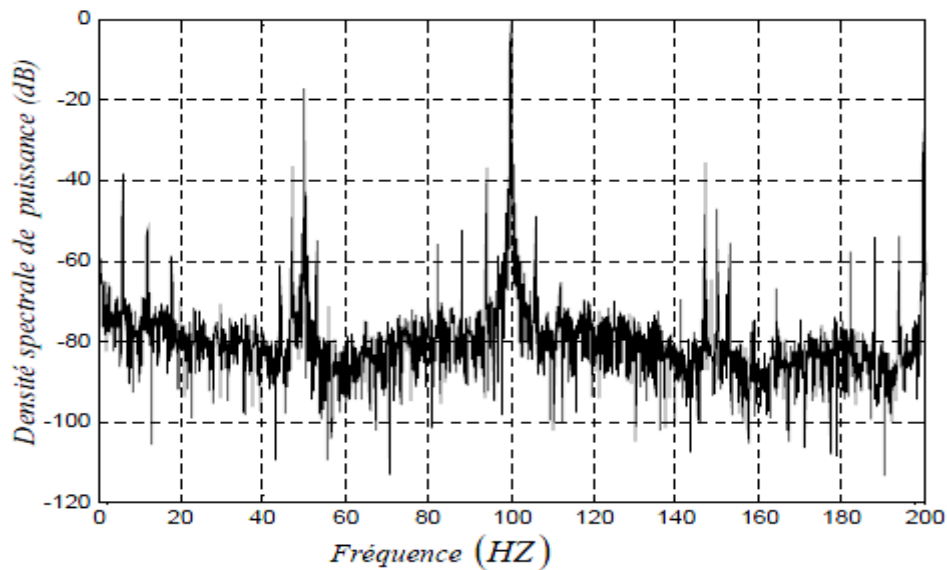


Figure III.3 b : Spectre fréquentiel de la puissance instantané expérimental pour un rotor défaillant (une barre cassée) [16]

III.4.1.3 Analyse fréquentielle de la tension du neutre

En 1998, Cash a utilisé la tension présente entre le neutre de la source d'alimentation et le neutre de la machine asynchrone pour détecter des courts-circuits entre spire dans le bobinage statorique. Une analyse similaire a été effectuée par dans le but de détecter un défaut rotorique dans les machines asynchrones.

L'information la plus significative pour permettre un diagnostic fiable de la cage rotorique se situe au niveau des composantes harmoniques de fréquence $f_a^\pm = [3(1 - g) \pm g]f_s$. Nous présentons sur les figures (III.4) et (III.5) le spectre fréquentiel de cette tension lorsque la machine asynchrone fonctionne avec une cage saine et une cage défaillante. [18]

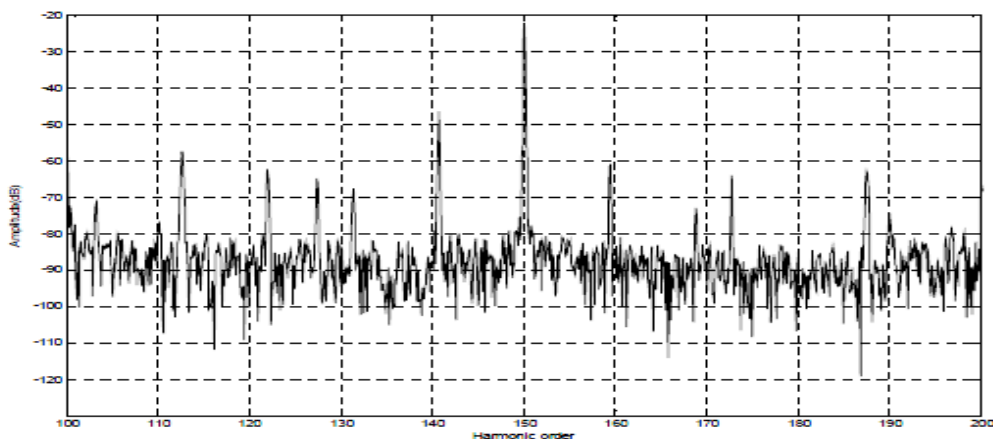


Figure III.4 Spectre de la tension du neutre dans la bande [100-200] (harmonique3) état sain [16]

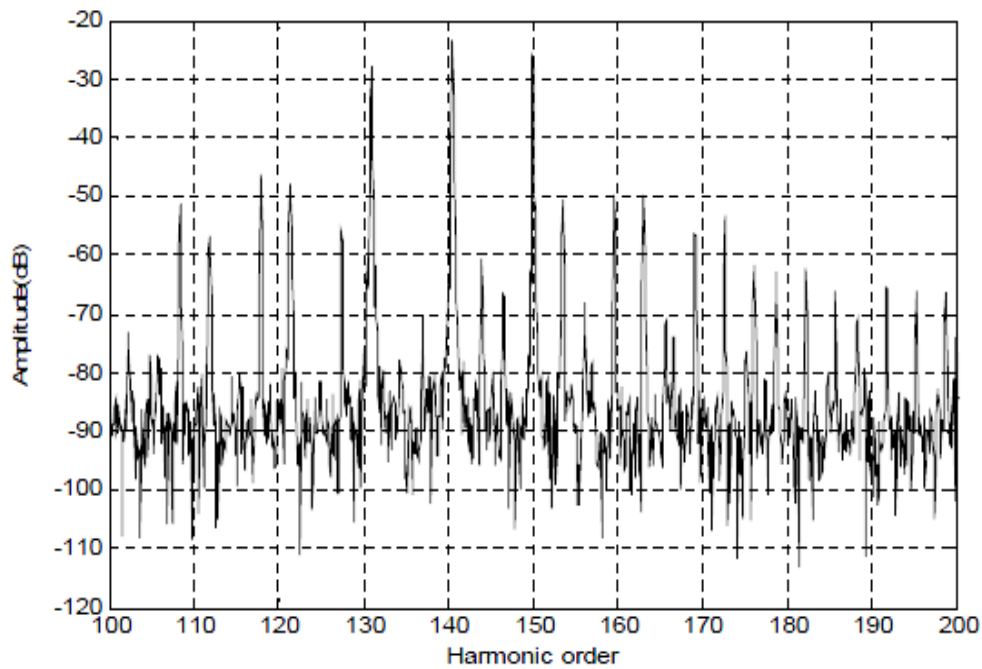


Figure III.5 spectre de la tension du neutre dans la bande [100-200] (harmonique 3), 3 barres cassées [16]

III.4.1.4 Analyse des flux

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

Le flux axial est toujours présent dans les machines électriques à cause des dissymétries inhérentes à leur fabrication. L'étude des variations de flux peut donc être une solution pour détecter et localiser un défaut à travers l'utilisation de bobines exploratrices placées à l'extérieur de la machine, perpendiculairement à l'axe du rotor.

Le flux axial est le résultat de l'effet des courants sur les extrémités de la machine (têtes de bobines, anneaux de court-circuit). Dans une machine symétrique alimentée par un système de tension équilibrée, par décomposition en séries de Fourier, l'inductance magnétique d'entrefer B_{es} peut s'exprimer de la manière suivante [19] :

$$B_{es}(\theta, t) = \sum_i B_i \cos(\omega_s - ip\theta) \quad (\text{III.6})$$

B_i : Est l'amplitude de l'harmonique de rang (6 ± 1)

P : le nombre de pair de pôles

ω_s : La pulsation des tensions statoriques

θ : L'angle mécanique associé à la position du rotor.

L'équation (III.6) est exprimée dans un repère lié au stator. Dans un repère lié au rotor, il suffit d'appliquer à θ la relation suivante

$$\theta = \theta_0 + \frac{\omega_s(1-g)}{p}t \quad (\text{III.7})$$

La nouvelle expression spatio-temporelle de l'induction est alors :

$$b_{er}(\theta, t) = B_1 \cos(g\omega_s t - p\theta_0) + B_5 \cos((6-5g)\omega_s t - 5p\theta_0) + B_5 \cos((7g-6)\omega_s t - 7p\theta_0) + \dots \quad (\text{III.8})$$

Cette expression donne implicitement les composantes harmoniques des courants au rotor. Les composantes fréquentielles du flux de fuite dans l'axe du rotor qui permettent de détecter et d'identifier des courts-circuits dans les enroulements statoriques, les fréquences caractéristiques sont données par l'expression suivante $Kf_s + n.f_r$.

Ces composantes présentes dans le spectre de flux pour une machine saine, vont augmenter avec l'apparition d'un défaut.

III.4.1.5 Analyse du couple électromagnétique

Certain défaut mécanique peuvent être détectés par la recherche d'harmonique dans le spectre du couple électromagnétique mesuré, résultant d'une interaction entre le flux et le courant. Ce couple peut être reconstruit, soit à partir de deux ou de trois courants statoriques, soit en utilisant un modèle physique de la machine [16].

L'utilisation de ce signal peut s'avérer un bon choix pour la détection des défauts de charge. En effet, les variations du couple de charge vont induire des variations du flux et du courant dans la machine. De même la torsion de l'arbre entraîne l'apparition d'harmonique dans le spectre du couple [16].

Dans un repère d, q lié au stator, le couple électromagnétique a pour expression :

$$C_{em} = p \cdot (\varphi_{sd} i_{sq} - \varphi_{sq} i_{sd}) \quad (\text{III.9})$$

Si on considère les courants et les flux dans un repère triphasé :

$$C_{em} = \varphi_{s2}i_{s1} - \varphi_{s3}i_{s1} - \varphi_{s1}i_{s2} + \varphi_{s3}i_{s2} - \varphi_{s1}i_{s3} - \varphi_{s2}i_{s3} \quad (\text{III.10})$$

$\varphi_{s1}, \varphi_{s2}, \varphi_{s3}$: sont les flux embrassées sous les pôles pour les phases 1, 2 et 3 respectivement et i_{s1}, i_{s2}, i_{s3} sont les courants de phase statorique.

Avec une alimentation triphasée sans neutre on a $i_{s1} = -i_{s2} - i_{s3}$ et par conséquent, $\varphi_{s1} = -\varphi_{s2} - \varphi_{s3}$. Ceci permet d'obtenir :

$$C_{em} = \sqrt{3}p. (\varphi_{s3}i_{s2} - \varphi_{s2}i_{s3}) \quad (\text{III.11})$$

La dissymétrie électrique du rotor fait apparaître des harmoniques de dentures rotoriques, ce qui modifie le champ d'entrefer. Le problème peut alors être détecté en analysant les fréquences d'encoches présentent dans le spectre du couple estimé.

$$f_{sb} = f_s \left[\frac{N_r(1-g)}{p} \pm 2gf_s \right] \quad (\text{III.12})$$

Avec :

f_{sb} : fréquence d'encoche au rotor

f_s : fréquence d'alimentation (fréquence des courant statorique)

N_r : nombre d'encoche au rotor.

III.4.1.6 Analyses vibratoires de la machine

L'analyse vibratoire de la machine asynchrone peut être menée grâce à des accéléromètres placés sur les paliers dans les directions verticales, axiales et radiales.

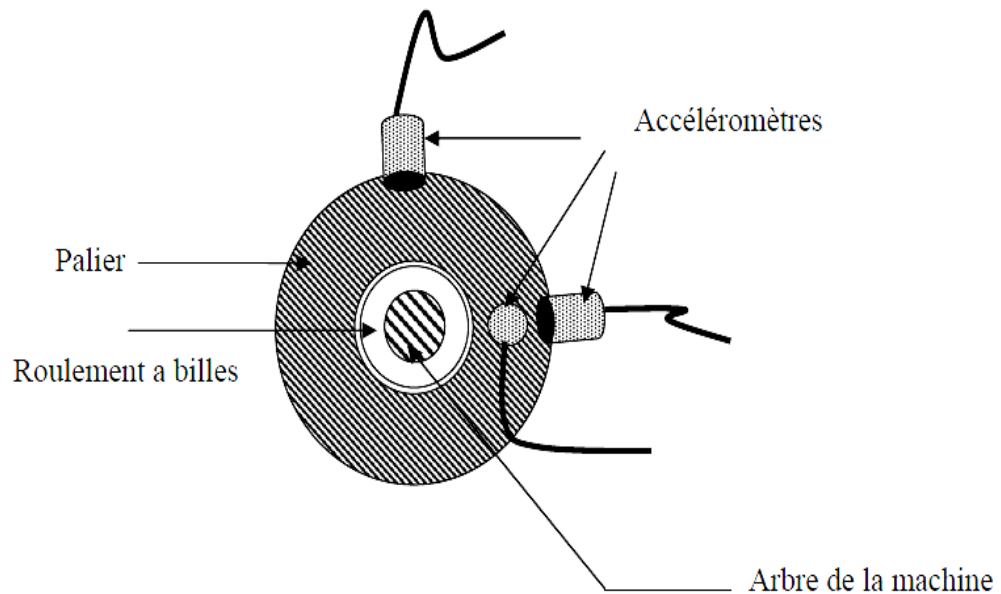


Figure III.6 Mesures vibratoires sur la machine asynchrone [16]

Au même titre que les courants, les vibrations de la machine fournissant des informations pratiquement sur tous les défauts mécaniques fréquemment rencontrés. Nous avons remarqué que les composantes fréquentielles, qui permettent d'identifier les défauts cités, dépendent de la fréquence de rotation du rotor. De ce fait, ces signatures ne sont pas assez distinctes les unes par rapport aux autres. Leur utilisation poserait des problèmes de discrimination des types de défauts. Par contre, pour la détection d'un défaut ou d'un déséquilibre au rotor, les vibrations de la machine s'avèrent être des signaux pertinents.

III.4.2 Diagnostic de défaut par l'estimation paramétrique

L'hypothèse fondamentale pour la surveillance d'un système. Par un suivi paramétrique est qu'un défaut se traduit par la variation d'un (ou plusieurs) paramètres caractéristiques du système, constituant ainsi les signatures de ce défaut, intuitivement diagnostiquer un défaut revient donc à réaliser un suivi des paramètres d'un modèle de fonctionnement normal (modèle de Park par exemple pour la machine asynchrone) et la simple variation paramétrique est une indication d'un défaut.

Le type de défauts que l'on pourra détecter dépend du choix du modèle, les défauts statoriques ou rotoriques doivent être discriminés au niveau des paramètres physiques estimés, pour qu'on puisse les détecter et les localiser [16].

III.5 Conclusion

Ce chapitre est consacré à la présentation des techniques de diagnostic des défaillances de la MAS les plus utilisées. La classification ; les caractéristiques de chaque technique et leur importance sont rappelées.

Pour compléter cette mémoire en va présenter dans le dernier chapitre le modèle triphasé de la MAS pour le diagnostic des défauts de court-circuit au niveau de stator.

Chapitre IV :

Modèle orienté au diagnostic des défauts de court-circuit



IV.1 Introduction

Le but de ce dernier chapitre est de faire une simulation du fonctionnement sain et avec défaut de court-circuit entre spires de la machine asynchrone à cage d'écureuil.

Dans un premier temps nous allons présenter le modèle triphasé-triphasé en citant les hypothèses simplificatrices utilisés pour modéliser cette machine en l'absence de défaut, puis nous introduirons le court-circuit entre spires dans le modèle considéré.

IV.2 Modèle triphasé-triphasé de la MAS en l'absence de défaut

IV.2.1 Présentation du modèle

La machine asynchrone à cage d'écureuil est constituée de trois enroulements logés symétriquement dans les encoches du stator et d'une cage d'écureuil conductrice au rotor. Cette dernière est assimilable à trois enroulements en court-circuit et identiques, en fonctionnement sain [20].

On modélise la machine asynchrone à cage dans le repère a, b, c en émettant les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Les pertes fer sont négligées.
- La saturation du circuit magnétique est négligée.
- L'effet d'extrémité des têtes de bobines est négligé.
- Le stator est considéré comme lisse et l'entrefer constant (l'effet des encoches est négligé).
- La cage rotorique est assimilée à un système triphasé dont les phases sont en courts-circuits.
- Les harmoniques de toute origine, autre que temporel, sont négligés.

La figure (IV.1) montre la représentation spatiale d'une machine asynchrone à cage comprenant un enroulement triphasé au stator (S_a, S_b, S_c) comme au rotor (R_a, R_b, R_c).

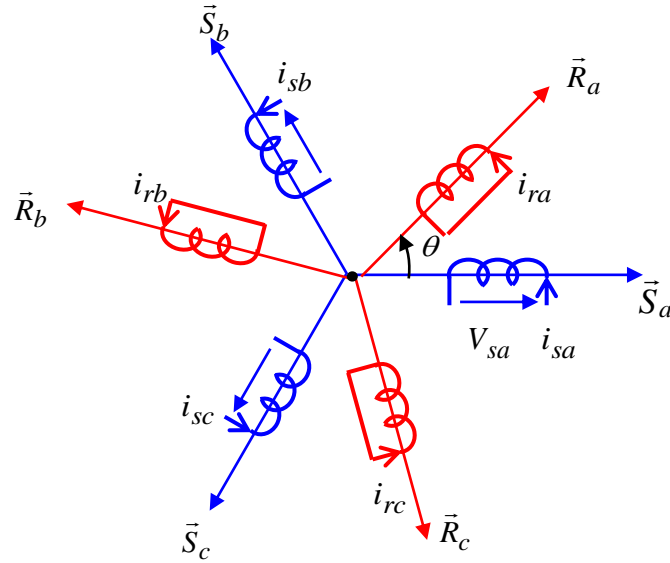


Figure IV.1 Représentation du modèle triphasé/triphasé.

IV.2.2. Equations électriques de la machine asynchrone

Les équations des tensions régissant le fonctionnement d'une machine asynchrone s'écrivent sous forme matricielle [21] :

$$\begin{cases} [V_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{sabc}] \\ [V_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{rabc}] \end{cases} \quad (\text{IV.1})$$

Avec :

$$[V_{sabc}] = [V_{sa} \quad V_{sb} \quad V_{sc}]^T \quad \text{Les tensions appliquées aux trois phases statoriques}$$

$$[i_{sabc}] = [i_{sa} \quad i_{sb} \quad i_{sc}]^T \quad \text{Les courants qui traversent celle-ci.}$$

$$[V_{rabc}] = [0 \quad 0 \quad 0]^T \quad \text{Les tensions nulles du rotor étant la cage rotorique en court-circuit.}$$

$$[i_{rabc}] = [i_{ra} \quad i_{rb} \quad i_{rc}]^T \quad \text{Les courants rotoriques traversant les phases du rotor.}$$

Les flux totalisés des phases statoriques et rotoriques s'expriment sous la forme :

$$\begin{cases} [\Phi_{sabc}] = [L_s][i_{sabc}] + [M_{sr}][i_{rabc}] \\ [\Phi_{rabc}] = [L_r][i_{rabc}] + [M_{rs}][i_{sabc}] \end{cases} \quad (\text{IV.2})$$

$[R_s], [L_s]$ et $[R_r], [L_r]$ sont les matrices des résistances et inductances statoriques et rotoriques respectivement :

$$[R_s] = \begin{pmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{pmatrix}; [L_s] = \begin{pmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{pmatrix}$$

$$[R_r] = \begin{pmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{pmatrix}; [L_r] = \begin{pmatrix} l_r & m_r & m_r \\ m_r & l_r & m_r \\ m_r & m_r & l_r \end{pmatrix}$$

Quand a la matrice des inductances mutuelles $[M_{sr}]$ elle est définie comme suit :

$$[M_{sr}] = M_{sr} \begin{pmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta \end{pmatrix}$$

M_{sr} : La valeur maximale des mutuelles stator-rotor ($M_{sr} = \frac{2}{3}M$).

En introduisant les équations (IV.2) dans (IV.1), nous obtenons le système d'équations électriques nécessaire à l'étude du fonctionnement de la machine :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d\{[L_s][I_s]\}}{dt} + \frac{d\{[M_{sr}][I_r]\}}{dt} \quad (\text{IV.3})$$

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d\{[L_r][I_r]\}}{dt} + \frac{d\{[M_{rs}][I_s]\}}{dt} \quad (\text{IV.4})$$

IV.2.3. Equations mécaniques de la machine

Les équations mécaniques qui régissent le fonctionnement de la machine asynchrone peuvent se mettre sous la forme :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_e - C_r - C_f \quad (IV.5)$$

$$C_f = f\Omega ; \quad \Omega = Pw \quad \text{où} \quad w = \frac{d\theta}{dt} \quad (IV.6)$$

L'expression du couple électromagnétique C_e peut être déterminée grâce à la relation :

$$C_e = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix}^T \frac{d\theta}{dt} \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix} \quad (IV.7)$$

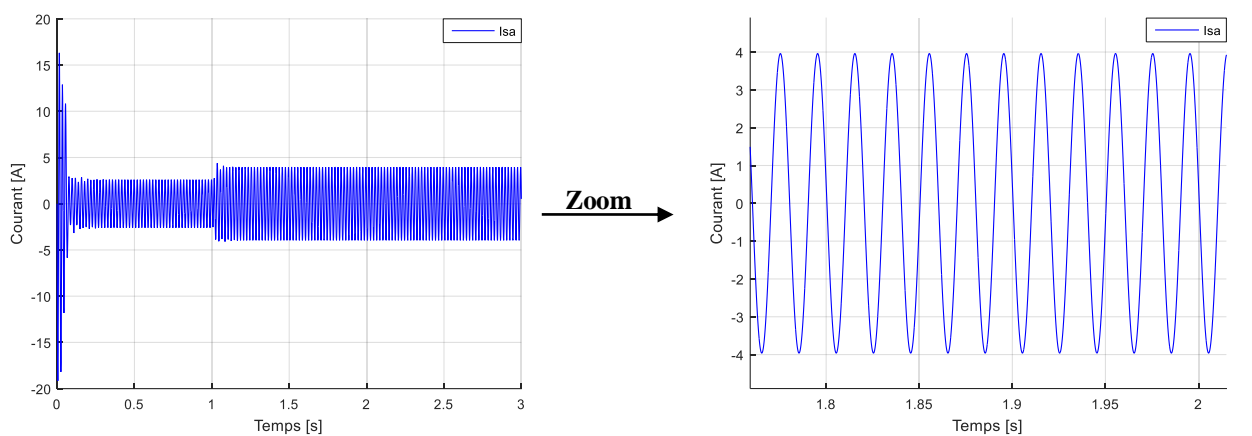
Finalement, si on résume les équations électriques et mécaniques qui régissent le fonctionnement de la machine asynchrone on a :

$$\left\{ \begin{array}{l} [V_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{sabc}] \\ [\Phi_{sabc}] = [L_s][i_{sabc}] + [M_{sr}][i_{rabc}] \\ [V_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{rabc}] \\ [\Phi_{rabc}] = [L_r][i_{rabc}] + [M_{rs}][i_{sabc}] \\ J \frac{d\Omega}{dt} = C_e - C_r - C_f \\ w = \frac{d\theta}{dt} \end{array} \right. \quad (IV.8)$$

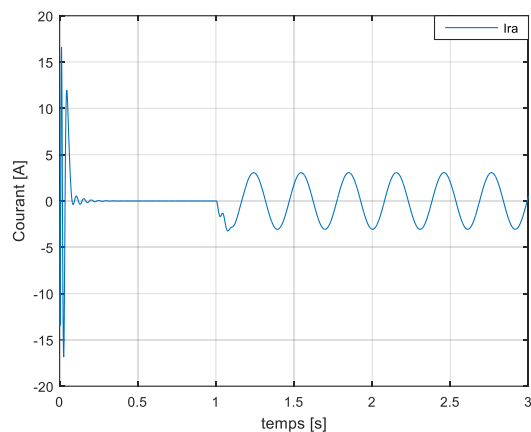
IV.2.4. Résultats de simulation d'un fonctionnement sain

Les paramètres du moteur utilisé en simulation, sont présentés dans l'annexe 1.

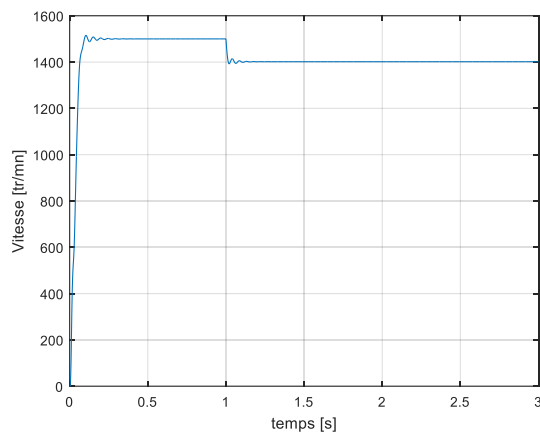
Nous pouvons étudier l'évolution de grandeurs temporelles telles que les courants, le couple et la vitesse de rotation lorsque la machine ne présente aucune défaillance.



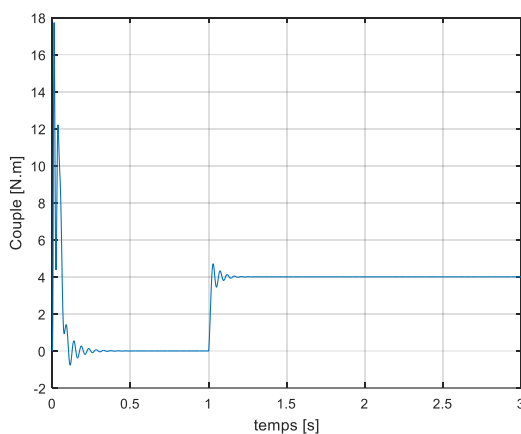
a- Le courant statorique.



b- Le courant rotorique.



c- La vitesse de rotation.



d- Le couple électromagnétique.

Figure IV.2 Résultats de simulation de la MAS démarrage à vide suivie d'une application de charge de 4 N.m à $t=1\text{ s}$.

La figure (IV.2) montre, l'évolution des courants de la machine, la vitesse de rotation et le couple électromagnétique, lors d'un démarrage à vide sous une tension nominale avec une alimentation sinusoïdale équilibrée. A l'instant $t = 1$ s, nous procédons à un échelon de couple résistant de 4 Nm.

Les résultats de simulation montre que : l'application d'une charge (à $t=1$ s) conduire une augmentation du courant statorique (figure IV.2.a) et une diminution de la vitesse (figure IV.2.c).

IV.2. Modèle triphasé-triphasé de la MAS avec défauts statoriques de type court-circuit

Il s'agit de modéliser une machine fictive équivalente dont le stator et le rotor sont toujours constitués de trois phases identiques parcourues par des courants triphasés. Pour prendre en compte l'existence de spires en court-circuit au stator de la machine asynchrone, on introduit une bobine supplémentaire court-circuitée dont le nombre de spires n_{cc} , est égal au nombre de spires en défaut dans la machine [22]. Ainsi, en présence d'un déséquilibre statorique, la machine comporte, en plus des bobinages triphasés statoriques d'axes a_s b_s c_s et rotoriques d'axes a_r b_r c_r , un bobinage court-circuité à l'origine du champ stationnaire par rapport au stator, crée en situation de défaut.

La figure (IV.3) illustre le stator d'une machine asynchrone à une paire de pôles avec court-circuit sur la phase b_s du stator. On peut constater que le défaut fait apparaitre dans la machine un nouveau bobinage B_{cc} , dont le nombre de spires est égal au nombre de spires en court-circuit et la direction égale à $\frac{2\pi}{3}$ (direction de la phase b_s). Afin de définir ce défaut, il est nécessaire d'introduire deux paramètres :

- L'angle électrique noté θ_{cc} , repérant le bobinage en court-circuit par rapport à l'axe de référence de la phase a_s . Ce paramètre permet la localisation du bobinage en défaut et ne peut prendre que les trois valeurs 0 , $\frac{2\pi}{3}$ ou $-\frac{2\pi}{3}$, correspondant respectivement à un court-circuit sur les phases a_s , b_s ou c_s .
- Le rapport de court-circuit noté η_{cc} égal au rapport du nombre de spires en court-circuit sur le nombre total de spires dans une phase statorique sans défaut. Ce paramètre permet de quantifier le déséquilibre et d'obtenir le nombre de spires en court-circuit.

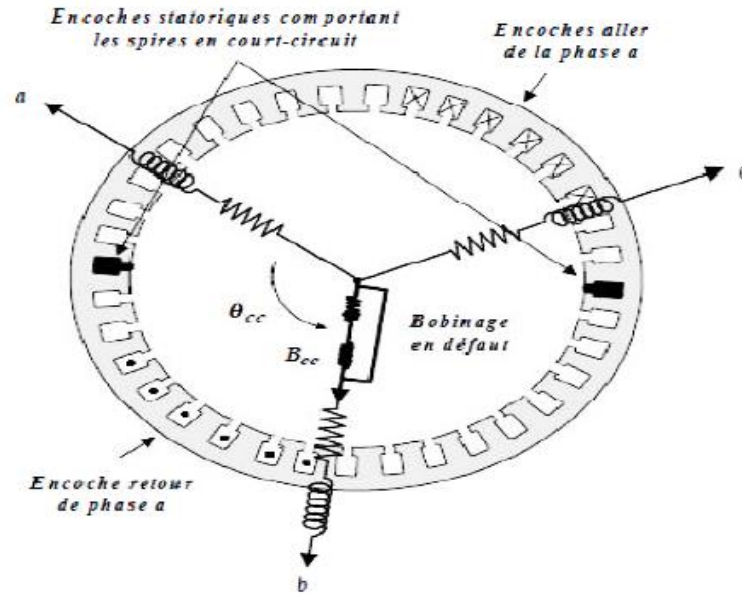


Figure IV.3 Court-circuit de spires sur la phase *b* du stator.

Nous allons maintenant exprimer les différentes équations de tensions et de flux de la machine asynchrone en présence d'un défaut statorique de type court-circuit, en introduisant les paramètres électriques de la bobine en court-circuit B_{cc} .

Les équations électriques des trois phases statoriques et rotoriques servent de point de départ à l'élaboration du modèle dynamique de la machine asynchrone à cage. Une machine asynchrone triphasée à cage d'écoreuil est constituée au stator de trois bobines alimentées par une source triphasée et au rotor, de trois bobines fictives équivalentes en court-circuit. On définit les vecteurs de tensions et de courants statoriques par $[V_{sabc}]$ et $[I_{sabc}]$ ainsi que le vecteur des tensions et courants rotoriques $[V_{rabc}]$ et $[I_{rabc}]$ par sur les trois bobinages triphasés au stator et au rotor :

$$[V_{sabc}] = [V_{sa} \quad V_{sb} \quad V_{sc}]^T \quad (\text{IV.9})$$

$$[i_{sabc}] = [i_{sa} \quad i_{sb} \quad i_{sc}]^T \quad (\text{IV.10})$$

$$[V_{rabc}] = [0 \quad 0 \quad 0]^T \quad (\text{IV.11})$$

$$[i_{rabc}] = [i_{ra} \quad i_{rb} \quad i_{rc}]^T \quad (\text{IV.12})$$

Les équations de tensions et de flux de la machine asynchrone en défaut de court-circuit s'écrivent alors :

$$[V_{sabc}] = [R_s][I_{sabc}] + \frac{d[\phi_{sabc}]}{dt} \quad (\text{IV.13})$$

$$[V_{rabc}] = [R_s][I_{rabc}] + \frac{d[\phi_{rabc}]}{dt} \quad (\text{IV.14})$$

$$0 = R_{cc}I_{cc} + \frac{d\phi_{cc}}{dt} \quad (\text{IV.15})$$

$$[\phi_{sabc}] = [L_s][I_{sabc}] + [M_{sr}][I_{rabc}] + [M_{sccabc}]I_{cc} \quad (\text{IV.16})$$

$$[\phi_{rabc}] = [L_r][I_{rabc}] + [M_{rs}][I_{sabc}] + [M_{rccabc}]I_{cc} \quad (\text{IV.17})$$

$$\phi_{cc} = [M_{ccs}][I_{sabc}] + [M_{ccr}][I_{rabc}] + L_{cc}I_{cc} \quad (\text{IV.18})$$

Avec :

$$L_{cc} = \eta_{cc}^2 L_s$$

$$R_{cc} = \eta_{cc} R_s$$

$$\eta_{cc} = \frac{n_{cc}}{n_s}$$

$$[M_{ccs}] = \eta_{cc} M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_{cc}) & \cos(\theta_{cc} - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_{cc} + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

$$[M_{scc}] = [M_{ccs}]^T$$

$$[M_{ccr}] = \eta_{cc} M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_{cc} - \theta) & \cos(\theta_{cc} - \theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_{cc} - \theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

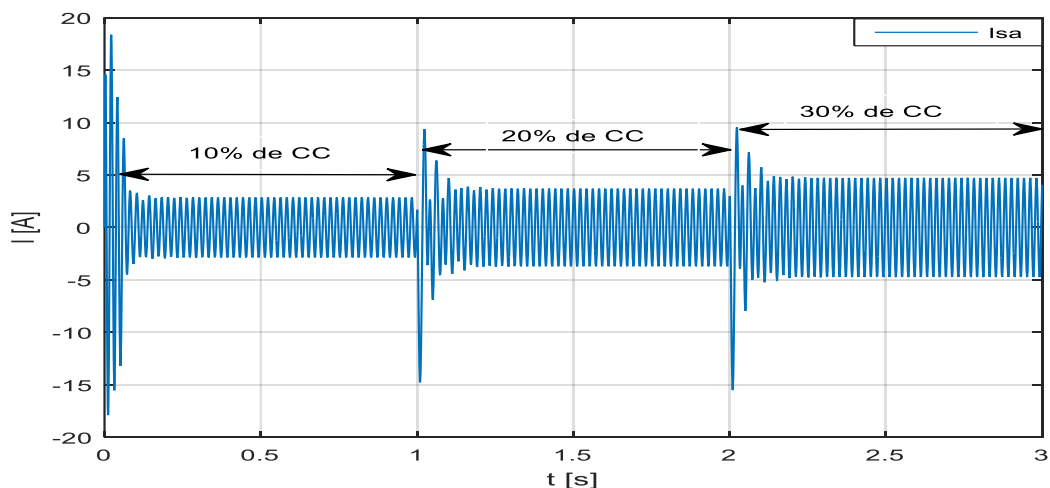
$$[M_{rcc}] = [M_{ccr}]^T$$

θ_{cc} : l'angle électrique, repérant le bobinage en court-circuit par rapport à l'axe de référence de la phase a_s .

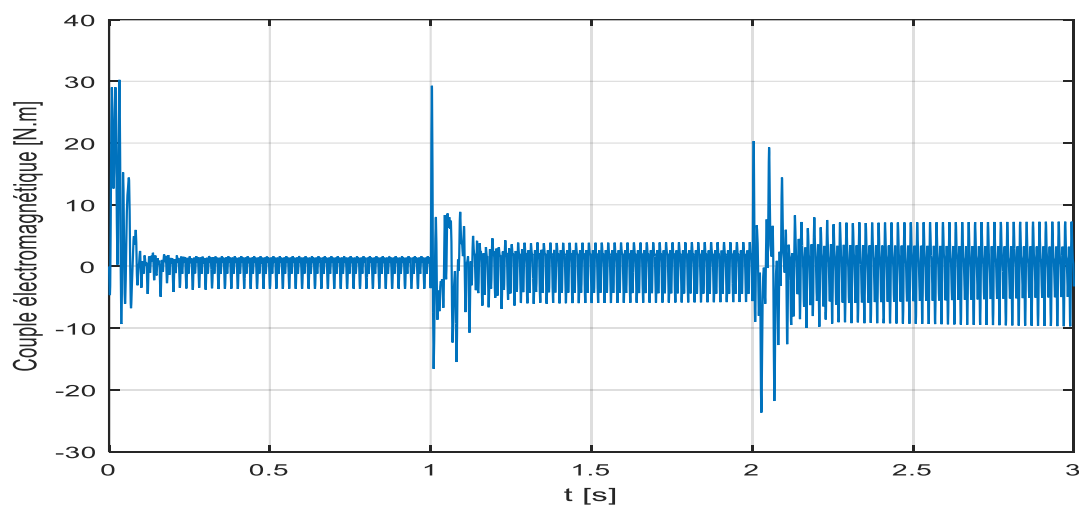
IV.2.1. Résultats de simulation avec défaut de court-circuit

Le court-circuit est un des défauts les plus fréquents au stator. Nous pouvons étudier l'évolution de grandeurs temporelles telles que les courants, le couple et la vitesse de rotation lorsque la machine présente un défaut.

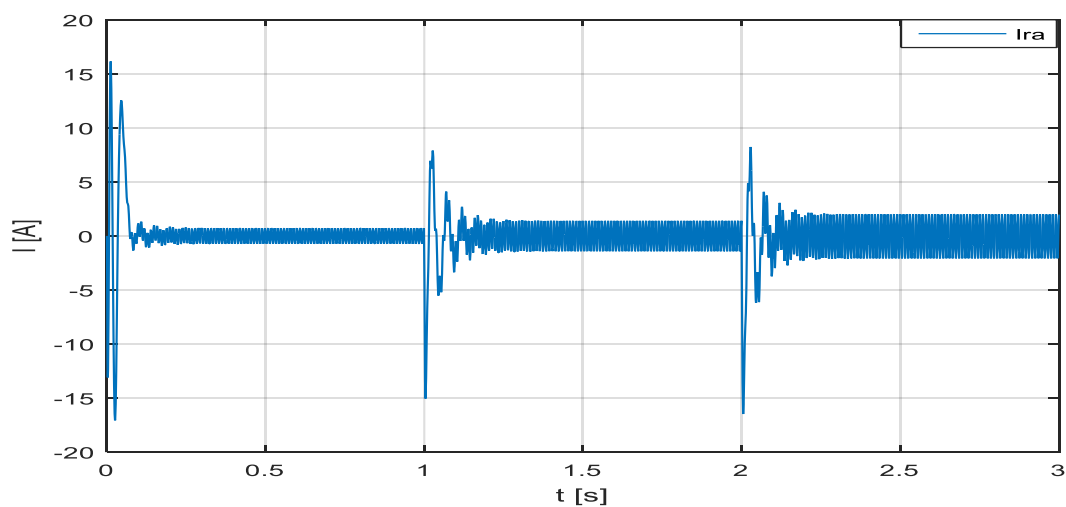
Pour mettre en évidence l'effet du défaut de court-circuit sur les performances du moteur, nous simulons trois courts-circuits successifs, le premier de 10 % de court-circuit pour $t \in [0, 1[$ (s), le deuxième court-circuit de 20% pour $t \in [1, 2[$ (s), et ensuite d'un troisième court-circuit de 30% pour $t \in [2, 3]$ (s).



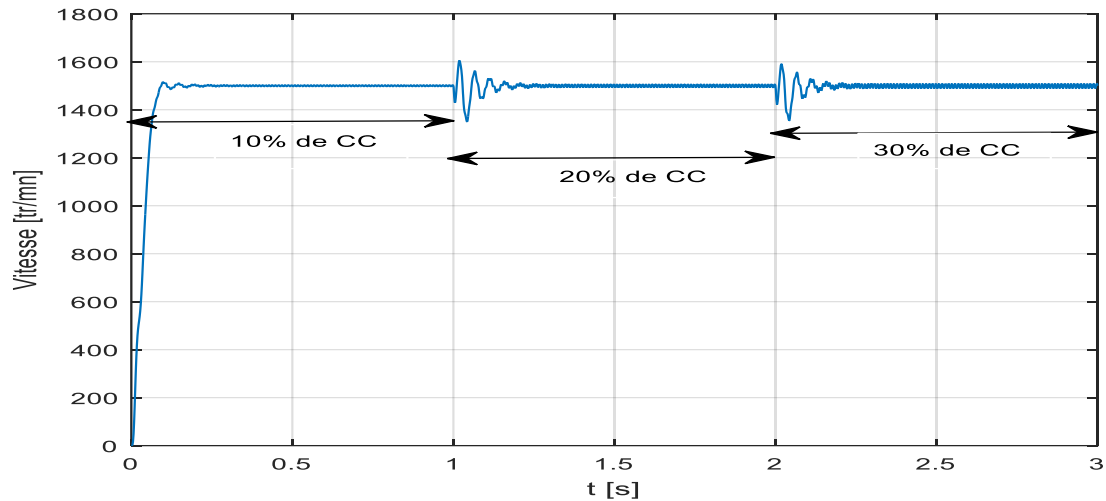
a- Le courant statorique.



b- Le courant rotorique.



c- Couple électromagnétique.



d- Vitesse de rotation.

Figure IV.4. Résultats de simulation de la MAS avec défaut de court-circuit « 10%, 20% et 30% de court-circuit ».

La figure (IV.4) montre l'influence de ce défaut sur le couple, la vitesse, le courant statorique et rotorique. On constate que le court-circuit crée des oscillations dans le couple et dans la vitesse, ainsi qu'une modulation du courant statorique et rotorique. Les amplitudes de ces oscillations et ces modulations augmentent avec l'augmentation du pourcentage de défaut. L'analyse de la figure (IV.4) montre que l'influence du défaut sur les performances du moteur dépend de la sévérité du défaut de court-circuit.

IV.2.2. Analyse spectrale du courant statorique

L'analyse des courants statoriques dans le domaine fréquentiel reste la méthode la plus couramment utilisée car le spectre résultant contient une source de renseignement sur la majorité des défauts qui pouvant apparaître au sein d'une machine asynchrone.

Les figures (IV.5), (IV.6), (IV.7) et (IV.8) représentent respectivement l'analyse spectrale des signaux du courant statorique dans l'état sain et avec défaut de court-circuit pour différent pourcentage de défaut (10% ; 20% et 30%).

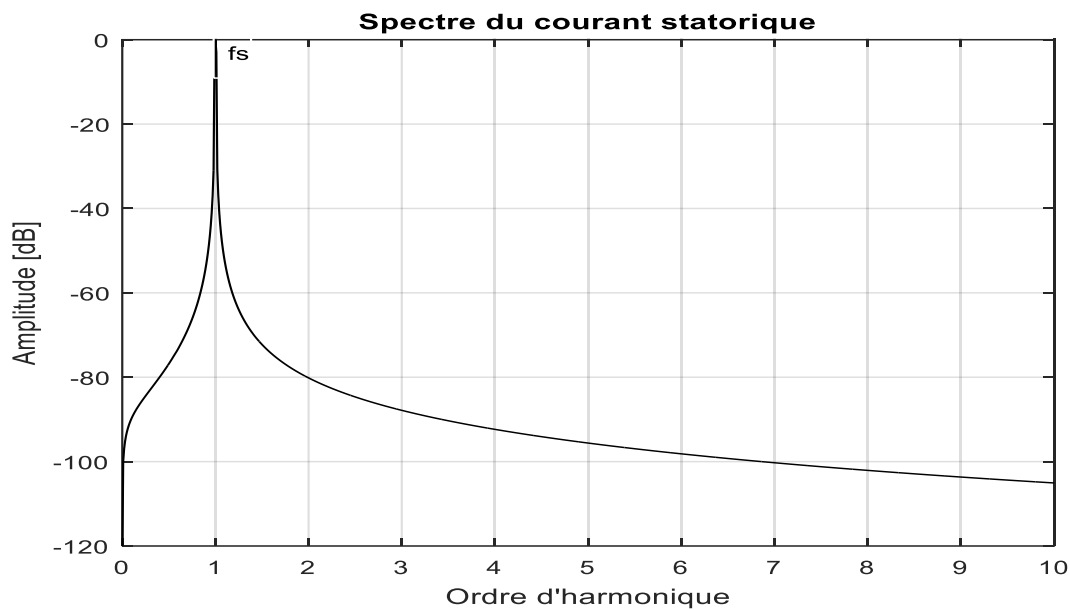


Figure IV.5. L'analyse spectrale du courant statorique dans l'état sain.

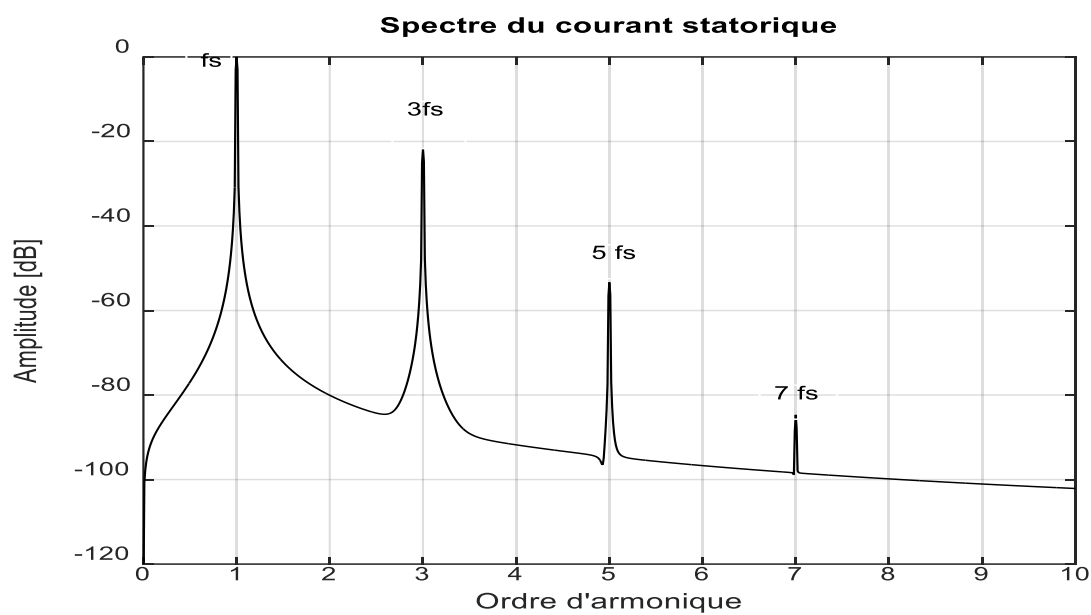


Figure IV.6. L'analyse spectrale du courant statorique cas d'un défaut de court-circuit « de 10% ».

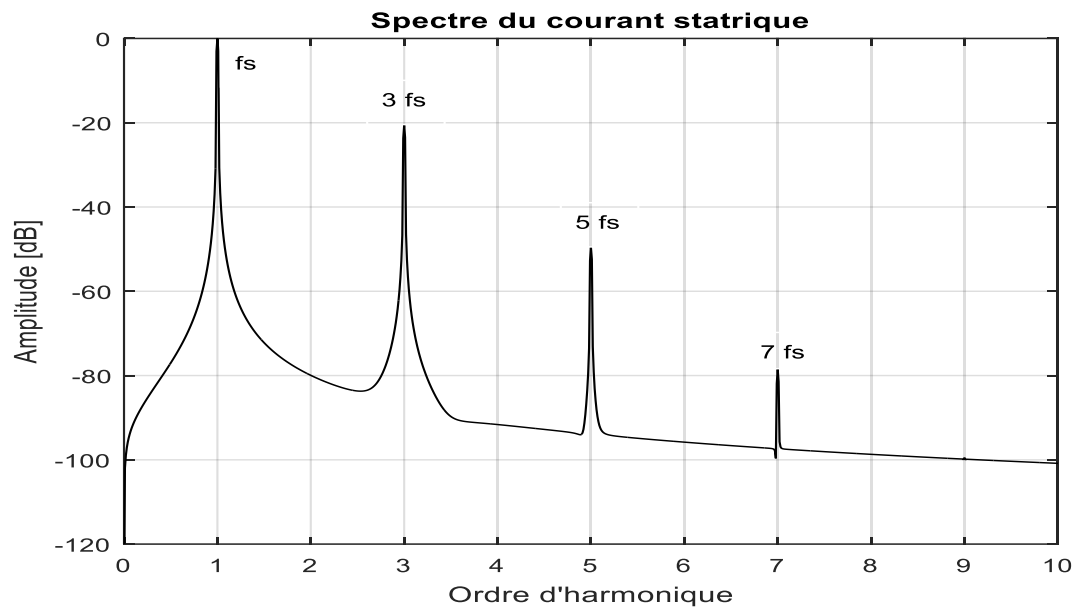


Figure IV.7. L'analyse spectrale du courant statorique cas d'un défaut de court-circuit « de 20% ».

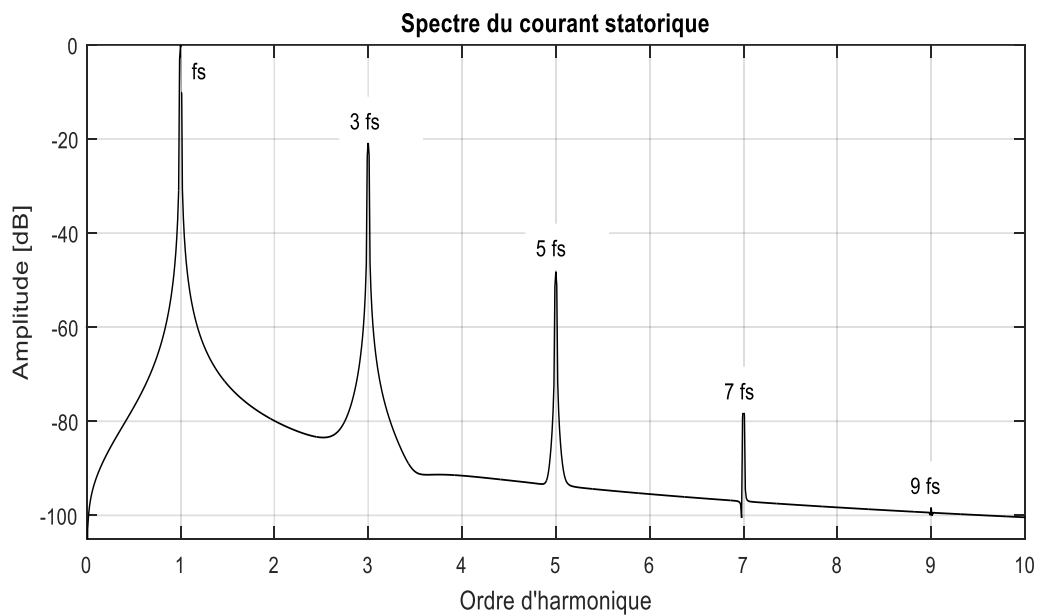


Figure IV.8. L'analyse spectrale du courant statorique cas d'un défaut de court-circuit « de 30% ».

On conclut que les amplitudes des raies kf_s , où $k=1, 3, 5, \dots$, augmente avec le pourcentage du défaut de court-circuit. L'harmonique d'ordre 9 est apparait dans le cas de 30% de court-circuit. Les résultats de simulation sont d'accord avec les résultats expérimentaux de [23].

Tableau IV.1 Résume les amplitudes des spectres.

Etat du moteur	Amplitude [dB]			
	3	5	7	9
Sain	/	/	/	/
10% de court-circuit	- 24.76	- 53.35	- 84.68	/
20% de court-circuit	- 20.58	- 49.55	- 78.5	/
30% de court-circuit	- 20.52	- 48.21	- 75.93	- 98.29

IV.4 Conclusion

Parmi les modèles les plus utilisés (modèle de Park ; triphasé-triphasé ; multi-enroulements ; multi-spines) nous avons choisi le modèle triphasé-triphasé qui permet de voir les dissymétries qui peuvent apparaître lors du défaut. Cependant, sa complexité rend l'observation lourde et nécessite des ressources de calcul importantes. Nous avons également développé la modélisation de la machine asynchrone comportant un défaut de court-circuit. Pour cela, nous avons opté pour le modèle triphasé-triphasé car il permettait de simuler les défauts sur les phases de la machine directement sans passer par aucune transformation.

Conclusion générale



Conclusion générale

Le diagnostic et la surveillance des systèmes électriques sont de plus en plus utilisés dans la plupart des domaines industriels, d'où l'intérêt grandissant porté à ce sujet. La machine asynchrone étant l'élément le plus utilisé et l'un des plus importants dans les systèmes électriques, sa surveillance et son diagnostic ont fait et font toujours l'objet de plusieurs études.

Au début, nous avons rappelé les principaux éléments de constitution de la machine asynchrone à cage. Puis nous avons présenté les différents défauts qui peuvent apparaître dans les machines asynchrones avec leurs causes et leurs conséquences.

Dans le deuxième chapitre, les différentes fonctions et les différents niveaux de la maintenance sont présentés avec un des notions autour du diagnostic et la surveillance des systèmes.

Après, nous avons scindé les différentes méthodes de diagnostic de ces défauts en deux approches : signal et système. Le diagnostic des défauts par l'analyse spectrale du courant statorique en régime permanent est largement la méthode la plus utilisée par les auteurs pour plusieurs raisons, notamment, à cause de l'accessibilité du courant statorique extérieurement, et surtout pour la sensibilité des harmoniques associées aux défauts de la machine par rapport aux sévérités de ces derniers.

Le dernier chapitre , présente essentiellement la modélisation de la machine. En effet, la modélisation et la simulation des machines constituent une étape primordiale en matière de diagnostic. Elles permettent la compréhension du fonctionnement défectueux, la vérification sur prototype virtuel de l'efficacité des algorithmes de détection de défauts et elles apportent également la possibilité de construire des bases de données sur les manifestations électriques et magnétiques de ces défauts. Nous avons présenté le modèle triphasé-triphasé qui donne des résultats de simulation en l'absence et en présence de défauts. Ces résultats sont en bonne d'accord avec résultats de la littératures.

En conclusion le travail effectué dans le cadre de ce mémoire touche plusieurs points et montre l'importance d'un diagnostic efficace et précis. Nous avons ouvert plusieurs portes dans le domaine de la recherche qui peuvent être des perspectives.

A la suite de ces travaux, plusieurs perspectives pour des travaux futurs peuvent être dressées :

- Applications industrielles des techniques explorées et proposées, afin de converger vers une maintenance plus efficace des machines.
- Il serait intéressant de tester sur la machine asynchrone, et détecter leurs défauts.
- Diagnostic des défauts dans les machines asynchrones à cage d'écureuil avec une vitesse variable ou supérieure à la vitesse nominale (même pour les basses vitesses).
- Utiliser les capteurs & l'analyseur de spectre pour plus de validation des résultats obtenus.
- Des différents défauts peuvent être dans la machine asynchrone. Par exemple, le défaut de déséquilibre, défaut de court-circuit entre spires ou entre phases, etc....

Bibliographie :

- [1] Khemchane, Nour, Arezki Tizzaoui, and Zina Azez. "Technique de diagnostic des défauts statorique d'un moteur asynchrone ", Diss. Université de Bejaïa, 2017.
- [2] Mayé, P. (2012). Aide-mémoire électrotechnique.
- [3] Site web <https://www.energieplus-lesite.be>.
- [4] F.Babaa, « Contribution à la modélisation et à la commande de la machine asynchrone : " Application au diagnostic des défauts statoriques. » Diss. Thèse de Doctorat, université de Mentouri, Constantine, Algérie, 2014.
- [5] Bousseksou, Radouane. "Modélisation analytique des machines asynchrone. Application au diagnostic." Mémoire de Magister, université de Mentouri, Constantine, Algérie, 2007.
- [6] Bapio BAYALA « La Machine Asynchrone », Edition Revue 2010.
- [7] A. Seghiour, “ Diagnostic des Machines Electriques par l'Analyse du Champ Magnétique Application à l'Identification des Défauts ”, Thèse de Doctorat, université de Amar Thelidji, Laghouat, Algérie, 2017.
- [8] Tarek BOUMEGOURA « Recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateur en vue du diagnostic ». Thèse de Doctorat, l'école doctorale électronique, électrotechnique, automatique de Lyon. Soutenue le 26 mars 2001.
- [09] Bhowmik, Partha Sarathee, Sourav Pradhan, and Mangal Prakash. "Fault diagnostic and monitoring methods of induction motor: a review." International Journal of Applied Control, Electrical and Electronics Engineering (IJACEEE) 1.1 (2013): 1-18.
- [10] Jean Hég, « Pratique de LA Maintenance Préventive –Mécanique » Pneumatique - Hydraulique- Electrique- Froide Édition Afnor, Dunod, 2002.
- [11] Tahar BELKHIR- Med Mohcen BEN SACI “ La maintenance des équipements par l'analyse vibratoire ”, Mémoire De Fin d'Etude, Université Kasdi Marbah Ourgla, 2016.
- [12] BOURAIOU Ahmed' DIAGNOSTIC DE DEFAUTS PAR LOGIQUE FLOUE' mémoire de magistère, université de Annaba, 2010.
- [13] Saadi SAKHARA, ”diagnostic des défauts d'un entrainement électrique par la technique ondelette”, Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar- Annaba, Algérie, 2017.

- [14] Didier, Gaëtan, et al. "Fault detection of broken rotor bars in induction motor using a global fault index." *IEEE Transactions on industry applications* 42.1 (2006) : 79-88.
- [15] H. Hacene, "Identification et surveillance de processus dynamiques complexes par logique floue. Application à un échangeur de chaleur." Université M'hamed Bougara de Boumerdès, 2007.
- [16] D. Berdjag, "Méthodes algébriques pour la décomposition de modèles comportementaux : Application à la détection et à la localisation de défaillances." Université des Sciences et Technologie de Lille-Lille I, 2007.
- [17] F. Castang, "Synthèse robuste de filtres de diagnostic pour la surveillance à base de modèle des systèmes multi variables et incertains." Bordeaux 1, 2003.
- [18] Gaëtan DIDIER, «Modélisation et Diagnostic de la Machine Asynchrone en présence de défaillances», Thèse Doctorat, l'université Henri Poincaré 2004.
- [19] R.Casimir, " Diagnostic des Défaut des Machines Asynchrones par Reconnaissance des Formes ", Thèse de Doctorat, L'Ecole Centrale de Lyon, Décembre 2003.
- [20] O. Ondel « Diagnostic par reconnaissance des formes : application à un ensemble convertisseur machine asynchrone ». Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon, 2006.
- [21] A. Ibrahim, "Contribution au diagnostic de machines électromécaniques : Exploitation des signaux électriques et de la vitesse instantanée ", Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale Sciences, Ingénierie, Santé, Diplôme délivré par l'Université Jean Monnet, le 10 Mars 2009.
- [22] E. Schaeffer, "Diagnostic des machines asynchrones : modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défauts", Thèse de doctorat, Université de Nantes, France, 1999.
- [23] A. Boumessata, "Diagnostic des défauts de court-circuit de la machine asynchrone", Mémoire de Master, université de Mentouri, Constantine, Alger, 2011.

Annexe 1

➤ Caractéristiques de la machine

Puissance	1.1 kW
Fréquence	50 Hz
Tension nominale	400 V
Courant nominal	2.75 A
$\cos(\varphi)$	0.77
Vitesse nominale	1500 tr/mn
Nombre de paires de pôles	2
Nombre d'encoches statoriques	24
Nombre de barres au rotor	22
Nombre de spires par phase	94

➤ Les paramètres du moteur, utilisé en simulation

$$P = 1.1 \text{ Kw}$$

$$R_s = 8.85 \Omega$$

$$R_r = 5.89 \Omega$$

$$L_s = 380.6 \text{ mH}$$

$$L_r = 382.3 \text{ mH}$$

$$M = 0.3677 \text{ (L'inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor } M = \frac{3}{2} Msr)$$

$$J = 0.0039 \text{ Kg.m}^2$$

$$p = 2$$

$$l_s = L_s - m_s : \text{L'inductance cyclique statorique.}$$

$$l_r = L_r - m_r : \text{L'inductance cyclique rotorique.}$$

المخلص:

يتطرق عملنا هذا إلى صيانة وطرق تشخيص الأعطال في الآلة اللازامية ذات قفص السنجاب، نظرا لما تحتله من مكانة في الميدان الصناعي لموثوقيتها، قوتها، سهولة صيانتها و صلابتها. تم إبراز مختلف تقنيات تشخيص الآلة اللازامية بمقاربتين: مقارنة الإشارة التي تعتمد على قياس وتحليل المقادير كإشارتي التيار والجهد... ومقاربة النظام، حيث ركزنا على أكثر التقنيات المستعملة حاليا.

قمنا بمحاكاة سلوك المحرك في حالة وجود وغياب عطل (دائرة قصيرة بين لفات طور الجزء الساكن) باستعمال نموذج ثلاثي الأطوار للآلة اللازامية. قمنا بأخذ المقادير ودراستها من خلال التحليل الطيفي للإشارة. كانت النتائج المتحصل متوافقة مع تلك التجريبية.

الكلمات المفتاحية: آلة لآزامية، صيانة، تشخيص، أعطال، التحليل الطيفي.

Résumé:

Notre travail porte sur la maintenance et le diagnostic des défauts de la machine asynchrone à cage d'écuréuil en raison de sa position industrielle en termes de fiabilité, robustesse et sa facilité de maintenance. Les différentes techniques de diagnostic de la machine asynchrone ont été mises en évidence avec leurs deux approches: l'approche du signal qui dépend de la mesure et de l'analyse des grandeurs telles que les signaux de courant et de tension..., et l'approche du système, où nous nous sommes focalisés sur les techniques les plus utilisés actuellement.

Nous avons simulé le comportement du moteur en cas d'existence et d'absence de défaillance (court-circuit entre spires d'une phase statorique) en utilisant un modèle triphasé de la machine asynchrone. Nous avons pris les grandeurs et les avons étudiés à travers l'analyse spectrale des signaux. Les résultats obtenus sont conformes aux résultats expérimentaux.

Mots-clés : Machine asynchrone, maintenance, diagnostic, défauts, analyse spectrale.

Abstract :

Our work focuses on the maintenance and fault diagnosis of the squirrel cage asynchronous machine due to its industrial position in terms of reliability, robustness and ease of maintenance. The various diagnostic techniques of the asynchronous machine have been highlighted with their two approaches: the approach of the signal which depends on the measurement and the analysis of magnitudes such as current and voltage signals ..., and the system approach, where we focused on the most currently used techniques.

We simulated the behavior of the motor in case of existence and absence of failure (short circuit between turns of a stator phase) using a three-phase model of the asynchronous machine. We took the magnitudes and studied them through the spectral analysis of the signals. The results obtained are in agreement with the experimental results.

Keywords: Asynchronous machine, maintenance, diagnosis, defects, spectral analysis.