

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ibn Khaldoun de Tiaret

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Mécanique



## MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du Diplôme de Master

**Domaine :** Sciences et Technologie

**Filière :** Electromécanique

**Parcours :** Master

**Spécialité :** Maintenance Industrielle

**Thème**

**Diagnostic de défauts des machines asynchrone**

Préparé par :

-Safi mansour

-Djerboub aboubakr

Soutenu publiquement le 19 / 06 / 2023, devant le jury composé de :

M. BOUREGUIG Kada	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Président
M. ARARIA Rabah	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M <sup>me</sup> ASRI Aicha	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineurs
M <sup>me</sup> . SLIMANI Halima	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Encadrant

Année universitaire : 2022 - 2023

# *Remerciements*

Avant tout, Nous voudrions exprimer notre plus profonde gratitude à Allah le Tout-puissant de nous avoir accordé la santé et la volonté de compléter ce mémoire de fin etude. Tout d'abord, nous n'aurions pas pu faire ce précieux travail sans l'aide et les conseils de notre encadrant Madame Slimani Halima, Maître de Conférences classe "A" à l'université Ibn Khaldoun de Tiaret, nous la remercions pour son soutien exceptionnel, sa patience et sa volonté tout au long de la préparation de ce mémoire.

Nous tenons également à remercier vivement les membres du jury de l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail, en commençant par Mr. BOUREGUIG Kada Maître de Conférences à l'université Ibn Khaldoun de Tiaret qui a accepté de présider ce jury. Nous adresse également nous sincères remerciements à Mr. ARARIA Rabah et Madame ASRI Aicha Maîtres de Conférences à l'université Ibn Khaldoun - Tiaret qui nous ont fait l'honneur d'être les examinateurs de ce travail.

Nous sommes reconnaissants à nos chers professeurs, sans qui nous ne serions pas arrivés là où nous sommes aujourd'hui. Ces personnes ont joué un rôle essentiel dans notre parcours universitaire et nous leur sommes reconnaissants pour leur soutien, leurs précieux enseignements et leur inspiration constante.

Enfin, nous voudrions exprimer notre plus profonde gratitude à nos familles et amis pour leur soutien et leurs encouragements continus tout au long de cette expérience. Leur amour, leur compréhension et leur présence ont été une source inestimable de motivation et de force.

Nous tenons à remercier sincèrement toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

Merci tout le monde.

# *Dédicace*

*À nos chers pères, les piliers solides de nos vies*

*À nos chères mères, les bougies qui éclairent notre chemin*

*À nos sœurs et frères, les compagnons de voyage constants*

*Et à nos chers amis, les âmes lumineuses qui illuminent nos vies*

*Merci à tous pour votre présence et votre soutien continu, et nous attendons avec impatience un avenir lumineux rempli de défis et de réalisations que nous atteindrons ensemble."*

## *Sommaire*

Introduction générale .....	II
-----------------------------	----

### **Chapitre I : Notions générales sur la maintenance**

I.1 Introduction .....	2
I.2 L'histoire de la maintenance .....	2
I.3 Définition et les activités de la maintenance .....	3
I.3.1 Définition de la maintenance .....	3
I.3.2 Les notions de maintenance .....	3
I.3.3 Les activités de la maintenance .....	3
I.3.3.1. Des exemples sur les activités de maintenance .....	4
I.4 Les types de la maintenance .....	5
I.4.1 Maintenance préventive .....	7
I.4.1.1 Définition : .....	7
I.4.1.2 Les opérations de la maintenance préventive .....	7
I.4.1.3 Différents types de maintenance préventive .....	8
I.4.2 Maintenance corrective .....	9
I.4.2.1 Les Opérations de la maintenance corrective .....	9
I.4.3 Autre type de la maintenance .....	10
I.4.3.1 La maintenance améliorative .....	10
I.5 Les niveaux de maintenance .....	11
I.6 Les méthodes de diagnostic en maintenance .....	12
I.6.1 Méthode ABC (Diagramme Pareto) .....	12
I.6.1.1 Le But de la méthode ABC .....	13
I.6.2. Méthode de 5m .....	13
I.6.3 Méthode de L'AMDEC .....	14
I.6.3.1 Mise en œuvre de la méthode AMDEC .....	15

I.6.4 Arbre de défaillance .....	16
I.6.4.1 Symbolisme.....	16
I.7 Conclusion.....	17

**Chapitre II : défaillances des machines asynchrones**

II.1 Introduction.....	19
II.2. Classification des machines électriques tournantes .....	19
II.3 Généralité sur les moteurs asynchrones .....	20
II.4 Constitution d'une Mmoteur Asynchrone.....	20
II.4.1 Constitution du stator .....	21
II.4.2 Constitution du rotor .....	22
II.5 Fonctionnement du moteur asynchrone .....	24
II.5.1 Fonctionnement à vide.....	24
II.5.2 Fonctionnement en charge .....	25
II.6 Les avantages et les inconvénients des machines asynchrones .....	25
II.7 Les déferrent défauts de la machine asynchrone .....	25
II.7.1 Étude statique des défaillances de la machine asynchrone .....	25
II.7.2 Types des défauts de La machine asynchrone .....	27
II.7.3 Présentation des différentes défauts.....	27
II.7.3.1 Défauts au stator .....	27
II.7.3.2 Défauts au rotor.....	30
II.7.3.3 Défaut des roulements mécaniques.....	32
II.7.3.4 Défaut du flasque .....	33
II.7.3.5. Défaut de ventilateur.....	34
II.7.4 Les Techniques de traitement du signal pour la détection et l'analyse les défauts	34
II.7.4.1 Analyse spectrale .....	34
II.7.4.2 Analyse temporelle.....	35

II.8 Conclusion .....	35
<b>Chapitre III : Diagnostic de défauts des machines asynchrones</b>	
III.1 Introduction .....	37
III.2 Modélisation de la machine asynchrone.....	37
III.2.1 Hypothèses simplificatrices .....	37
III.2.2 Équations électriques .....	38
III.2.3 Équation magnétique .....	39
III.3 Transformation de Park .....	40
III.3.1 Application de Transformation de Park .....	42
III.3.2 Équation mécanique .....	42
III.4 Partie de simulation .....	44
III.5 Les résultats de simulation a l'état sain .....	45
III.5.1 A vide .....	45
III.5.2 En charge .....	47
III.6 L'interprétation a l'état sain .....	49
III.6.1 A vide .....	49
III.6.2 En charge .....	49
III.7 Les résultats de simulation en présence des défauts .....	50
III.7.1 Défaut statorique.....	50
III.7.2 Défaut rotorique.....	52
III.8 L'interprétation en présence des défauts .....	55
III.8.1 Défaut statorique .....	55
III.8.2 Défaut rotorique.....	55
III.9 L'analyse FFT.....	56
III.9.1 L'interprétation de L'analyse FFT .....	60
III.10 Conclusion .....	60
Conclusion générale .....	61

## *Liste de tableau*

### **Chapitre I**

<b>Tableau I.1</b> : des exemples sur les activités de maintenance. ....	5
<b>Tableau I.2</b> : les opérations de la maintenance corrective .....	10
<b>Tableau I.3</b> : les ressources humaines et matérielles nécessaires à la réalisation de chacune des tâches.....	12
<b>Tableau I.4</b> : Symbolisme des arbres de défaillances .....	17

### **Chapitre II**

<b>Tableau II.1</b> : les différentes parties du moteur asynchrone. ....	23
--	----

## *Liste des figures*

### **Chapitre I**

<b>Figure I 1</b> : la différence entre la maintenance préventive et corrective. ....	6
<b>Figure I 2</b> : les différents types de la maintenance .....	7
<b>Figure I 3</b> : diagramme de Pareto .....	13
<b>Figure I 4</b> : méthode de 5M.....	14
<b>Figure I 5</b> : Déroulement d'une analyse d'AMDEC.....	16

### **Chapitre II**

<b>Figure II 1</b> : classifications des machines électriques alternatives. ....	19
<b>Figure II 2</b> : Moteur asynchrone. ....	20
<b>Figure II 3</b> : Moteur asynchrone a rotor cage .....	21
<b>Figure II 4</b> : Stator d'une machine asynchrone. ....	21
<b>Figure II 5</b> : Rotor à Cage d'écureuil. ....	22
<b>Figure II 6</b> : Schéma d'un rotor bobiné. ....	22
<b>Figure II 7</b> : schématisation de différentes parties du moteur asynchrone. ....	23
<b>Figure II 8</b> : Proportion des défauts.....	26
<b>Figure II 9</b> : Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances et les machines de fortes puissances. ....	26
<b>Figure II 10</b> : Les différents court-circuit statorique possibles .....	28
<b>Figure II 11</b> : court-circuit entre spires .....	29
<b>Figure II 12</b> : Court-circuit dans une phase .....	30
<b>Figure II 13</b> : Défaut de rupture de barres et anneau d'un rotor a cage.....	31
<b>Figure II 14</b> : Types d'excentricité. ....	32
<b>Figure II 15</b> : défaut de roulement.....	33
<b>Figure II 16</b> : flasque défectueux.....	33



**Chapitre III**

**Figure III 1** : schéma de la machine asynchrone représentée dans le repère(abc) .....38

**Figure III 2** : Model de Park de la MAS .....41

**Figure III 3** : Modèle de simulation .....44

**Figure III 4** : Le courant statorique .....45

**Figure III 5** : Le courant rotorique .....45

**Figure III 6** : La vitesse .....46

**Figure III 7** : Le couple électromagnétique .....46

**Figure III 9** : Le courant rotorique a charge.....47

**Figure III 8** : Le courant statorique a charge .....47

**Figure III 11** : Le couple électromagnétique en présence de la charge .....48

**Figure III 10** : La vitesse en présence de la charge .....48

**Figure III 12** : Le courant statorique en présence des défauts dans le stator .....50

**Figure III 13** : Le courant rotorique en présence des défauts dans le stator .....51

**Figure III 14** : La vitesse en présence des défauts dans le stator .....51

**Figure III 15** : Le couple électromagnétique .....52

**Figure III 16** : Le courant statorique en présence des défauts rotorique .....53

**Figure III 17** : Le courant rotorique en présence des défauts rotorique .....53

**Figure III 18** : La vitesse en présence des défauts rotorique .....54

**Figure III 19** : Le couple électromagnétique en présence des défauts rotorique .....54

**Figure III 20** : le spectre de courant statorique et rotorique a l'état sain.....57

**Figure III 21** : Le spectre de courant statorique et rotorique en défaut statorique.....58

**Figure III 22** : Le spectre de courant statorique et rotorique en défaut rotorique .....59

# *Introduction générale*

Les activités de maintenance dans les installations industrielles ont fait appel à des techniques de diagnostic de plus en plus sophistiquées. Les ingénieurs de maintenance ont désormais accès à une variété de techniques de détection de pannes.

Le diagnostic est une des étapes fondamentales de la maintenance industrielle. Le but ultime de l'efficacité est le bon fonctionnement de l'ensemble du cycle de production. En ce sens, le diagnostic est essentiel pour déterminer avec précision quelles mesures doivent être prises et par quels moyens.

L'importance des machines asynchrones est nécessairement au cœur des systèmes industriels. Il existe de nombreuses pannes inhérentes aux machines asynchrones et des pannes pouvant conduire à de telles situations. Ces pannes peuvent être liées à la construction de la machine et peuvent être de causes mécaniques (excentricité du rotor, rupture de roulement, etc...) ou de causes électriques et magnétiques (court-circuit dans les enroulements du stator, barre de rotor cassée ou anneau, etc...).

Dans ce mémoire, nous nous intéressons à l'étude des principaux défauts pouvant avoir lieu dans une machine asynchrone à cage d'écureuil. À savoir, les défauts au stator, la cassure de barre ou d'anneau, de court-circuit au rotor, notre travail se concentre sur un diagnostic pour la détection et la caractérisation des défauts qui peuvent affecter les différents éléments. Ce mémoire est organisé en trois chapitres complémentaires :

Le premier chapitre présente des notions générales sur la maintenance, en la définissant et en mentionnant ses types et ses niveaux. De plus, nous aborderons les méthodes de diagnostic en maintenance.

Le contexte de deuxième chapitre est une présentation de la machine asynchrone, nous présentons dans un premier temps les éléments constituant de ce type de machine, leur principe de fonctionnement en précisant les différents défauts pouvant survenir sur chacun des éléments.

Le diagnostic de défauts dans les machines asynchrones a été entamé dans le troisième chapitre selon une modélisation de défaut dans le stator et le rotor à vide ou en charge et les comparés par l'état sain à l'aide d'une simulation par transformation de Park suivi d'une analyse approfondie des résultats obtenus par la méthode de FFT.

En fin nous terminerons notre travail par une conclusion générale et des perspectives.

*Chapitre I: Notions générales  
sur la maintenance*

## **I.1 Introduction**

La fonction de maintenance cherche à équilibrer le besoin d'équipements modernes avec la nécessité d'un faible coût d'exploitation. Au fil des ans, cette fonction a généralement été considérée comme une fonction secondaire coûteuse. Par conséquent, de nombreuses personnes considèrent qu'il s'agit d'un travail qui implique le dépannage et la réparation d'équipements cassés ou anciens. Cependant, le maintien d'un équilibre optimal entre ces deux objectifs contradictoires nécessite bien plus que de simples réparations et dépannages. Tout comme la technologie et l'économie doivent être équilibrées dans la société, la maintenance doit constamment contrôler ces éléments. L'entretien de cette machine nécessite des soins et de l'attention pour être correctement effectué. Il est nécessaire de développer des méthodes, des plans et des organisations pour que cela fonctionne bien [1].

Dans ce chapitre nous avons présenté la définition et les différents types de la maintenance, Il couvre également les niveaux de la maintenance et ces méthodes de diagnostic de défaut.

## **I.2 L'histoire de la maintenance**

Après la guerre, la reconstruction de l'industrie a commencé. Un marché beaucoup plus compétitif s'est développé, obligeant les fabricants à augmenter leur production. La surcharge de travail des machines entraîne une augmentation des temps d'arrêt et une hausse des coûts de réparation des machines. Cette augmentation de la production a exigé de meilleures pratiques de maintenance, qui ont conduit au développement de la maintenance préventive[2].

Depuis les années 1980, les installations et les systèmes sont devenus encore plus complexes. Les exigences du marché concurrentiel et l'intolérance des temps d'arrêt ont augmenté, tandis que les coûts de maintenance ont augmenté. Outre les exigences de fiabilité accrue, une nouvelle sensibilisation aux processus de défaillance, l'amélioration des techniques de gestion et les nouvelles technologies ont permis de mieux comprendre la santé des machines et des composants. La compréhension du risque est devenue essentielle. Les questions d'environnement et de sécurité sont primordiales. De nouveaux concepts comme la surveillance des conditions, la fabrication juste à temps, les normes de

qualité, les systèmes experts et la maintenance centrée sur la fiabilité ont également fait leur apparition [2].

### **I.3 Définition et les activités de la maintenance**

#### **I.3.1 Définition de la maintenance**

La maintenance industrielle peut se définir comme le fait de maintenir ou de rétablir un équipement de production dans un état défini en amont afin que celui-ci soit en mesure d'assurer le service prévu. Lorsqu'une entreprise installe un système pour maintenir ses équipements de production, cela lui permet de prévenir un grand nombre de problèmes et de diminuer les pertes de productivité [3]. En 2001 la conception de maintenance est définie comme « Ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise ». Norme AFNOR (Association Française de Normalisation) X 60-010.

#### **I.3.2 Les notions de maintenance**

- **Maintenir** : contient la notion de prévention sur un système en fonctionnement, c'est choisir les moyens de prévenir, de corriger ou de rénover suivant l'usage du matériel, suivant sa criticité économique, afin d'optimiser le coût global de possession, c'est maîtriser.
- **Rétablir** : contient la notion de correction consécutive à une perte de fonction.
- **État spécifié ou service déterminé** : implique la prédétermination d'objectif à atteindre, avec quantification des niveaux caractéristiques.
- **Coût optimal** : qui conditionne l'ensemble des opérations dans un souci d'efficacité [4].

#### **I.3.3 Les activités de la maintenance**

D'une manière générale, la maintenance a pour but d'assurer la disponibilité maximale des équipements de production à un coût optimal. Les principales activités que doit se fixer la fonction maintenance [5] sont :

- **Inspection** : Contrôle de conformité réalisé en mesurant, observant, testant ou calibrant les caractéristiques significatives d'un bien.
- **Surveillance de fonctionnement** : Activité exécutée manuellement ou automatiquement ayant pour objet d'observer l'état réel d'un bien.

- **Essai de conformité** : Essai destiné à montrer si une caractéristique ou une rit propriété d'un bien est, ou non, conforme aux spécificités nominales.
- **Essai de fonctionnement** : Actions menées après une action de maintenance pour vérifier que le bien est capable d'accomplir la fonction requise.
- **Révision** : ensemble complet d'examens et d'actions réalisés afin de maintenir le niveau requis de disponibilité et de sécurité.
- **Reconstruction** : Action suivant le démontage d'un bien et la réparation ou le remplacement des composants qui approchent de la fin de leur durée de vie utile et/ou devraient être systématiquement remplacés.
- **Amélioration** : Ensemble des mesures techniques, administratives et de gestion, destinées à améliorer la sûreté de fonctionnement (SDF) d'un bien sans changer sa fonction requise.
- **Modification** : Ensemble des mesures techniques, administratives et li de gestion, destinées à changer la fonction d'un bien.

### **I.3.3.1 . Des exemples sur les activités de maintenance**

Dans le tableau suivant **Tableau I.1**, nous mettrons quelques exemples d'activités de maintenance :

Tableau I.1 : des exemples sur les activités de maintenance [6].

Nature de l'activité	Exemple d'activité
Inspection	Vérifier à l'aide d'un wattmètre que la puissance du moteur de broche des tours à commande numérique est comprise entre 15 et 16 kW.
Surveillance de fonctionnement	Mesure du niveau de vibrations broche : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vitesse (10-1000 Hz)</li> <li>• Accélération (2-20 kHz)</li> </ul>
Essai de conformité	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contrôler les arrêts d'urgence et les capots de sécurité.</li> </ul>
Essai de Fonctionnement	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contrôler l'effort de serrage du moule suite au changement du vérin hydraulique.</li> </ul>
Révision	Révision annuelle des tours CN : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vérification du jeu des vis à billes</li> <li>• Vérification du jeu des glissières</li> </ul>
Reconstruction	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Remplacement des colonnes de guidage et des Paliers lisses d'une presse.</li> <li>• Rectification d'un banc de tour.</li> <li>• Soudage de renforts sur le bâti</li> <li>• Usinage des portées du plateau tournant</li> <li>• Contrôle de la géométrie</li> </ul>
Amélioration	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Changement de la technologie hydraulique tout ou rien par de l'hydraulique proportionnelle.</li> <li>• Remplacement d'une commande numérique par plus récente.</li> </ul>
Modification	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Changer le vérin pneumatique par un vérin hydraulique de plus grande course et permettant d'obtenir un effort de compression plus grand.</li> </ul>

#### I.4 Les types de la maintenance

Selon que l'activité de maintenance ait lieu avant ou après la défaillance d'un bien, c'est-à-dire la cessation de son aptitude à accomplir une fonction requise et correspondant à un état de panne, on distingue [6]:



- La maintenance préventive effectuée avant la défaillance du bien,
- La maintenance corrective effectuée après la défaillance du bien.

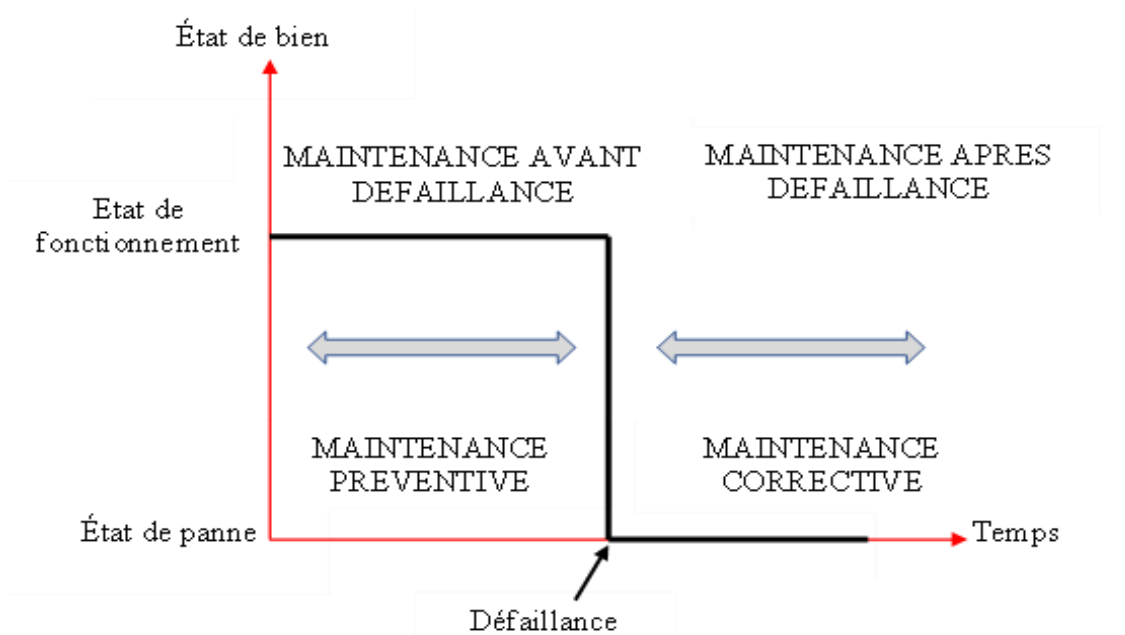


Figure I-1 : la différence entre la maintenance préventive et corrective [6].

Pour classifier les différents types de maintenance, deux grandes catégories composées elles-mêmes de sous-catégories se distinguent dans la :

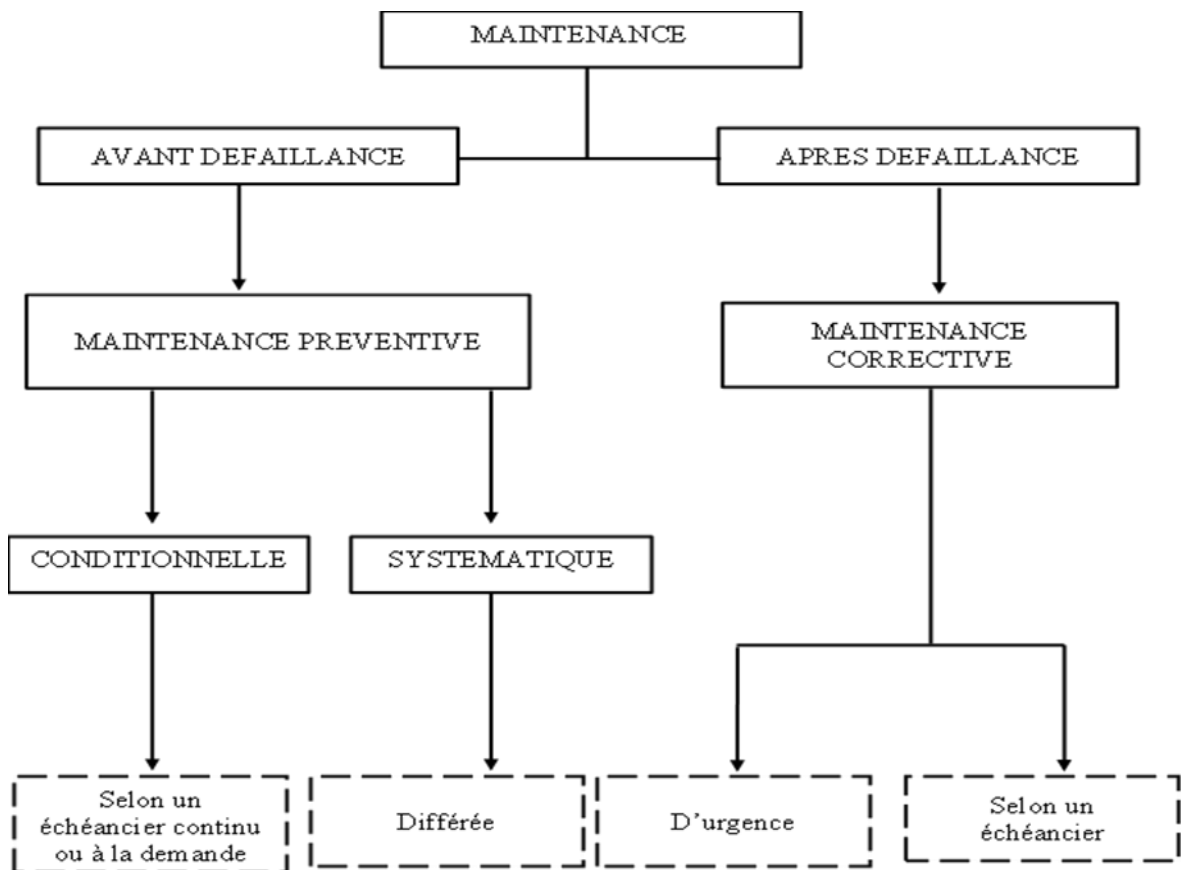


Figure I-2: les différents types de la maintenance

## I.4.1 Maintenance préventive

### I.4.1.1 Définition :

La maintenance préventive consiste à effectuer des activités de maintenance régulièrement programmées afin d'éviter des défaillances inattendues à l'avenir. En d'autres termes, il s'agit de réparer les choses avant qu'elles ne tombent en panne. La maintenance préventive s'oppose en cela à la maintenance corrective déclenchée par des perturbations ou par les événements [7].

### I.4.1.2 Les opérations de la maintenance préventive

- **Inspection** : contrôle de conformité réalisé en mesurant, observant, testant ou calibrant les caractéristiques significatives d'un bien ; elle permet de relever des anomalies et d'exécuter des réglages simples ne nécessitant pas d'outillage spécifique, ni d'arrêt de la production ou des équipements (pas de démontage).
- **Contrôle** : vérification de la conformité à des données préétablies, suivie d'un jugement. Ce contrôle peut déboucher sur une action de maintenance corrective ou alors inclure une décision de refus, d'acceptation ou d'ajournement.

- **Visite** : examen détaillé et prédéterminé de tout (visite générale) ou partie (visite limitée) des différents éléments du bien et pouvant impliquer des opérations de maintenance du premier et du deuxième niveau ; il peut également déboucher sur la maintenance corrective.
- **Test** : comparaison des réponses d'un système par rapport à un système de référence ou à un phénomène physique significatif d'une marche correcte.
- **Echange standard** : remplacement d'une pièce ou d'un sous-ensemble défectueux par une pièce identique, neuve ou remise en état préalablement, conformément aux prescriptions du constructeur.
- **Révision** : ensemble complet d'examen et d'actions réalisées afin de maintenir le niveau de disponibilité et de sécurité d'un bien. Une révision est souvent conduite à des intervalles prescrits du temps ou après un nombre déterminé d'opérations. Une révision demande un démontage total ou partiel du bien. Le terme révision ne doit donc pas être confondu avec surveillance. Une révision est une action de maintenance de niveau 4.

### **I.4.1.3 Différents types de maintenance préventive**

#### **I.4.1.3.1 Maintenance préventive systématique**

Maintenance préventive effectuée selon un échancier établi en fonction du temps ou du nombre d'unités d'usage. D'après la norme, c'est une « maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés avec un échancier et destinée à réduire la probabilité de défaillance »[8].

#### **I.4.1.3.2 Les avantages et les inconvénients de la maintenance préventive systématique**

- **Avantages**
  - ✓ Le coût de chaque opération est prédéterminé et la gestion financière en est facilitée.
  - ✓ Les opérations et les arrêts sont programmés en accord avec la production
- **Inconvénients**
  - ✓ Le coût des opérations est élevé car la périodicité est calculée sur la vie minimum des éléments.
  - ✓ Les opérations de démontage accroissent les risques de défaillance par défaut "de jeunesse".

### I.4.1.3.3 Maintenance préventive conditionnelle

Maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement intégrant les actions qui en découlent. La surveillance du fonctionnement et des paramètres peut être exécutée selon un calendrier, ou à la demande, ou de façon continue [9]. La maintenance conditionnelle sera donc réservée aux matériels dont l'évolution d'éventuels défauts est facilement détectable et mesurable avec des capteurs fiables. Il s'agira principalement [10] :

- ✓ Des machines en mouvement (capteurs vibrations-analyse huiles, ...)
- ✓ Des canalisations (détection de fuites ...)
- ✓ Des équipements soumis à température ou pression (capteurs)
- ✓ Des capteurs électriques (analyse chromatographique, ...)
- ✓ Des appareils soumis à des déformations (examen de structure ou de surface).

### I.4.2 Maintenance corrective

La norme AFNOR X 60-010 définit la maintenance corrective comme une maintenance effectuée après défaillance. La maintenance corrective regroupe les opérations visant à remettre en service un service ou un système défaillant. Or une défaillance ne se produit jamais hors sollicitation du système. Le but de ces opérations est donc permettre une reprise de la production dans les meilleurs délais. On distingue deux types de maintenance corrective [11]:

- **Maintenance palliative** : qui est basé sur l'opération de dépannage, parce que la défaillance est partielle.
- **Maintenance curative** : qui est basé sur l'opération de réparation, parce que la défaillance est totale.

#### I.4.2.1 Les Opérations de la maintenance corrective

Après l'apparition d'une défaillance, le maintenancier doit mettre en œuvre un certain nombre d'opérations dont les définitions sont données ci-dessous. Ces opérations s'effectuent par des étapes sont listées dans le **Tableau I.2** :

Tableau I.2 : les opérations de la maintenance corrective

Étape	Opération
1	• Test : c'est à dire la comparaison des mesures avec une référence
2	• Détection : ou action de déceler l'apparition d'une défaillance
3	• Localisation ou action conduisant à rechercher précisément les éléments par lesquels la défaillance se manifeste
4	• Diagnostic ou identification et analyse des causes de la défaillance
5	• Dépannage, réparation ou remise en état (avec ou sans modification)
6	• Contrôle du bon fonctionnement après intervention
7	• Amélioration éventuelle c'est à dire éviter la réapparition de la panne
8	• Historique ou mise en mémoire de l'intervention pour une exploitation

### I.4.3 Autre type de la maintenance

#### I.4.3.1 La maintenance améliorative

La maintenance améliorative est moins connue et souvent considérée comme une « activité connexe ». Elle désigne un ensemble de mesures techniques, administrative et de gestion visant à améliorer la sûreté de fonctionnement d'un bien en modifiant la conception d'origine mais sans changer sa fonction requise [12]. Les interventions de maintenance améliorative prennent la forme d'actions de rénovation, de reconstruction ou de modernisation.

##### I.4.3.1.1 Les objectifs de la maintenance améliorative

- ✓ Réduire la consommation d'énergie,
- ✓ Augmenter la durée de vie des composants
- ✓ Améliorer la maintenabilité,
- ✓ Augmenter les performances de production

## **I.5 Les niveaux de maintenance**

Il y a 5 niveaux de maintenance, selon la classification de l'AFNOR. Chaque niveau correspond à un degré de complexité des interventions :

- **Niveau 1** : regroupe des actions simples à effectuer, sur des équipements facilement accessibles
- **Niveau 2** : correspond aux interventions peu complexes dont les procédures sont simples à suivre.
- **Niveau 3** : désigne des interventions complexes qui doivent prendre en compte l'équipement dans sa globalité et être réalisées par des techniciens spécialisés ;
- **Niveau 4** : rassemble des opérations complexes et importantes, qui requiert un ou plusieurs techniciens spécialisés, supervisés par un responsable ;
- **Niveau 5** : enfin correspond à des actions semblables à des actions de fabrication (reconstruction, mise en conformité...) qui ne peuvent être réalisées que par le constructeur de l'équipement ou par un prestataire agréé par celui-ci.

Ces niveaux de maintenance font référence à la complexité des tâches à effectuer et aux ressources humaines et matérielles nécessaires à la réalisation de chacune des tâches. Cette spécification est détaillée dans le **Tableau I.3**. Le système de maintenance ainsi situé permet de préciser, de limiter et de dégager les responsabilités et les attentes envers ce système. Cependant, ceci constitue une condition nécessaire mais malheureusement non suffisante pour réussir l'implantation d'un système de maintenance dans une entreprise[13].

**Tableau I.3 :** les ressources humaines et matérielles nécessaires à la réalisation de chacune des tâches

Niveaux	Personnel d'intervention	Moyenne d'intervention
1	Exploitant	• Outillage léger défini dans les instructions d'utilisation
2	Technicien	• Outillage léger défini dans les instructions d'utilisation, plus pièces de rechange trouvées à proximité sans délai
3	Technicien spécialisé	• Outillage prévu plus appareils de mesure, banc d'essai, de contrôle, etc.
4	Equipe complet, Atelier centrale	• Moyens proches de la fabrication par le constructeur
5	Equipe complet, Atelier centrale	• Moyens proches de la fabrication par le constructeur

## I.6 Les méthodes de diagnostic en maintenance

Après avoir rappelé les différentes problématiques liées aux enjeux de la maintenance industrielle et défini les différents types de maintenance, cette partie montre les bénéfices d'une stratégie de maintenance pour maintenir le niveau de sécurité et réduire les temps d'arrêt et les coûts de maintenance. Le diagnostic étape préliminaire à la bonne exécution d'une maintenance tant préventive que corrective. Le diagnostic d'un matériel de production constitue dès lors une méthode permettant de déterminer si un outil est défaillant ou non ; mais aussi d'identifier l'origine de la panne [14].

### I.6.1 Méthode ABC (Diagramme Pareto)

La méthode ABC est un outil qui permet d'analyser les coûts par activité. La méthode ABC divise l'ensemble des activités de l'entreprise pour analyser les coûts de chacune d'elle. En effet, les coûts (produits, matières premières, clients...) consomment des activités au sein de l'entreprise qui, elles-mêmes, consomment des ressources. Le but est de modéliser les charges par activités/processus pour mieux les gérer. Cela concerne notamment les secteurs où les coûts indirects sont importants [15].

### I.6.1.1 Le But de la méthode ABC

Parmi la multitude de préoccupations qui se posent à un responsable maintenance, il lui faut décider quelles défaillances doivent être étudiées et/ou améliorées en premier. Pour cela, il faut déceler celles qui sont les plus importantes et dont la résolution ou l'amélioration serait le plus rentable, en particulier en termes de coûts d'indisponibilité. La difficulté réside dans le fait que ce qui « est important » et que ce qu'il « l'est moins » ne se distinguent pas toujours de façon claire. La méthode ABC apporte une réponse. Elle permet l'investigation qui met en évidence les éléments les plus importants d'un problème afin de faciliter les choix et les priorités. On classe les événements (pannes par exemple) par ordre décroissant de coûts (temps d'arrêts, coût financier, nombre, etc.), chaque événement se rapportant à une entité. On établit ensuite un graphique faisant correspondre les pourcentages de coûts cumulés aux pourcentages de types de pannes ou de défaillances cumulés. Sur la figure (I-3), on observe trois zones [16].

- **Zone A** : 20% des pannes occasionnent 80% des coûts
- **Zone B** : les 30% de pannes supplémentaires ne coûtent que 15% supplémentaires
- **Zone C** : les 50% de pannes restantes ne concernent que 5% du coût global

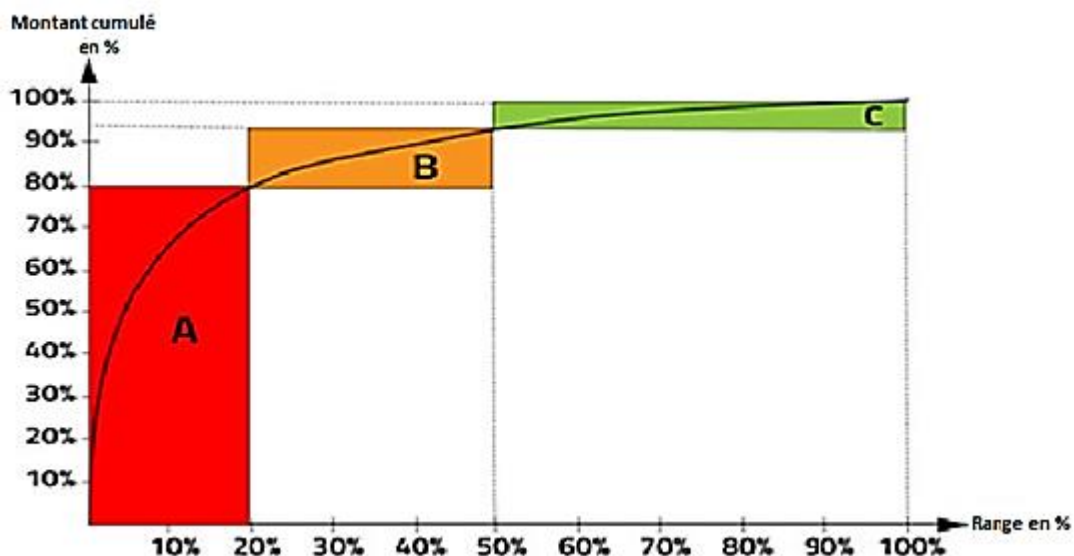


Figure I-3 : diagramme de Pareto [16].

### I.6.2 . Méthode de 5m

Créée par le professeur Kaoru Ishikawa, la méthode des 5M est un outil permettant d'analyser les causes potentielles de problèmes afin de proposer une méthode de résolution de ces problèmes.



Elle consiste en une représentation graphique en arêtes de poisson ou diagramme d'Ishikawa permettant d'identifier et de lister de manière synthétique les différentes causes fondamentales et les effets d'un problème. Cette méthode d'analyse et de réflexion est axée autour de 5 sources potentielles formant les arêtes principales du diagramme d'Ishikawa et participe à la résolution de problèmes[17] :

- **Main d'œuvre** : collaborateurs, compétences, etc.
- **Matières** : composants entrant dans l'élaboration d'un produit, etc.
- **Matériels** : moyens de production, outils, équipements, etc.
- **Méthodes** : techniques, modes opératoires, procédures, etc.
- **Milieu** : environnement de travail, etc.

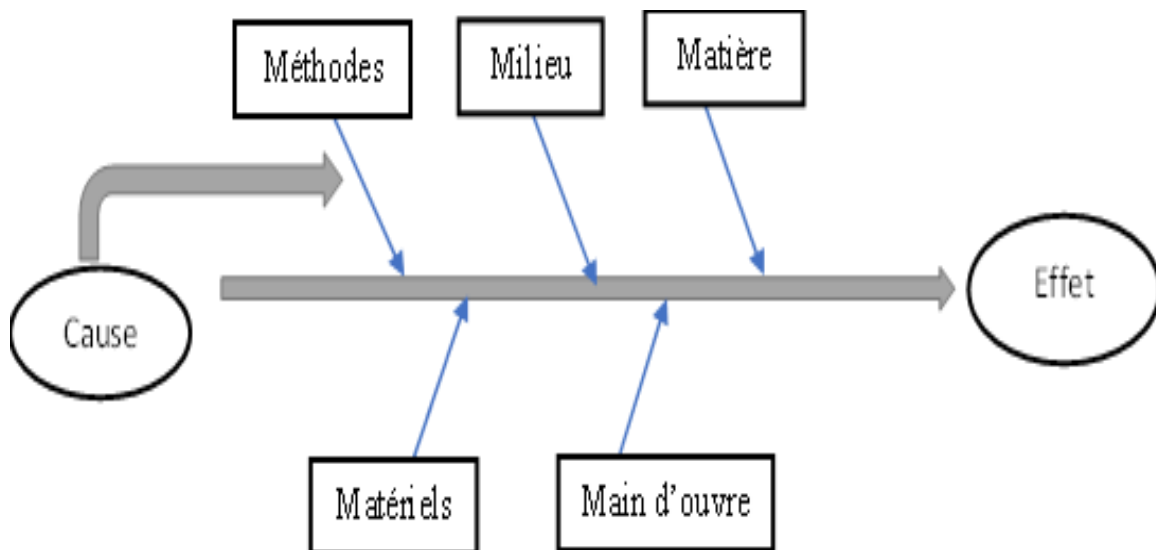


Figure I-4: méthode de 5M

### I.6.3 Méthode de L'AMDEC

AMDEC est l'acronyme d'Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leurs Criticités ou, en anglais, FMECA/FMEA : [Failure Mode Effects and Criticality Analysis].

L'AFNOR définit l'AMDEC comme étant : Une méthode inductive qui permet de réaliser une analyse qualitative et quantitative de la fiabilité ou de la sécurité d'un système. La méthode AMDEC est avant tout une méthode d'analyse de systèmes statiques, s'appuyant sur un raisonnement inductif (causes - conséquences), pour l'étude organisée des causes, des effets des défaillances et de leurs criticités[18].

### I.6.3.1 Mise en œuvre de la méthode AMDEC

Cette mise en œuvre comporte :

- **Une phase préliminaire d'initialisation destinée à :**
  - ✓ Définir les limites du système à étudier,
  - ✓ Constituer un groupe de travail,
  - ✓ Mettre au point l'outil d'analyse (grille AMDEC).
  - ✓ Proposer un planning organisationnel.
- **La décomposition fonctionnelle et structurelle** du système étudié en identifiant les fonctions de chaque sous-ensemble et les éléments contribuant à la réalisation de ces fonctions.
- **L'analyse des défaillances** en précisant le mode défaillance et son mécanisme d'apparition, les effets de la défaillance sur le système et la recherche des causes.
- **Le calcul de la criticité** qui définit la gravité des conséquences d'une défaillance par la prise en compte :
  - ✓ De la fréquence d'apparition des défaillances caractérisée par un taux de défaillance
  - ✓ De la probabilité de non détection des causes de défaillance.
  - ✓ De la gravité des effets de la défaillance pour la sécurité des personnes et des biens et l'importance des coûts de défaillance.

À chaque critère est associé un coefficient dans une échelle de valeur préalablement établie pour **la fréquence F**, **la non détection D** et **la gravité G**. La criticité s'exprime par leur produit :

$$\text{Criticité } C = F \times D \times G \quad (\text{I-1})$$

- **La proposition d'actions** correctives ou préventives en commençant par les défaillances qui ont les valeurs de criticité les plus élevées.
- Après la mise en œuvre de ces améliorations, il convient d'en évaluer leur **efficacité** en procédant par exemple à une nouvelle estimation de criticité et en le comparant à la précédente.

La (Figure I-5) représente les étapes approuvées dans l'analyse AMDEC :

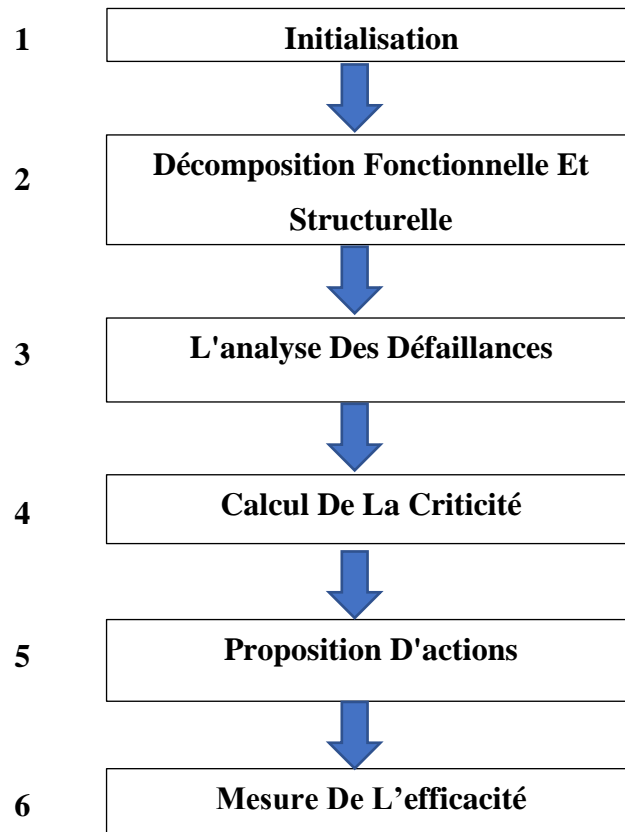


Figure I-5: Déroulement d'une analyse d'AMDEC

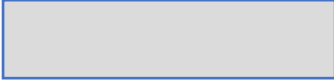

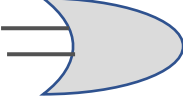

#### I.6.4 Arbre de défaillance

C'est un diagramme déductif qui va de l'effet sur la cause et qui a pour objet de rechercher toutes les combinaisons de défaillances élémentaires (primaires) pouvant déboucher vers une panne [19].

##### I.6.4.1 Symbolisme

Cet outil utilise un symbolisme qu'on utilise également sur les circuits logiques. On parle aussi de logigramme de dépannage. Ce symbolisme est donné sur le **Tableau I.4**

Tableau I.4 : Symbolisme des arbres de défaillances

Symboles	Désignation
	Evènement intermédiaire (de sortie)
	Evènement élémentaire (défaillance primaire)
	Porte ET
	Porte ou

## I.7 Conclusion

Ce chapitre couvre les nombreuses tâches de maintenance. Il couvre également les procédures de maintenance préventive et corrective. De plus, il détaille les différentes méthodes d'entretien. Après avoir appris les méthodes de diagnostic appropriées, nous en apprenons plus sur les différents niveaux de maintenance. Le chapitre suivant se penche sur les machines présentant des défauts causés par un fonctionnement asynchrone.

*Chapitre II : défaillances des  
machines asynchrones*

## II.1 Introduction

Actuellement, les machines asynchrones 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 [20].

Ce chapitre, nous permet de donner une présentation détaillée de la machine asynchrone (moteur). Au début, il est essentiel de faire rappeler la structure constituant la machine asynchrone, leur principe de fonctionnement, sans oublier les principaux défauts électriques et mécaniques qui peuvent impacter cette machine.

## II.2 . Classification des moteurs électriques tournants

Les moteurs électriques sont généralement classés selon le type de réseau auquel ils sont connectés : moteurs à courant continu (CC) et moteurs à courant Alternatives (CA). Les moteurs alimentés par courant alternatif sont divisés en deux types : synchrone et asynchrone. La différence fondamentale entre les moteurs à induction et les moteurs synchrones est que la vitesse du rotor d'un moteur à induction sous charge ne coïncide pas (de manière asynchrone) avec la vitesse du champ magnétique généré par la tension d'alimentation. Les moteurs à induction sont divisés en deux catégories : monophasés et triphasés. Les moteurs à induction triphasés sont classés par type de rotor : rotor à cage et rotor bobiné. Les principales catégories sont comme indiqué dans la (Figure II.1) [21].

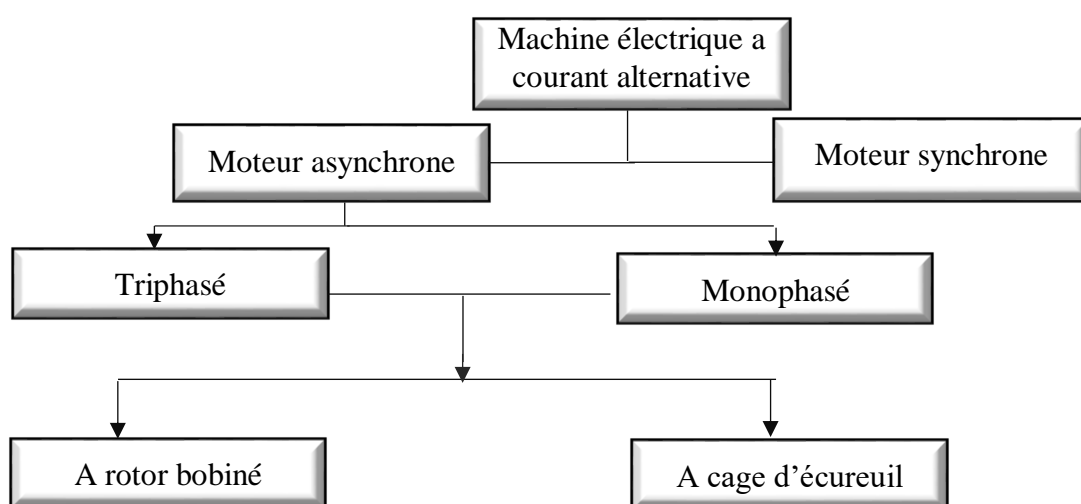


Figure II-1 : classifications des machines électriques alternatives.

### II.3 Généralité sur les moteurs asynchrones

Les machines asynchrones sont des machines tournantes à courant alternatif (Figure II-2) sans connexion entre le stator et le rotor. Ils peuvent être des générateurs ou des moteurs. Quels que soient les constructeurs de machines tournantes, on classe les différentes pièces selon les trois grandes fonctions ci-après :

- **Organes électriques** : il s'agit des enroulements du stator et des conducteurs du rotor. Le stator est chargé de créer le flux utile, tandis que le rotor crée les forces électromagnétiques dans les générateurs ou les couples dans les moteurs.
- **Organes magnétiques** : il y a le circuit magnétique fixe et le circuit magnétique tournant. Ces circuits ont pour rôle de conduire le flux qui, dans l'entrefer, interagit avec les courants circulant dans le circuit électrique.
- **Organes mécaniques** : ils comprennent le boîtier avec la fixation ou le stator, le rotor avec son arbre, les roulements à billes, les flasques, la ventilation avec son capot, le capot de ventilation et les tiges de montage [22].

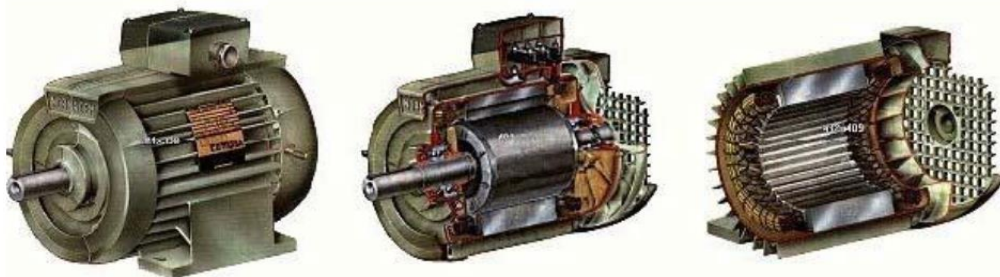


Figure II-2 : Moteur asynchrone. [23]

### II.4 Constitution d'un moteur Asynchrone

La machine asynchrone est composée d'une partie fixe appelée stator et d'une partie tournante appelée rotor, du point de vue mécanique, la machine asynchrone est subdivisée en trois parties distinctes :

- **Le stator** : partie immobile est la partie où est connectée l'alimentation électrique
- **Le rotor** : partie tournante, elle permet de mettre en rotation la charge magnétique

- **L'entrefer** : il s'agit de l'espace mince et constant entre le stator et le rotor. C'est dans cette région que se produit l'interaction électromagnétique entre le champ magnétique du stator et les courants induits dans le rotor. L'entrefer permet le transfert d'énergie électromagnétique entre le stator et le rotor, ce qui entraîne la rotation du rotor[24].

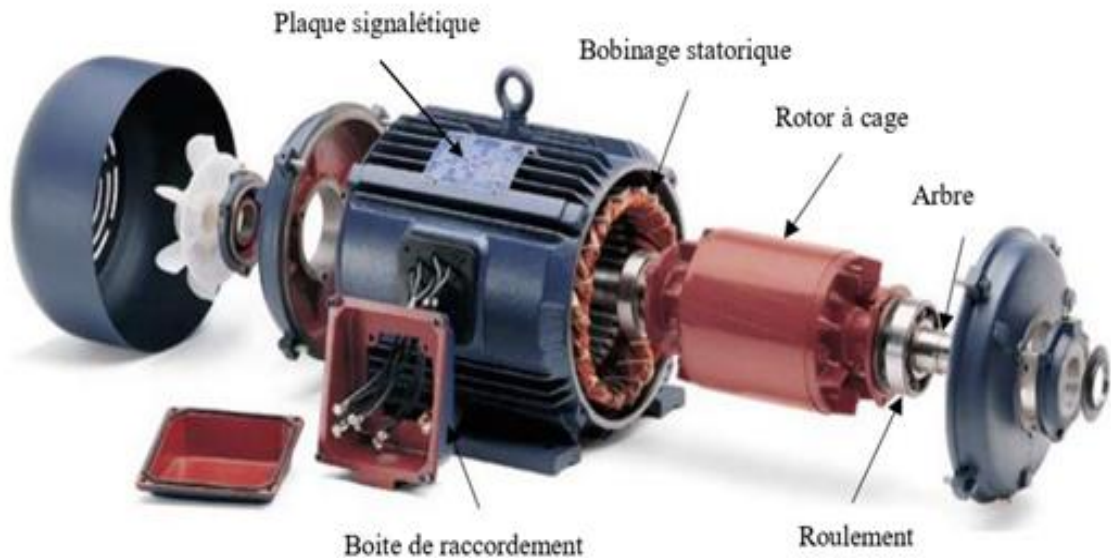


Figure II-3 : Moteur asynchrone à rotor cage [25].

#### II.4.1 Constitution du stator

Se compose d'un cylindre ferromagnétique avec des encoches pour accueillir l'enroulement, Le stator peut être illustré par le schéma ci-dessous :

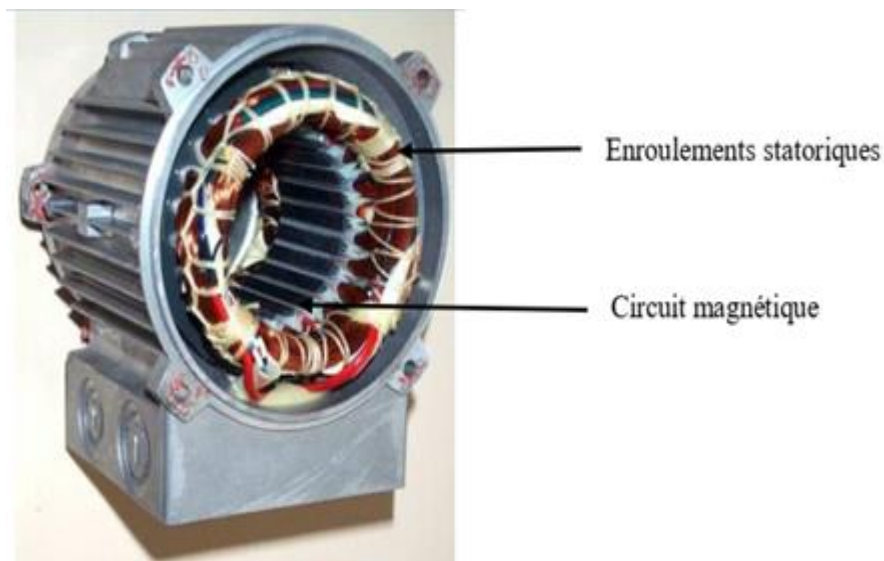


Figure II-4 : Stator d'une machine asynchrone.[26].



## II.4.2 Constitution du rotor

- **Rotor à Cage d'écureuil** : Il est constitué de tôles ferromagnétiques et de bandes conductrices uniformément réparties autour du rotor, il est court-circuité par 2 anneaux.



Figure II-5 : Rotor à Cage d'écureuil [27].

- **Rotor bobiné** : Un circuit électrique à trois anneaux reliés les bobines entre elles. Cette conception permet une connexion électrique entre les bobines du rotor.



Figure II-6 : rotor bobiné [28].

- **Autres parties** : La (Figure II-7). Représente une vue éclaté d'un moteur asynchrone qui constitue de différentes parties tel que ; la carcasse, les flasques, la boîte a borne, etc.

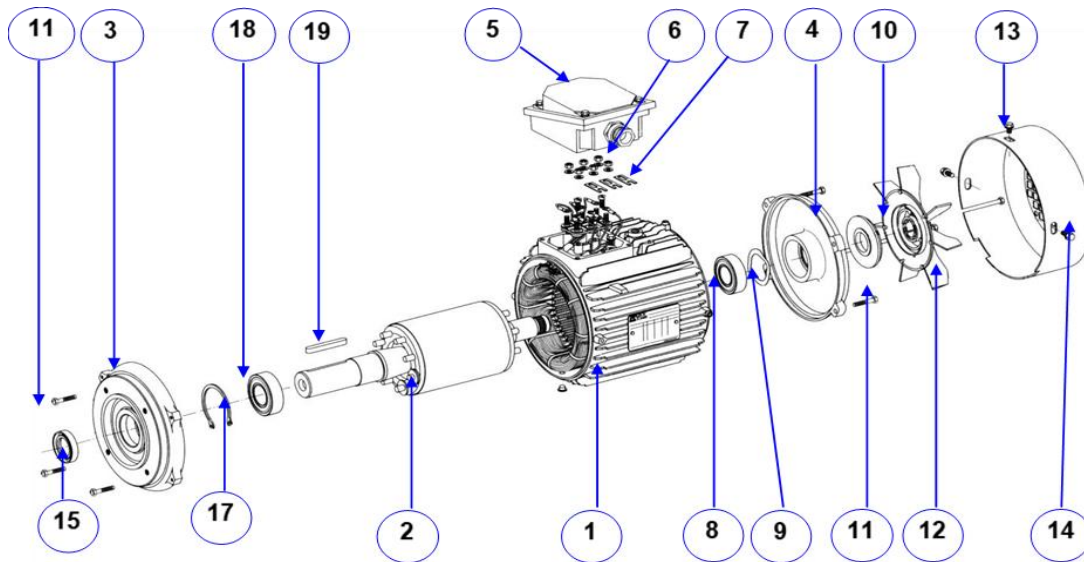


Figure II- 7 : schématisme de différentes parties du moteur asynchrone

Veillez trouver ci-dessous le tableau contenant les noms attribués à chaque élément de l'image susmentionnée :

**Tableau II.1 : les différentes parties du moteur asynchrone.**

N°	Composant	N°	Composant	N°	Composant
1	Stator bobiné	8	Roulement arrière	15	Joint flasque avant
2	Rotor	9	Rondelle de précharge	16	Goupille fixation ventilateur
3	Flasque avant	10	Entretoise	17	Segment d'arrêt (circlips)
4	Flasque arrière	11	Vis fixation flasque	18	Roulement avant
5	Boîte à bornes	12	Ventilateur	19	Clavette de bout d'arbre
6	Bornes	13	Capot de ventilation		
7	Barrettes de connexions	14	Vis de fixation capot		

## II.5 Fonctionnement du moteur asynchrone

Le moteur asynchrone triphasé fonctionne de la manière suivante [30] :

- **Alimentation du stator** : Le stator du moteur asynchrone est alimenté par un système triphasé de tensions. Les trois enroulements statoriques sont parcourus par des courants triphasés  $I_s$ , de pulsation  $\omega_s$ .
- **Champ magnétique tournant** : L'alimentation du stator crée un champ magnétique tournant à une vitesse angulaire  $\Omega_s$ , qui est déterminée par la pulsation des courants triphasés. Ce champ magnétique tournant est essentiel pour le fonctionnement du moteur asynchrone.
- **Réaction du rotor** : Lorsque le champ magnétique tournant du stator tourne, il induit un courant induit dans le rotor du moteur. Ce courant induit réagit avec le champ magnétique tournant du stator, ce qui génère un couple.
- **Glissement du rotor** : Le rotor du moteur asynchrone "glisse" par rapport au champ magnétique tournant du stator. On définit le glissement ( $g$ ) comme la différence entre la vitesse angulaire du champ magnétique tournant ( $\Omega_s$ ) et la vitesse angulaire du rotor ( $\Omega$ ), divisée par la vitesse angulaire du champ magnétique tournant  $\Omega_s$ . Le glissement permet de quantifier la différence de vitesse entre le champ magnétique tournant et le rotor.
- **F.E.M. et courant induit** : En raison du glissement, le rotor est balayé par le flux magnétique du stator à une vitesse  $(\Omega - \Omega_s)$ . Cela induit une force électromotrice (f.e.m.) et un courant induit dans le rotor. La pulsation de **f.e.m.** et du courant induit est donnée par le produit du glissement  $g$  et de la pulsation du champ magnétique tournant du stator  $\omega_s$ .

### II.5.1 Fonctionnement à vide

En régime à vide d'un moteur asynchrone triphasé, plusieurs observations peuvent être faites [30] :

- Le glissement, qui représente la différence de vitesse entre le rotor et le champ magnétique tournant du stator, est négligeable à vide
- Le facteur de puissance ( $\cos \varphi$ ) à vide est très faible
- Le courant absorbé à vide, noté ( $I_{sa}$ ), est relativement élevé.

## II.5.2 Fonctionnement en charge

Lorsque l'on charge un moteur asynchrone triphasé, plusieurs observations peuvent être faites [30] :

- Le facteur de puissance augmente
- Augmentation de la puissance active
- Le stator du moteur absorbe un courant actif pour fournir la puissance nécessaire à la charge. Ce courant actif est directement lié à la puissance active et à la charge connectée

## II.6 Les avantages et les inconvénients des machines asynchrones

- **Avantages** : Il existe plusieurs avantages dans le moteur asynchrone :
  - ✓ Robuste et facile à construire.
  - ✓ Utilisé dans la puissance moyenne et élevés.
  - ✓ Relié directement aux réseaux industriels à tension et fréquence.
  - ✓ Il tourne à vitesse variable différente de la vitesse synchrone
- **Inconvénients** : Il existe plusieurs des inconvénients dans le moteur asynchrone
  - ✓ La vitesse dépend de la charge.
  - ✓ Le couple de démarrage très élevé que les couples nominaux.
  - ✓ Variation de vitesse nécessite un variateur de vitesse[31]

## II.7 Les différents défauts de la machine asynchrone

### II.7.1 Etude statique des défaillances de la machine asynchrone

Les défaillances peuvent être d'origines diverses : électriques, mécaniques ou bien encore magnétiques. Une étude statistique, effectuée en 1988 par une compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance (de 50 kW à 200 kW) ont donné les résultats suivants [32] :

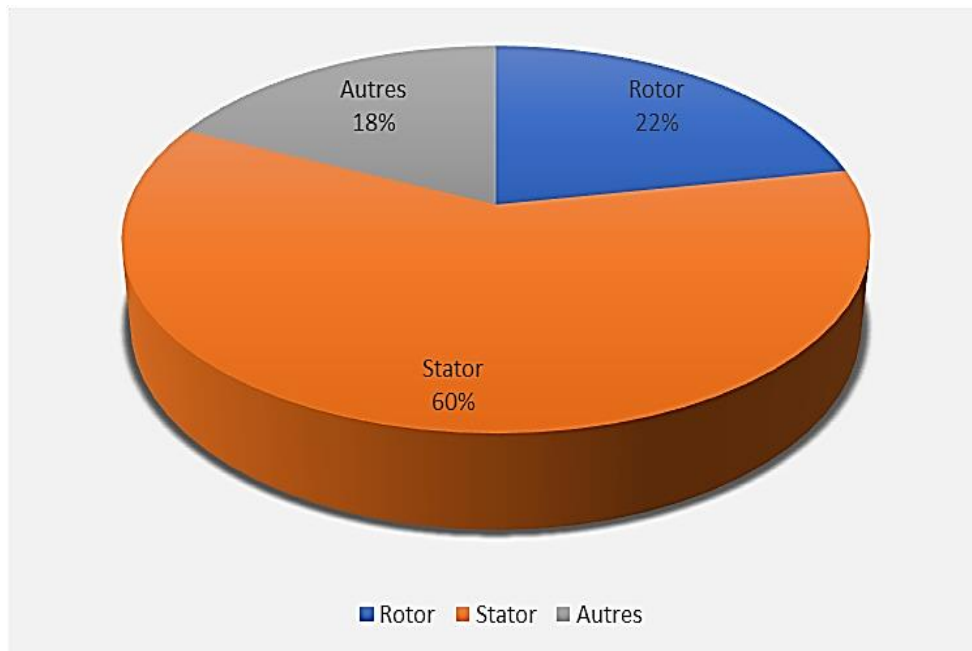


Figure II-8 : Proportion des défauts

Une autre étude statistique faite sur des machines de grandes puissances (de 100 kW à 1 MW) donne des résultats qui sont présentés sur la (Figure II-9).

Les contraintes mécaniques sont plus grandes pour ces types de machines ce qui explique le taux élevé des pannes dues aux roulements.[33]

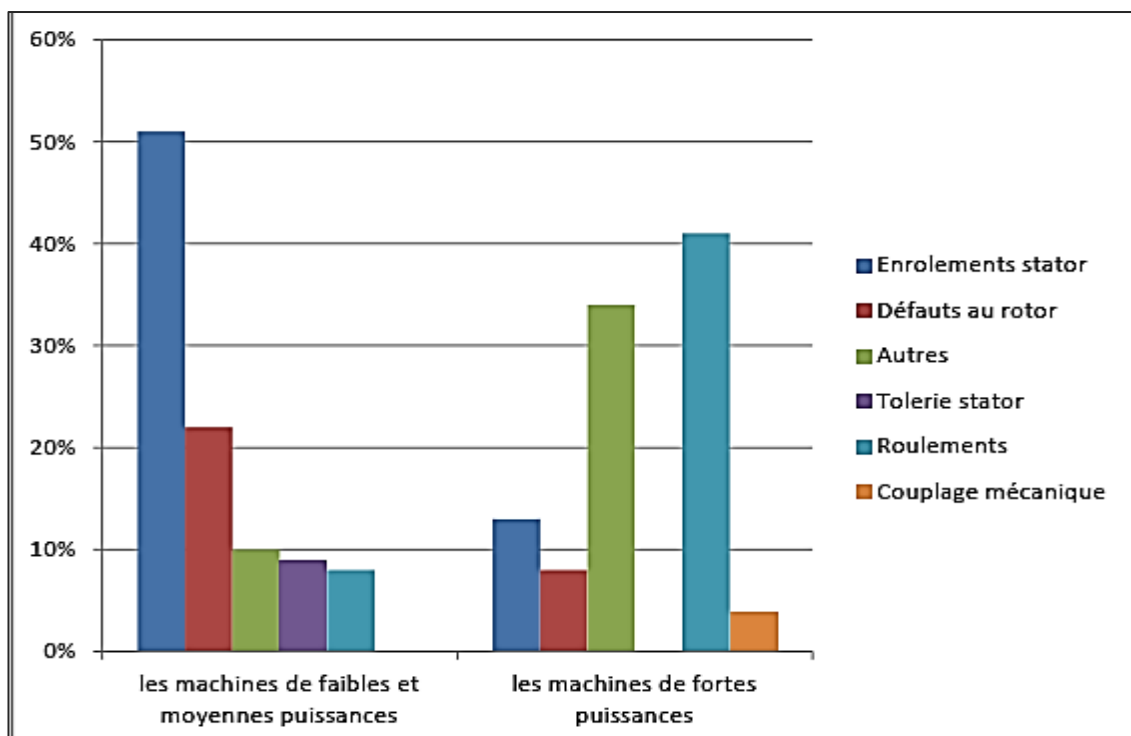


Figure II-9 : Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances et les machines de fortes puissances.

## II.7.2 Types des défauts de La machine asynchrone

La machine asynchrone peut présenter différents types de défauts qui peuvent être classifiés comme suite [34] :

- **Défauts du stator** : qui résultent d'un défaut dans un ou plusieurs enroulements de phase statorique, ou d'un mauvais raccordement des enroulements statoriques ;
- **Défauts du rotor** : barre cassée de l'enroulement du rotor, anneau cassé ou court-circuit ; L'excentricité statique et dynamique ;
- **Défauts des roulements** ; Les défauts de roulement, les défauts de stator ou d'induit, les barres ou anneaux de rotor cassés et les défauts liés à l'excentricité sont les plus courants et nécessitent donc une attention particulière. Ces défaillances produisent un ou plusieurs des symptômes suivants :
  - ✓ Un déséquilibre des phases électriques (courants et tensions) ;
  - ✓ Fluctuations accrues de couple ;
  - ✓ Diminution du couple moyen ;
  - ✓ Augmentations des pertes et réduction d'efficacité ;
  - ✓ Chauffage excessif ;

## II.7.3 Présentation des différents défauts

### II.7.3.1 Défauts au stator

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

- Défaut d'isolant ;
- Court-circuit entre spires ;
- Court-circuit entre phases ;
- Court-circuit phase/bâti ;
- Court-circuit entre bobines ;
- Déséquilibre d'alimentation ;
- Défaut de circuit magnétique ;

Les différents courts-circuits sont représentés dans la ; figure ci-dessous :

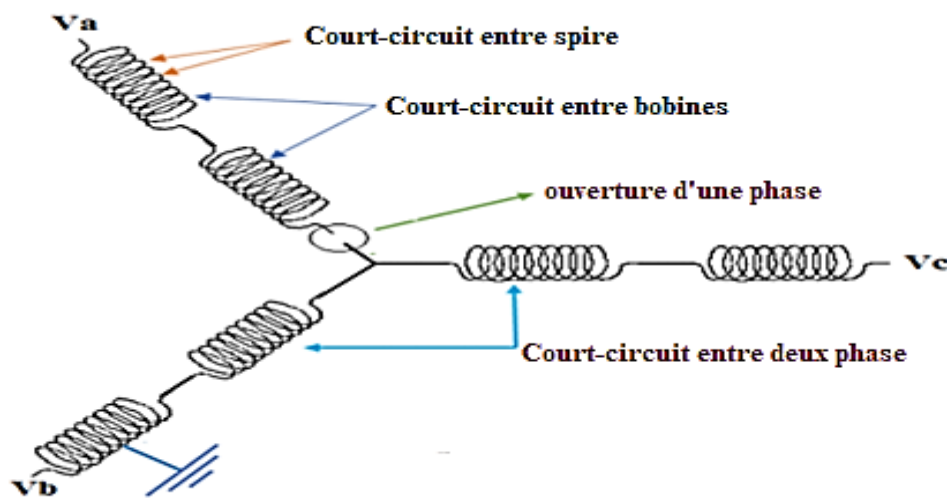


Figure II-10 : Les différents court-circuit statorique possibles

### 1) Défaut d'isolant dans un enroulement

Les défauts d'isolant dans les enroulements peuvent entraîner des courts-circuits. En effet, les pertes d'énergie (Joule, fer, mécanique, etc.) provoquent une augmentation de la température des différents composants du moteur. Les matériaux d'isolation ont des limites de température, de tension et de résistance mécanique. Lorsque ces limites sont dépassées, un court-circuit peut se produire dans l'enroulement concerné..[35]

#### ➤ Les différentes causes pour ce type de défaut sont :

- ✓ Dégradation de l'isolant à la fabrication.
- ✓ Tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation.
- ✓ Courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit
- ✓ Convertisseur, une surcharge.
- ✓ Vibrations mécaniques.
- ✓ Vieillessement naturel des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie limitée. Même dans une utilisation normale, l'isolant finit naturellement par se dégrader.

## 2) Court-circuit entre spires

Le court-circuit entre les spires dans la même phase est un défaut relativement courant. Ce défaut est causé par un ou plusieurs problèmes d'isolation dans les enroulements concernés (Figure II 11). Il entraîne une augmentation du courant statorique dans la phase touchée et une légère variation de l'amplitude des autres phases, ce qui modifie le facteur de puissance et amplifie le courant dans le circuit rotorique du moteur asynchrone.



*Figure II-11 : court-circuit entre spires*

## 3) Court-circuit entre phases

Le court-circuit entre phases est une défaillance pouvant survenir n'importe où dans l'enroulement, avec des conséquences variables selon l'emplacement. Cela complique l'analyse de son impact sur le système. Un court-circuit près de l'alimentation entraînerait des courants élevés, pouvant provoquer la fusion des conducteurs ou déclencher les dispositifs de protection. Un court-circuit près du neutre entre deux phases crée un déséquilibre sans fusion des conducteurs. Les courants statoriques sont alors totalement déséquilibrés, proportionnels à la gravité de la défaillance. Les courants dans les barres et les anneaux augmentent lors de cette défaillance. La détection de ce type de défaillance repose sur le déséquilibre des courants de phase.





Figure II-12 : Court-circuit dans une phase

#### 4) Court-circuit phase/bâti

Un court-circuit entre la phase et le bâti d'un moteur peut être dangereux pour la sécurité des personnes. Il est important de mettre en place des dispositifs de protection tels que des disjoncteurs différentiels pour détecter et éviter ce type de défaut. Lorsqu'un court-circuit se produit, le courant dans la phase concernée augmente, ce qui peut entraîner une augmentation de la température et des problèmes d'isolation dans l'enroulement. De plus, ce défaut peut générer une composante homopolaire et provoquer l'apparition d'un couple pulsatoire. La détection de ce type de défaut peut être réalisée en mesurant le courant de fuite.

#### 5) Défaut de circuit magnétique

Les défauts de circuit magnétique dans la plupart des cas entraînent un fonctionnement asymétrique de la machine, ce qui aggrave le problème en provoquant des phénomènes tels que la surchauffe, la surtension, l'augmentation importante du courant, etc.

##### II.7.3.2 Défauts au rotor

Les défauts les plus fréquents et au niveau du rotor peuvent être définis comme :

- La rupture des barres dans les machines asynchrones ;
- La rupture d'une portion de l'anneau de court-circuit dans les machines asynchrones ;
- L'excentricité statique et dynamique ;

### 1) Ruptures des barres dans les machines asynchrones

Les ruptures de barres dans les machines asynchrones sont parmi les défauts les plus fréquents au niveau du rotor. Les barres cassées peuvent se produire soit au niveau de l'encoche, soit à l'extrémité qui se connecte à l'anneau court-circuit.

La dégradation des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des vibrations. Cela se traduit par des vitesses de rotation oscillantes, des vibrations mécaniques et un comportement erratique de la machine. L'amplitude élevée de ces vibrations accélère également la détérioration des machines..[36]

### 2) Ruptures d'anneaux

La rupture d'une partie de l'anneau de court-circuit dans un moteur à induction à cage d'écureuil est une panne aussi fréquente que la rupture d'une barre. Ces ruptures peuvent être dues à la présence de bulles d'air ou à des différences de dilatation entre la barre et l'anneau. Lorsqu'une partie de l'anneau se rompt, la répartition du courant dans les barres du rotor devient déséquilibrée, ce qui entraîne un effet de modulation d'amplitude sur le courant statorique.

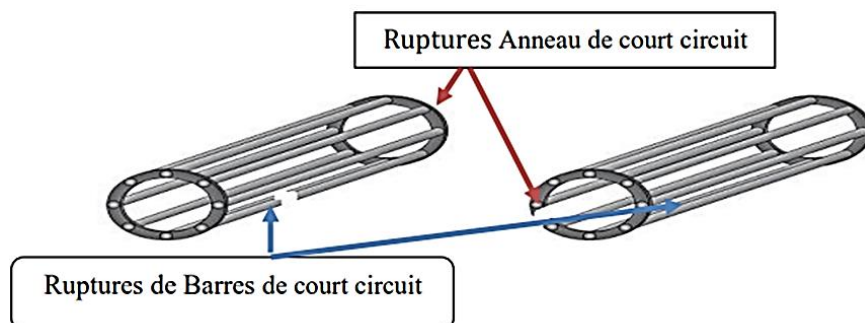


Figure II-13. Défaut de rupture de barres et anneau d'un rotor a cage [37].

### 3) Excentricité statique et dynamique

Les machines électriques peuvent présenter un défaut d'excentricité du rotor qui entraîne des oscillations de couple (décalages entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor). Ce type de défaut peut provoquer une flexion de l'arbre, un désalignement du rotor par rapport au stator, une usure des roulements, voire un déplacement du noyau du stator. En général, on distingue trois cas d'excentricité (Figure II.14) [38]:

- **L'excentricité statique** : le rotor est déplacé par le centre de l'alésage du stator, mais il tourne toujours autour de son axe.
- **L'excentricité dynamique** : Le rotor est centré dans l'alésage mais ne tourne pas Détails sur cet axe.
- **L'excentricité mixte** : associant les deux cas précédemment cités.

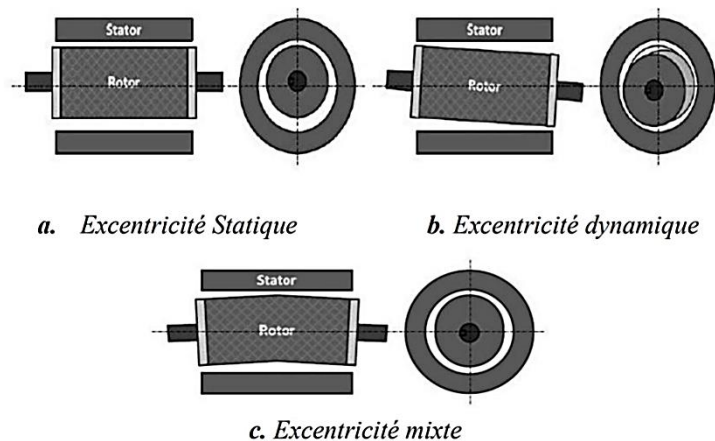


Figure II-14: Types d'excentricité [39].

### II.7.3.3 Défaillances des roulements mécaniques

Les roulements à billes sont les composants de base des machines à induction, assurant l'interface mécanique entre le stator et le rotor. Ils maintiennent l'axe de la machine et garantissent la rotation fluide du rotor. Les roulements à billes sont largement utilisés dans l'industrie. Ils se composent généralement de deux bagues, une bague intérieure et une bague extérieure, avec une série de billes ou de rouleaux entre les deux.

Ce type de défaut est courant dans les machines à haute performance. Il est généralement lié à l'usure des roulements, en particulier à la détérioration des billes ou des chemins de roulement. Les causes possibles sont les suivantes [40] :

- ✓ L'usure due au vieillissement.
- ✓ La température de fonctionnement élevée.
- ✓ La perte de lubrification.
- ✓ L'huile contaminée (par des paillettes métalliques issues de la dégradation des billes ou de la bande de roulement).
- ✓ Le défaut de montage.
- ✓ Les courants d'arbres

- ✓ Décollement, effritement de surface provoqué par une surcharge

Ce type de défaut entraîne des fluctuations de couple, l'apparition de jeux et de jeux supplémentaires entre les bagues intérieure et extérieure des roulements, provoquant des vibrations dues au mouvement du rotor autour de l'axe longitudinal de la machine. Dans les pires cas, des roulements défectueux peuvent entraîner un blocage du moteur.

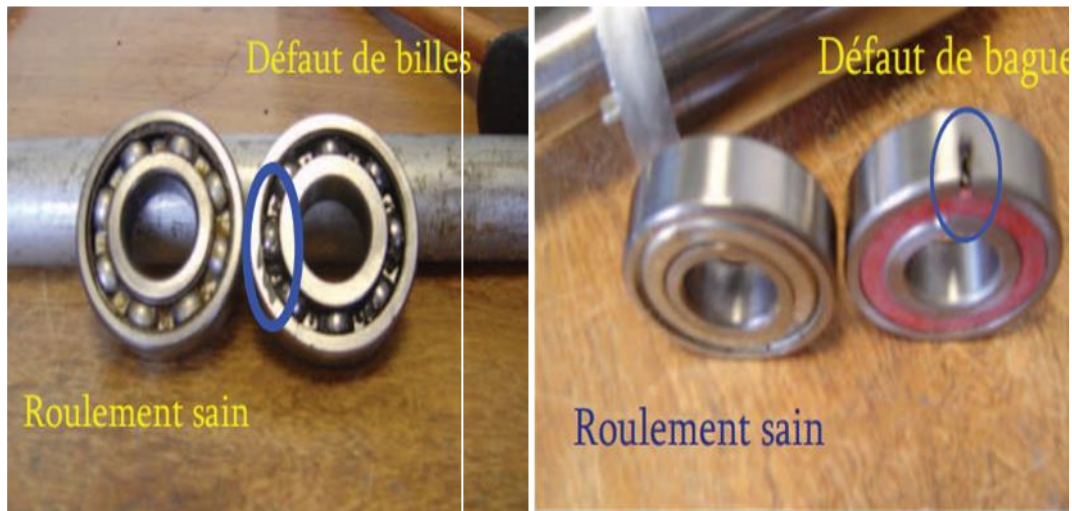


Figure II-15 : défaut de roulement

#### II.7.3.4 Défaut du flasque

Les défauts des brides sur les machines asynchrones sont fréquents lors de la phase de fabrication. En effet, un désalignement des brides peut entraîner un désalignement de la machine. Ce type de défaut peut être détecté par une analyse vibratoire ou une analyse harmonique du courant traversant la machine.[40]



Figure II-16: flasque défectueux

### II.7.3.5 Défaut de ventilateur

Le moteur doit être refroidi par un ventilateur situé à l'arrière de ce dernier. En aspirant de l'air frais depuis l'avant du moteur et en le soufflant par le capot, le moteur est thermiquement équilibré. Dans certains cas, le ventilateur peut être endommagé à cause de [40] :

- Position incorrecte par rapport à l'arbre du moteur ;
- En raison d'une mauvaise rotation. ;
- Nageoire cassée ;

Donc Le moteur chauffe parce qu'il ne trouve pas assez d'air pour se refroidir. Cela augmente la température à l'intérieur du moteur et court-circuite les enroulements.

### II.7.4 Les Techniques de traitement du signal pour la détection et l'analyse des défauts

Les techniques de traitement du signal sont couramment utilisées pour la détection et l'analyse des défauts dans différents systèmes. Voici quelques-unes des techniques utilisées à cette fin [41] [42] :

#### II.7.4.1 Analyse spectrale

L'analyse spectrale est une technique de traitement du signal qui permet d'étudier les composantes fréquentielles d'un signal. Elle est utilisée pour détecter les défauts en identifiant les anomalies dans le spectre fréquentiel du signal. Voici quelques méthodes couramment utilisées dans l'analyse spectrale :

- **Transformée de Fourier** : La transformée de Fourier permet de représenter un signal dans le domaine fréquentiel en décomposant le signal en une combinaison de sinus et de cosinus. Cela permet d'identifier les différentes composantes fréquentielles présentes dans le signal, y compris les fréquences associées aux défauts.
- **Transformée en ondelettes** : La transformée en ondelettes est une méthode d'analyse qui permet de détecter les changements de fréquence dans un signal. Elle fournit une représentation à la fois temporelle et fréquentielle du signal, ce qui peut être utile pour détecter des défauts à des fréquences spécifiques ou pour analyser des signaux non stationnaires.

### **II.7.4.2 Analyse temporelle**

L'analyse temporelle consiste à étudier l'évolution d'un signal dans le temps. Elle permet de détecter les défauts en identifiant les variations anormales, les changements brusques ou les motifs récurrents dans le signal. Voici quelques techniques couramment utilisées dans l'analyse temporelle :

- **Enveloppe de signal** : L'enveloppe de signal est une représentation qui permet de suivre les variations d'amplitude d'un signal dans le temps. Elle peut mettre en évidence les fluctuations anormales ou les variations caractéristiques associées à des défauts.
- **Amplitude instantanée** : L'amplitude instantanée est utilisée pour mesurer l'amplitude du signal à chaque instant. Cela permet de détecter les variations anormales ou les pics de signal qui pourraient indiquer la présence de défauts.

## **II.8 Conclusion**

Ce chapitre a donné un aperçu des machines asynchrones, à propos des défauts de cette machine, sa description, ses types, ses avantages et ses inconvénients. Rappel également termes nécessaires pour comprendre le fonctionnement d'une machine synchrone. et les techniques utilisées dans le domaine de traitement signale pour l'analyse des défauts.

Dans le chapitre suivant on va entamer une modélisation de défaut de la machine asynchrone en utilisant la simulation avec la transformation de Park. Nous utiliserons également l'analyse FFT (Fast Fourier Transform) pour analyser les fréquences de chaque défaut.

*Chapitre III: Diagnostic de  
défauts machines asynchrones*

### **III.1 Introduction**

Le diagnostic des machines asynchrones est un processus important pour s'assurer du bon fonctionnement de ces machines. Pour diagnostiquer une machine asynchrone, il est essentiel de disposer d'un modèle précis de la machine, ce qui permet de simuler son comportement en conditions normales et en conditions dégradées.

La première étape du diagnostic consiste donc à modéliser la machine asynchrone. Cette modélisation permet de décrire le comportement électromagnétique de la machine, en prenant en compte les paramètres électriques et mécaniques qui influencent son fonctionnement [44].

Une fois que la machine est modélisée, il est possible de simuler son comportement à l'aide de la transformation de Park. Cette méthode de simulation permet de transformer les équations triphasées de la machine en équations équivalentes en courant continu, ce qui facilite grandement la simulation et l'analyse du comportement de la machine.

Enfin, pour analyser les résultats de la simulation, il est souvent nécessaire d'utiliser la méthode de FFT (Fast Fourier Transform). Cette méthode permet de transformer un signal temporel en un signal en fréquence, ce qui permet de détecter des anomalies dans le comportement de la machine [46].

En somme, le diagnostic des machines asynchrones est un processus complexe qui nécessite une modélisation précise de la machine, une simulation par transformation de Park et une analyse approfondie des résultats obtenus à l'aide de la méthode de FFT

### **III.2 Modélisation de la machine asynchrone**

#### **III.2.1 Hypothèses simplificatrices**

Pour simplifier la présentation des relations de base qui régissent le fonctionnement et la stratégie de commande du moteur asynchrone, on peut faire les hypothèses suivantes [43]:

- ✓ L'entrefer est d'épaisseur uniforme.
- ✓ L'effet d'encoche est négligeable.
- ✓ Distribution spatiale des forces magnétomotrices d'entrefer est sinusoïdale.
- ✓ Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante.
- ✓ Pertes ferromagnétiques négligeables.



✓ Les résistances des enroulements ne varient pas en fonction de la température de fonctionnement et on néglige également l'effet de peau. Ainsi, parmi les conséquences importantes de ces hypothèses, on peut citer :

- L'additivité du flux.
- La constance des inductances propres.
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle électrique entre leurs axes magnétiques.

La figure (III 1) présente le schéma de la machine asynchrone représentée dans le repère(abc) :

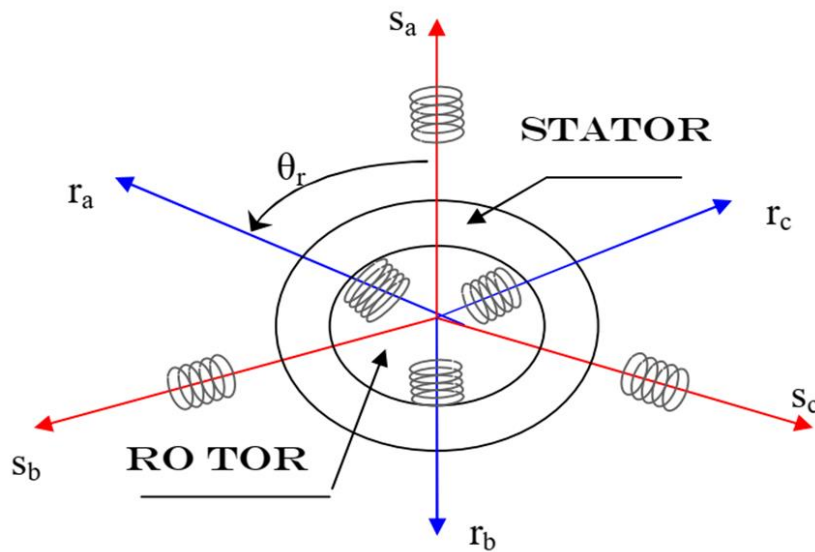


Figure III-1 : schéma de la machine asynchrone représentée dans le repère(abc) [43].

En supposant des hypothèses simplificatrices et pour une machine équilibrée, les équations de la machine peuvent être écrites comme suit :

### III.2.2 Équations électriques

Dans l'hypothèse des simplifications précédemment décrites, les équations pour les tensions des trois phases statoriques et rotoriques peuvent être exprimées de la manière suivante [43] [44] :

**Stator :**

$$\begin{cases} [Vs]_a = [Rs]_a[Is]_a + \frac{d}{dt}[\Phi s]_a \\ [Vs]_b = [Rs]_b[Is]_b + \frac{d}{dt}[\Phi s]_b \\ [Vs]_c = [Rs]_c[Is]_c + \frac{d}{dt}[\Phi s]_c \end{cases} \quad (III-1)$$

**Avec :**

$[Vs]_a, [Vs]_b, [Vs]_c$ : les tensions instantanées aux bornes de phase stator

$[\Phi s]_a, [\Phi s]_b, [\Phi s]_c$ : Les flux statorique

$[Is]_a, [Is]_b, [Is]_c$  : Les courants instantanées circulants dans la phase statorique

**Rotor :**

$$\begin{cases} [Vr]_a = [Rr]_a [Ir]_a + \frac{d}{dt} [\Phi r]_a = 0 \\ [Vr]_b = [Rr]_b [Ir]_b + \frac{d}{dt} [\Phi r]_b = 0 \\ [Vr]_c = [Rr]_c [Ir]_c + \frac{d}{dt} [\Phi r]_c = 0 \end{cases} \quad (\text{III-2})$$

**Avec :**

$[Vr]_a, [Vr]_b, [Vr]_c$ : les tensions instantanées aux bornes de phase rotor.

$[\Phi r]_a, [\Phi r]_b, [\Phi r]_c$ : Les flux rotorique.

$[Ir]_a, [Ir]_b, [Ir]_c$  : Les courants instantanées circulants dans la phase rotorique.

Les équations précédemment (1) et (2) présentées peuvent être réécrites sous la forme suivante :

$$[Vs]_{abc} = [Rs]_{abc} \times [Is]_{abc} + \frac{d}{dt} \times [\Phi s]_{abc} \quad (\text{III-3})$$

$$[Vr]_{abc} = [Rr]_{abc} \times [Ir]_{abc} + \frac{d}{dt} \times [\Phi r]_{abc} = 0 \quad (\text{III-4})$$

$$\text{Et : } [Rs] = \begin{bmatrix} Rs & 0 & 0 \\ 0 & Rs & 0 \\ 0 & 0 & Rs \end{bmatrix}, \quad [Rr] = \begin{bmatrix} Rr & 0 & 0 \\ 0 & Rr & 0 \\ 0 & 0 & Rr \end{bmatrix}$$

$Rs, Rr$ : résistance propre statorique et rotorique.

### III.2.3 Equation magnétique

L'expression des flux sont :

$$[\Phi s]_{abc} = [Ls] \times [Is]_{abc} + [Msr] \times [Ir]_{abc} \quad (\text{III 5})$$

$$[\Phi r]_{abc} = [Lr] \times [Ir]_{abc} + [Mrs] \times [Is]_{abc} \quad (\text{III 6})$$

$$\text{Et : } [Ls] = \begin{bmatrix} ls & Ms & Ms \\ Ms & ls & Ms \\ Ms & Ms & ls \end{bmatrix}, \quad [Lr] = \begin{bmatrix} lr & Mr & Mr \\ Mr & lr & Mr \\ Mr & Mr & lr \end{bmatrix}$$

Avec :

$L_s = (l_s - M_s)$  : inductance cyclique de l'armature S

$L_r = (l_r - M_r)$  : inductance cyclique de l'armature R

$l_s$  et  $l_r$ : Les inductances propres statorique et rotorique

$M_s$  et  $M_r$ : Les inductances mutuelle entre phases statorique et rotorique

$$M_s = -l_s/2 \quad \text{et} \quad M_r = -l_r/2$$

L'inductances mutuelle entre phases statorique et rotorique est définie par :

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

Avec :  $[M_{rs}] = [M_{sr}]^T$

$M_{rs}$ : Mutuelle inductance entre une phase statorique et une phase rotorique

En remplaçant les équations de flux )III 3) et )III 4) dans les équations de tension (III 1), (III 2), nous obtenons :

$$[V_s]_{abc} = [R_s]_{abc} \times [I_s]_{abc} + \frac{d}{dt} \times ([L_s] \times [I_s]_{abc} + [M_{sr}] \times [I_r]_{abc}) \quad (\text{III-7})$$

$$[V_r]_{abc} = [R_s]_{abc} \times [I_s]_{abc} + \frac{d}{dt} \times ([L_r] \times [I_r]_{abc} + [M_{rs}] \times [I_s]_{abc}) = 0 \quad (\text{III-8})$$

Nous pouvons constater que les équations (III -7, III- 8) sont très complexes à résoudre, ce qui rend l'étude de la machine asynchrone très difficile. Pour résoudre ce problème, nous avons recours à la Transformation de Park.

### III.3 Transformation de Park

La transformation de Park, également connue sous le nom de transformation  $\alpha\beta 0$  ou transformation dq0, est une méthode couramment utilisée dans l'analyse des machines électriques, y compris les machines asynchrones, pour simplifier les calculs en convertissant les grandeurs statoriques et rotoriques dans un système de coordonnées à deux axes (dq0) en quadrature. Il simplifiant ainsi les calculs et facilitant l'analyse et la commande de la machine. [44]

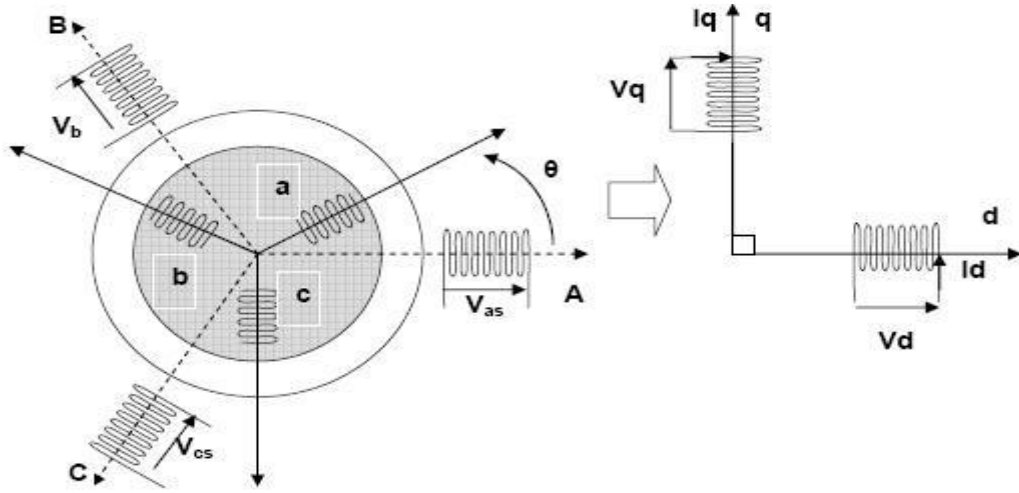


Figure III-2 : Model de Park de la MAS [45].

Pour le passage du système triphasé vers le système biphasé, on a les équivalents suivants :

$$\text{Tension : } [V]_{dq0} = [P(\theta)][V]_{abc}$$

$$\text{Courant : } [I]_{dq0} = [P(\theta)][I]_{abc} \quad (\text{III-9})$$

$$\text{Flux : } [\Phi]_{dq0} = [P(\theta)][\Phi]_{abc}$$

Avec :

$[P(\theta)]$  : le matrice de park défini pare :

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

$$\text{Et : } [V]_{abc} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad [I]_{abc} = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad [\Phi]_{abc} = \begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{bmatrix}$$

Donne le cas d'un passage inverse, on a :

$$[P(\theta)]^T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

Alors : les équivalents précédents s'écrivent à la forme suivante

$$\begin{aligned} \text{Tension : } [V]_{abc} &= [P(\theta)]^T [V]_{dq0} \\ \text{Courant : } [I]_{abc} &= [P(\theta)]^T [I]_{dq0} \\ \text{Flux : } [\Phi]_{abc} &= [P(\theta)]^T [\Phi]_{dq0} \end{aligned} \quad (\text{III-10})$$

$$\text{Et : } [V]_{dq0} = \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ 0 \end{bmatrix} \quad [I]_{dq0} = \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ 0 \end{bmatrix} \quad [V]_{dq0} = \begin{bmatrix} \Phi_d \\ \Phi_q \\ 0 \end{bmatrix}$$

### III.3.1 Application de Transformation de Park

L'application de la transformation de Park aux modèles matriciels électriques (III- 3), (III- 4), et magnétiques (III- 5), (III- 6), permet d'obtenir les équations suivantes [44] :

#### a) Les équations électriques

$$\begin{cases} V d_s = R_s \cdot I d_s + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \cdot \Phi d_s \\ V q_s = R_s \cdot I q_s + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} - \omega_s \cdot \Phi q_s \end{cases} \quad (\text{III-11})$$

$$\begin{cases} V d_r = R_r \cdot I d_r + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \cdot \Phi d_s = 0 \\ V q_r = R_r \cdot I q_r + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \cdot \Phi q_s = 0 \end{cases} \quad (\text{III- 12})$$

#### b) Les équations magnétiques

$$\begin{cases} \Phi d_s = L_s \cdot I d_s + M_{sr} \cdot I d_r \\ \Phi q_s = L_s \cdot I q_s + M_{sr} \cdot I q_r \end{cases} \quad (\text{III-13})$$

$$\begin{cases} \Phi d_r = L_r \cdot I d_r + M_{sr} \cdot I d_s \\ \Phi q_r = L_r \cdot I q_r + M_{sr} \cdot I q_s \end{cases} \quad (\text{III-14})$$

### III.3.2 Equation mécanique

L'équation mécanique qui lie les couples à la vitesse de rotation est donnée par :

$$j \cdot \frac{d\omega}{dt} = C_{em} - C_{ch} - f \cdot \omega \quad (\text{III-15})$$

L'expression de couple électromécanique correspondante à la représentation choisie est :

$$C_{em} = P \cdot \frac{M_{sr}}{L_r} \cdot (\Phi_{dr} \cdot I_{qs} - \Phi_{qr} \cdot I_{ds}) \quad (\text{III-16})$$

Avec :

$\frac{d\omega}{dt}$  : La dérivée de la vitesse angulaire ( $\omega$ ) par rapport au temps (t). Elle représente le taux de variation de la vitesse angulaire du moteur

$C_{em}$ : C'est le couple électromagnétique développé par le moteur. Il est généralement exprimé en Newton-mètre (Nm)

$C_{ch}$ : C'est le couple de charge appliqué sur l'arbre du moteur. Il est généralement exprimé en Newton-mètre (Nm).

$f$ : C'est un coefficient de frottement. Il représente les pertes mécaniques du moteur, telles que les frottements internes, les pertes par effet Joule, etc. Est exprimé en Newton-mètre par radian par seconde (Nm/(rad/s))

$\omega$ : C'est la vitesse angulaire du moteur, exprimée en radian par seconde (rad/s). La vitesse angulaire représente la vitesse de rotation de l'arbre du moteur.

A partir des expressions (III-13) et (III-14), les flux statoriques et les courant rotoriques peuvent être exprimés en fonction des **variables d'état** alors :

Par L'application de la transformation de Laplace avec quelques manipulations sur les équations nous avons obtenu les équations suivantes :

$$i_{sd} = \frac{1}{\sigma L_s s + (R_s + \frac{M_{sr}^2}{T_r L_r})} \left( v_{sd} - \frac{M_{sr}}{L_r} v_{rq} + \omega_{sp} \sigma L_s i_{sq} + \frac{M_{sr}}{T_r L_r} \phi_{rd} + \omega \frac{M_{sr}}{L_r} \phi_{rq} \right) \quad (\text{III-17})$$

$$i_{sq} = \frac{1}{\sigma L_s s + (R_s + \frac{M_{sr}^2}{T_r L_r})} \left( v_{sd} - \frac{M_{sr}}{L_r} v_{rq} + \omega_{sp} \sigma L_s i_{sd} + \frac{M_{sr}}{T_r L_r} \phi_{rq} + \omega \frac{M_{sr}}{L_r} \phi_{rd} \right) \quad (\text{III-18})$$

$$\phi_{rd} = \frac{1}{s + 1/T_r} \left( v_{rd} + \frac{M_{sr}}{T_r} i_{sd} + \omega_{rp} \phi_{rq} \right) \quad (\text{III-19})$$

$$\phi_{rq} = \frac{1}{s + 1/T_r} \left( v_{rq} + \frac{M_{sr}}{T_r} i_{sq} + \omega_{rp} \phi_{rd} \right) \quad (\text{III-20})$$

### III.4 Partie de simulation

La simulation de la machine asynchrone à l'état sain implique la modélisation mathématique des équations électromagnétiques, mécaniques et électriques, suivie d'une résolution numérique. Cela permet d'analyser les performances de la machine dans des conditions de fonctionnement normales et d'optimiser sa conception et son contrôle. Le modèle de simulation est présenté dans la figure suivante :

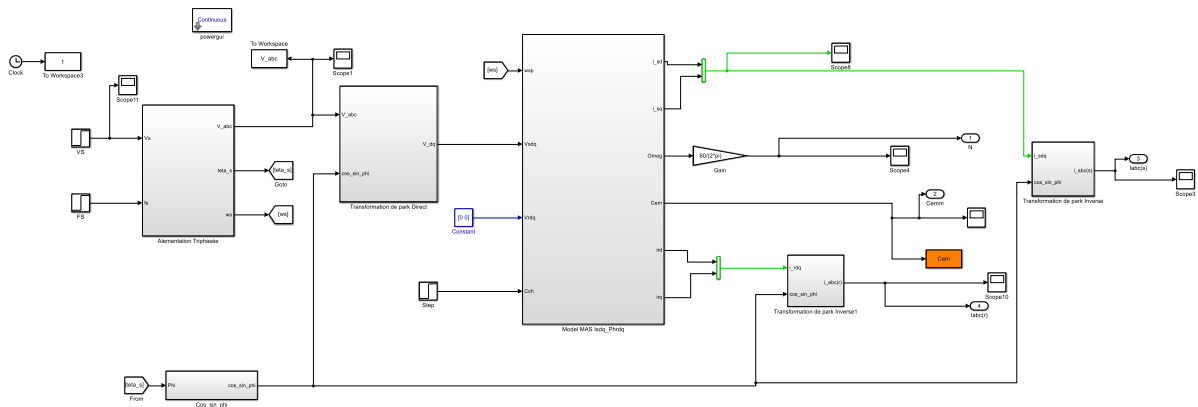


Figure III-3 : Modèle de simulation

### III.5 Les résultats de simulation a l'état sain

#### III.5.1 A vide

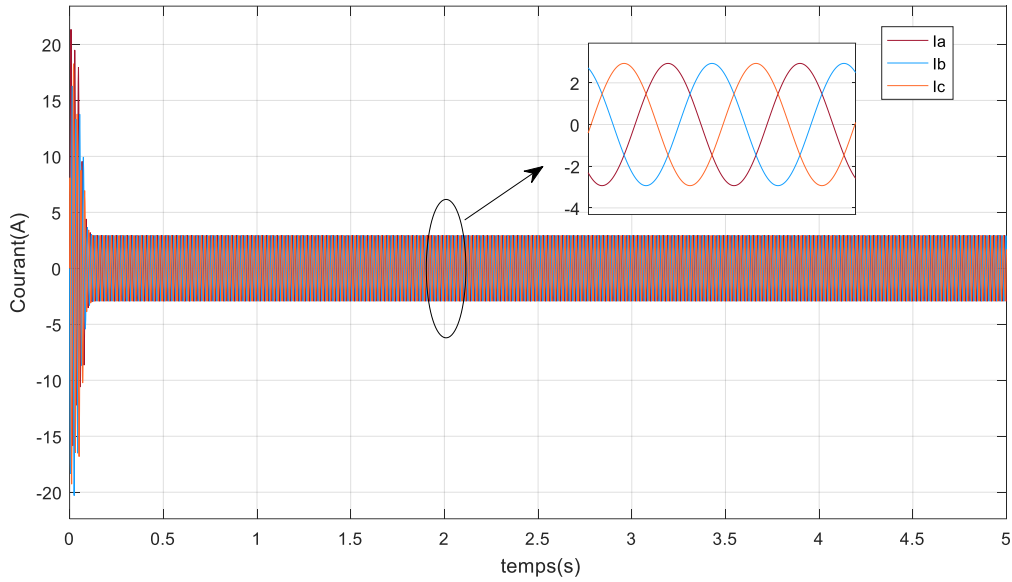


Figure III-4 : Le courant statorique

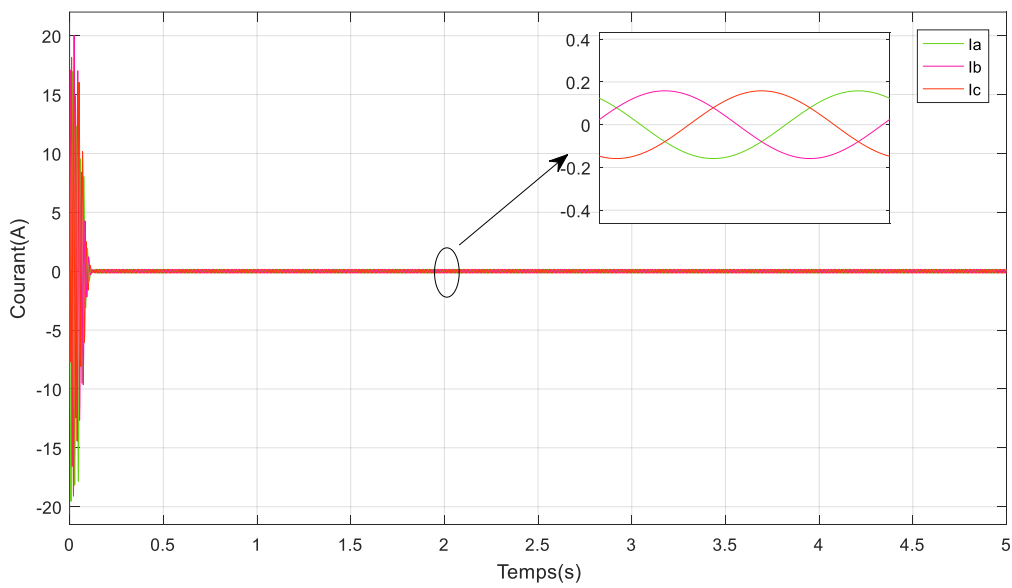


Figure III-5 : Le courant rotorique



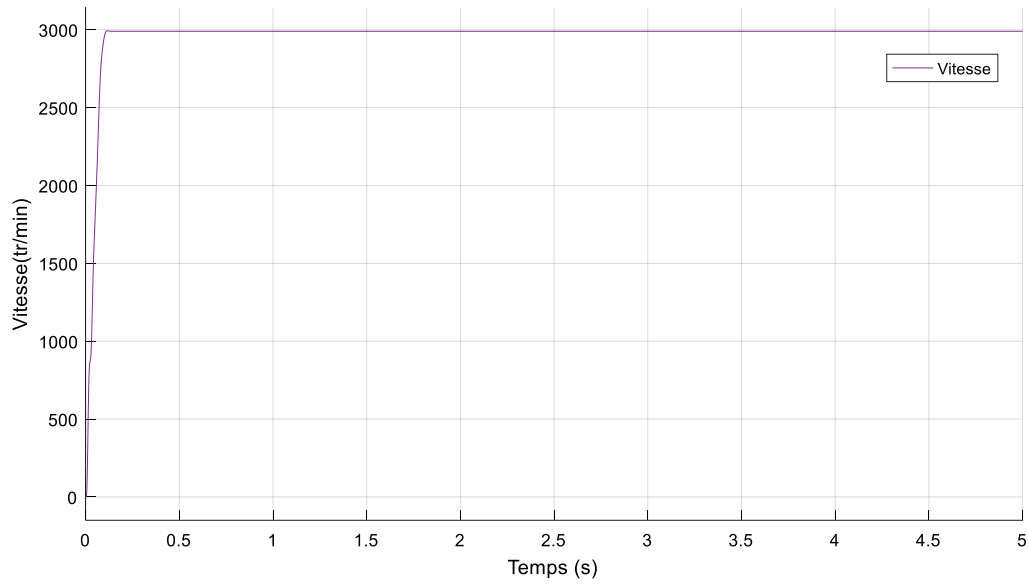


Figure III-6 : La vitesse

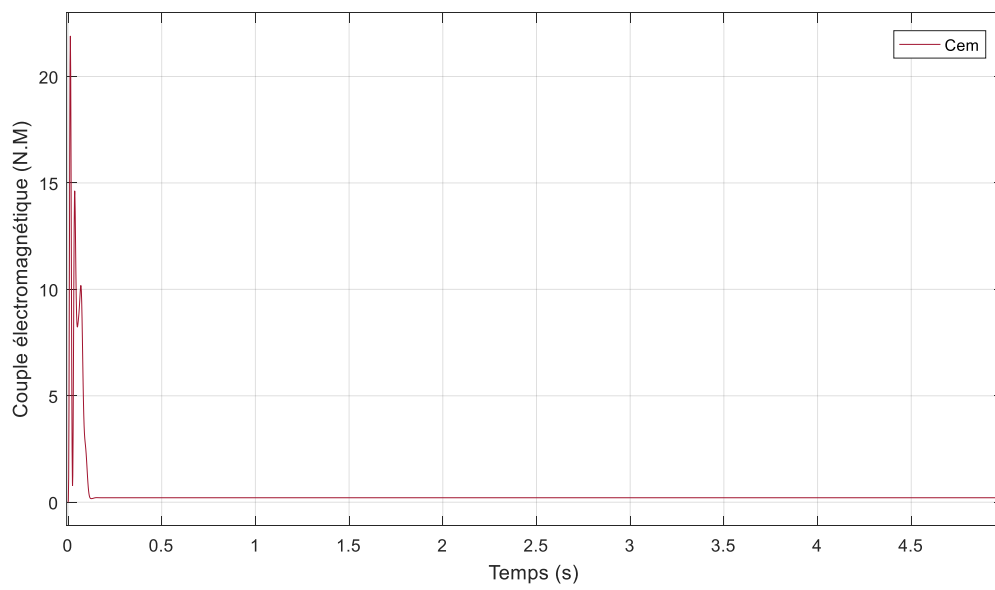


Figure III-7 : Le couple électromagnétique

III.5.2 En charge

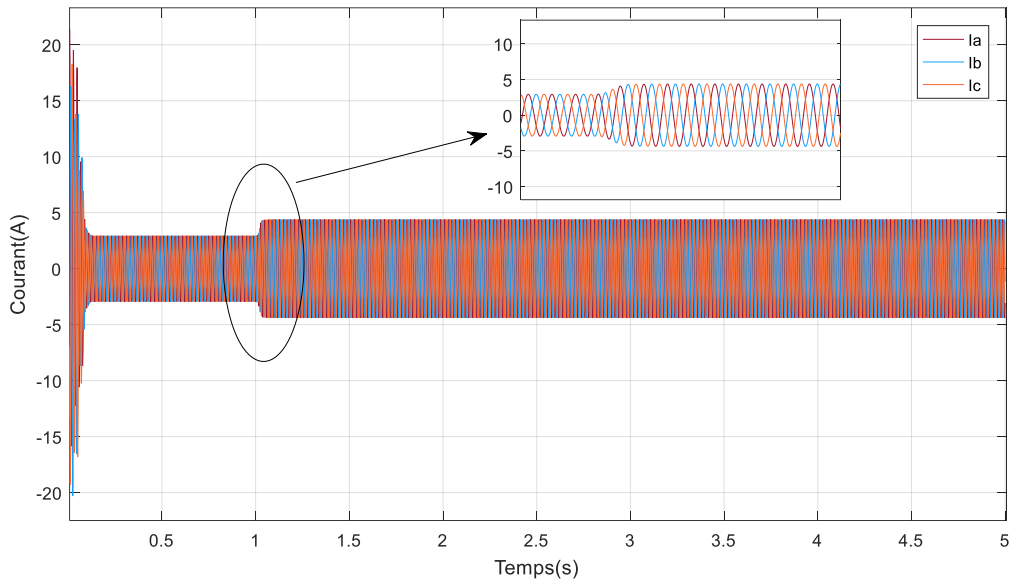


Figure III-8 : Le courant statorique a charge

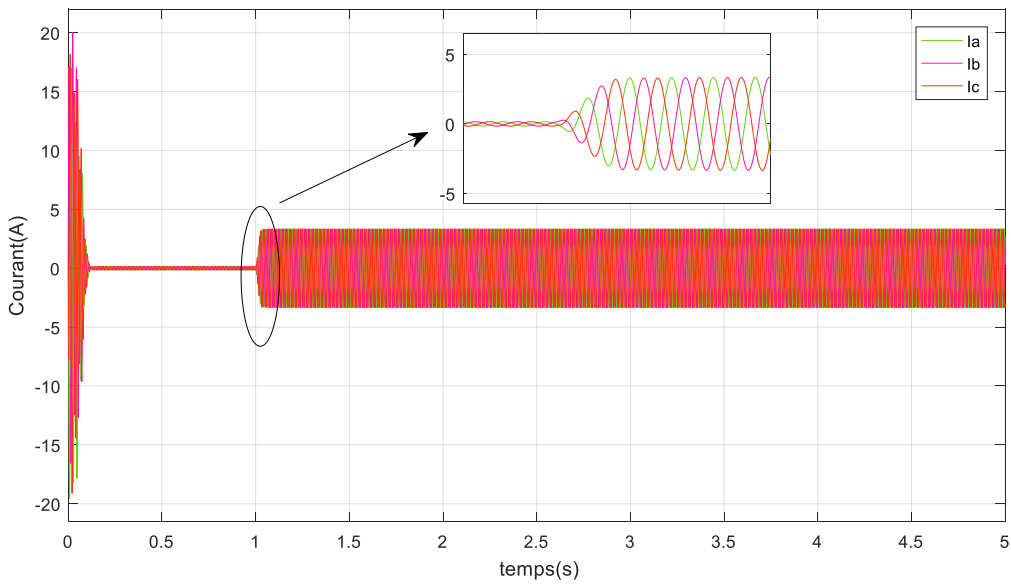


Figure III-9 : Le courant rotorique a charge

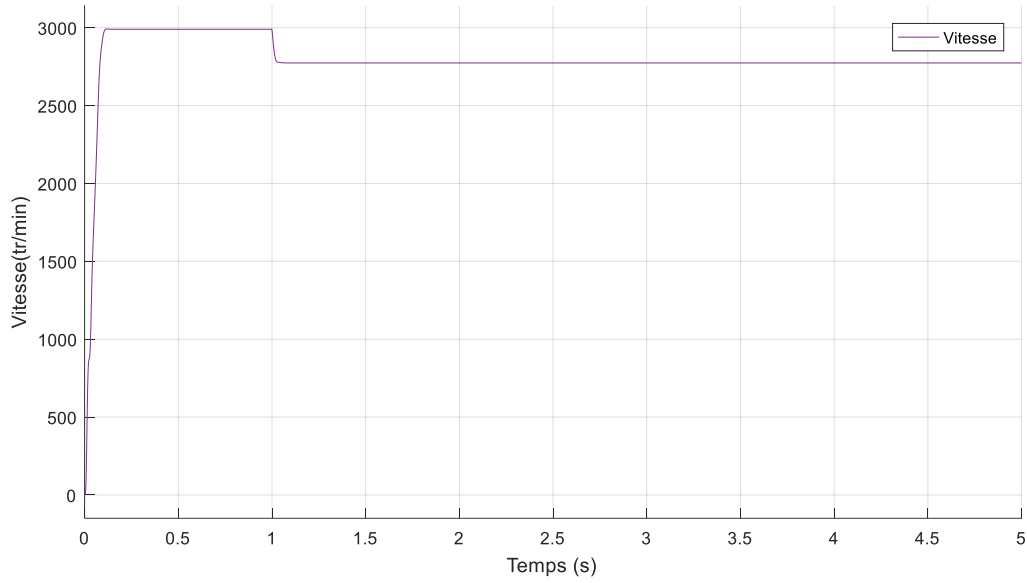


Figure III-10: La vitesse en présence de la charge

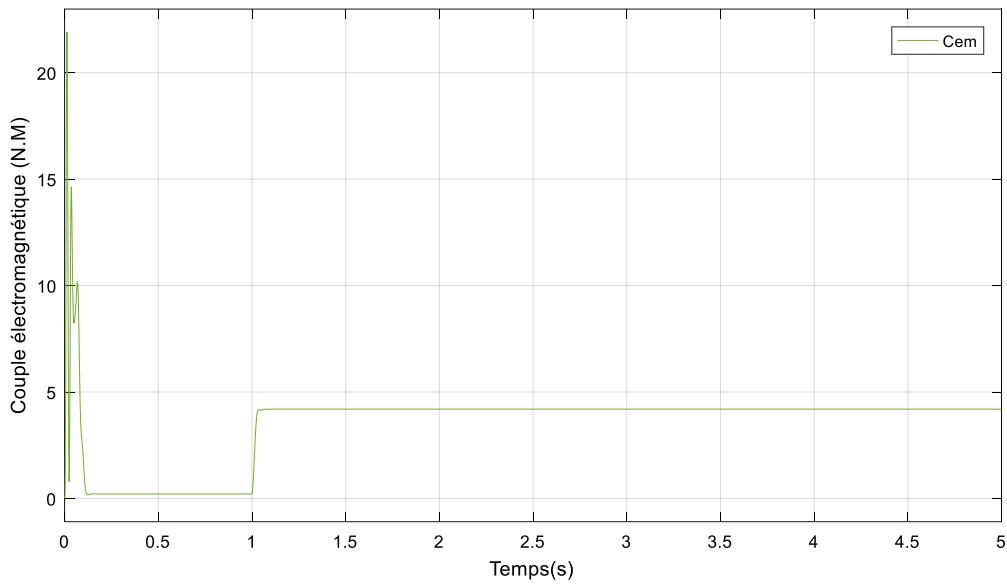


Figure III-11: Le couple électromagnétique en présence de la charge

## III.6 L'interprétation a l'état sain

### III.6.1 A vide

- **Courant statorique** : Le courant statorique représente le courant qui circule dans les enroulements du stator de la machine asynchrone. Dans la figure (III- 4), Les résultats de la simulation peuvent afficher le courant statorique instantané pour chaque phase de la machine, nous avons remarqué que le courant statorique doit être équilibré entre les phases, des courants statoriques équilibrés et conformes aux attentes indiquent un fonctionnement normal de la machine.
- **Courant rotorique** : Le courant rotorique dans une machine asynchrone à rotor à cage est le courant qui circule dans les barres du rotor à cage. Dans la figure (III- 5), le courant rotorique est généralement faible et négligeable par rapport au courant statorique, Cela est dû au fait que le rotor à cage est principalement alimenté par le champ magnétique rotatif induit par le stator.
- **La vitesse** : La vitesse dans une machine asynchrone à rotor à cage représente la vitesse de rotation de l'arbre de la machine .la vitesse est généralement affichée en fonction du temps. Dans la figure (III- 6) .la vitesse doit être stable et proche de la vitesse de synchronisme de stator. Une vitesse constante et proche de la valeur nominale indique un bon fonctionnement de la machine, avec une rotation régulière et conforme aux attentes.
- **Le couple électromagnétique** : Le couple électromagnétique dans une machine asynchrone à rotor à cage est généré par l'interaction entre le champ magnétique rotatif créé par le stator et le rotor à cage. Dans la figure (III- 7), le couple électromagnétique est généralement très faible mais non nul. Cela est dû aux pertes internes et aux frottements présents dans la machine, qui nécessitent une certaine puissance pour les surmonter. Ce couple de pertes peut être considéré comme le minimum requis pour maintenir le fonctionnement de la machine même sans charge mécanique appliquée

### III.6.2 En charge

- **Courant statorique** : L'introduction d'une charge entraînera une augmentation du courant statorique. Dans la figure (III-8) nous avons remarqué dans le seconde (1) l'augmentation de courant. Cela est dû à la nécessité d'extraire davantage de puissance électrique du réseau pour répondre aux exigences de la charge mécanique.
- **Courant rotorique** : Il également affecté par l'application d'une charge. Dans la figure (III-9) Lorsqu'une charge est présente dans le seconde (1), le couple électromagnétique

requis pour la rotation de la charge doit être transmis au rotor. Cela peut entraîner une augmentation du courant rotorique, car une plus grande quantité de puissance doit être transférée du stator vers le rotor.

- **La vitesse** : Lorsqu'une charge est appliquée, la vitesse de la machine asynchrone peut diminuer par rapport à la vitesse nominale, dans la figure (III-10) à seconde (1) nous avons remarqué La diminution de la vitesse dépendra de la charge appliquée. Des variations de vitesse plus importantes peuvent indiquer un déséquilibre entre la puissance fournie et la charge mécanique
- **Le couple électromagnétique** : Lorsqu'une charge est présente, le couple électromagnétique requis pour maintenir la rotation du rotor doit augmenter. Alors dans la figure (III-11) nous avons remarqué à seconde (1) l'augmentation de couple électromagnétique lorsque la machine asynchrone est soumise à une charge.

## III.7 Les résultats de simulation en présence des défauts

### III.7.1 Défaut statorique

Pour simuler un défaut statorique dans une machine asynchrone, vous pouvez augmenter la valeur de la résistance statorique ( **$R_s=10\text{ Ohm}$** ) et diminuer la valeur de l'inductance cyclique statorique ( **$L_s=0,305\text{ Ohm}$** ) dans les paramètres de la machine. Cela permettra de créer un déséquilibre dans le circuit statorique, simulant ainsi un défaut d'enroulement court-circuité

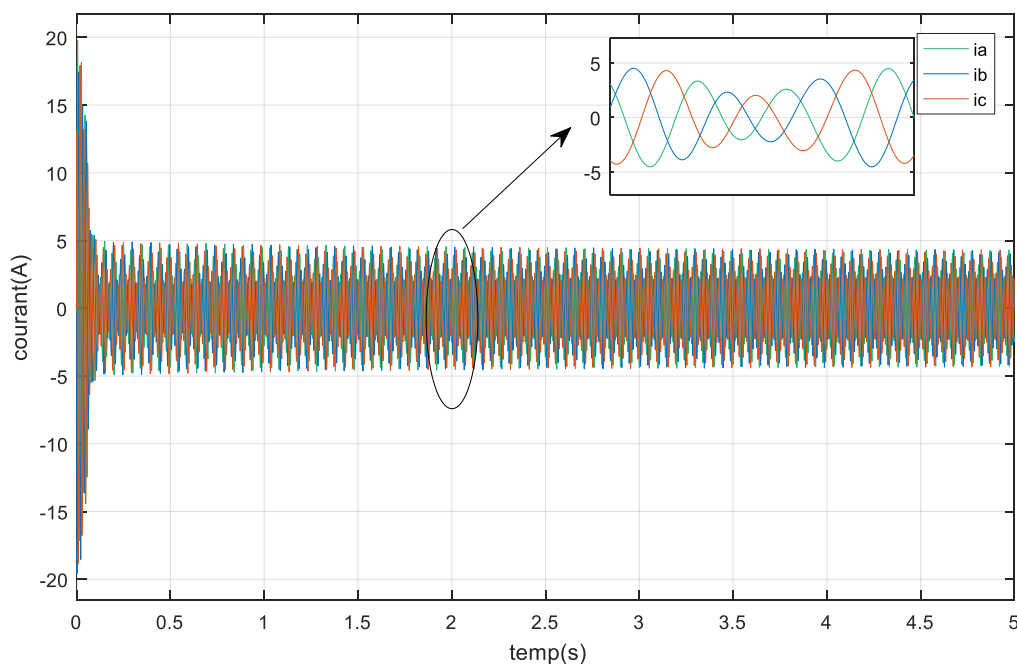


Figure III-12 : Le courant statorique en présence des défauts dans le stator

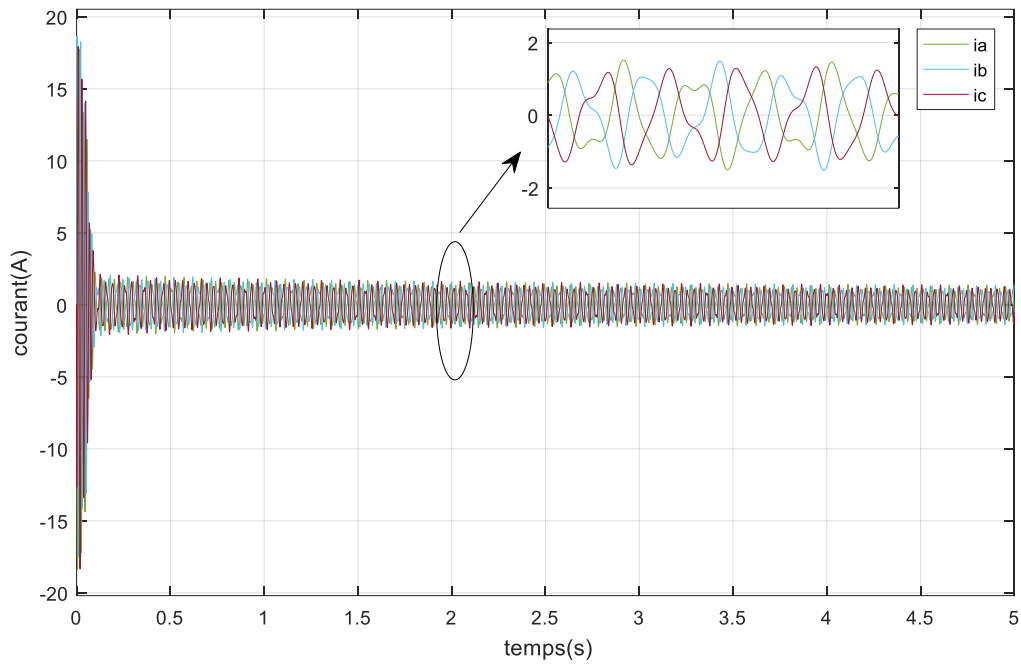


Figure III-13 : Le courant rotorique en présence des défauts dans le stator

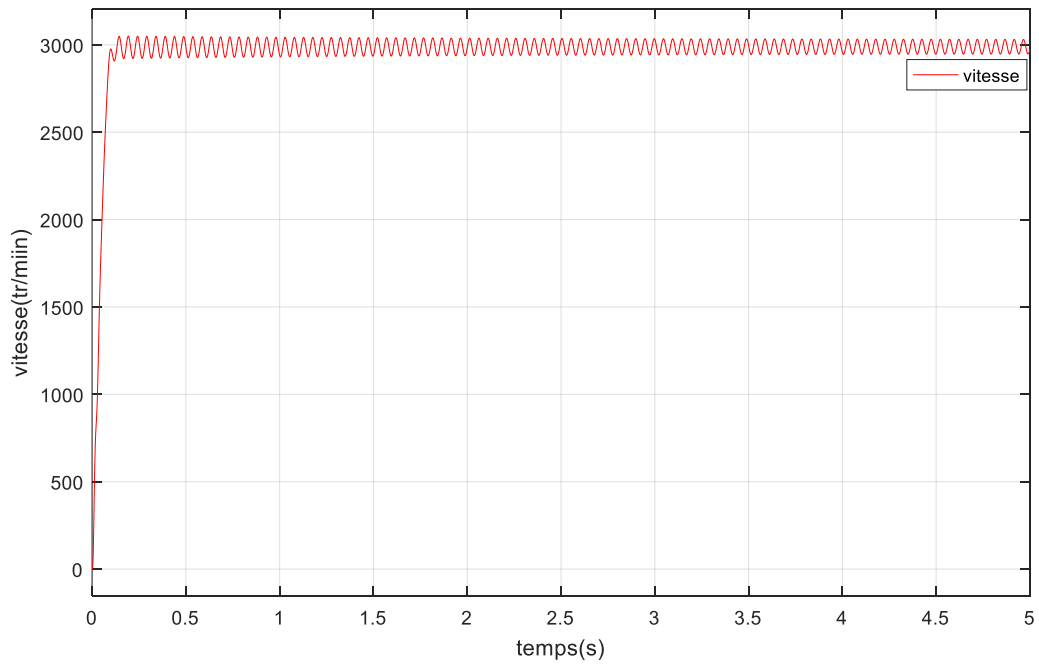


Figure III-14 : La vitesse en présence des défauts dans le stator

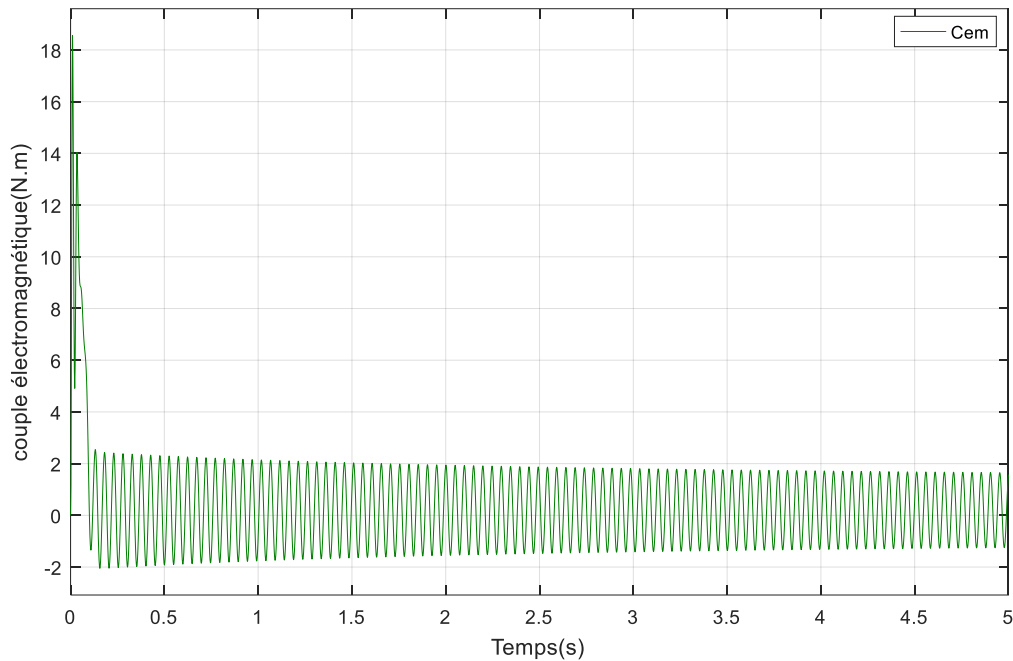


Figure III-15 : Le couple électromagnétique

### III.7.2 Défaut rotorique

Pour simuler un défaut rotorique dans une machine asynchrone nous pouvons diminuer la résistance de rotor ( $R_r=0.4 \text{ Ohm}$ ) dans le paramètre de la machine asynchrone, cela peut entraîner différents types de défauts de rotor, Voici quelques exemples de défauts de rotor qui peuvent survenir en cas de diminution de la résistance de rotor :

- **Défaut de barres cassées** : la diminution de la résistance de rotor peut entraîner une surchauffe des barres de rotor, ce qui peut provoquer leur rupture.
- **Défaut de cage de rotor cassée** : une diminution de la résistance de rotor peut également entraîner une surchauffe de la cage de rotor, ce qui peut provoquer sa rupture.

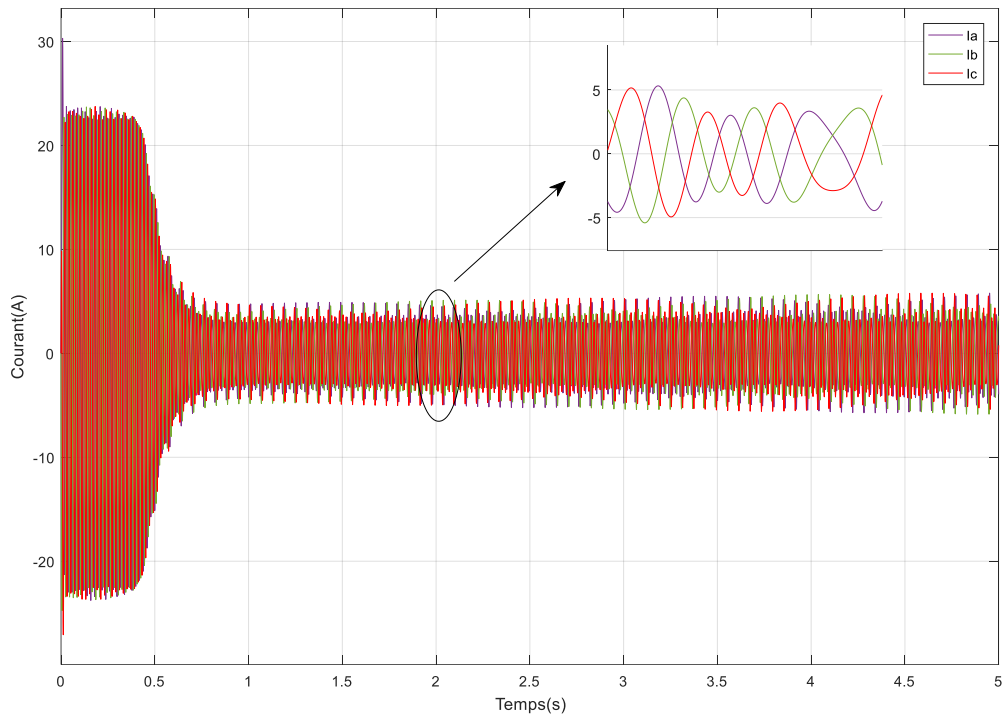


Figure III-16 : Le courant statorique en présence des défauts rotorique

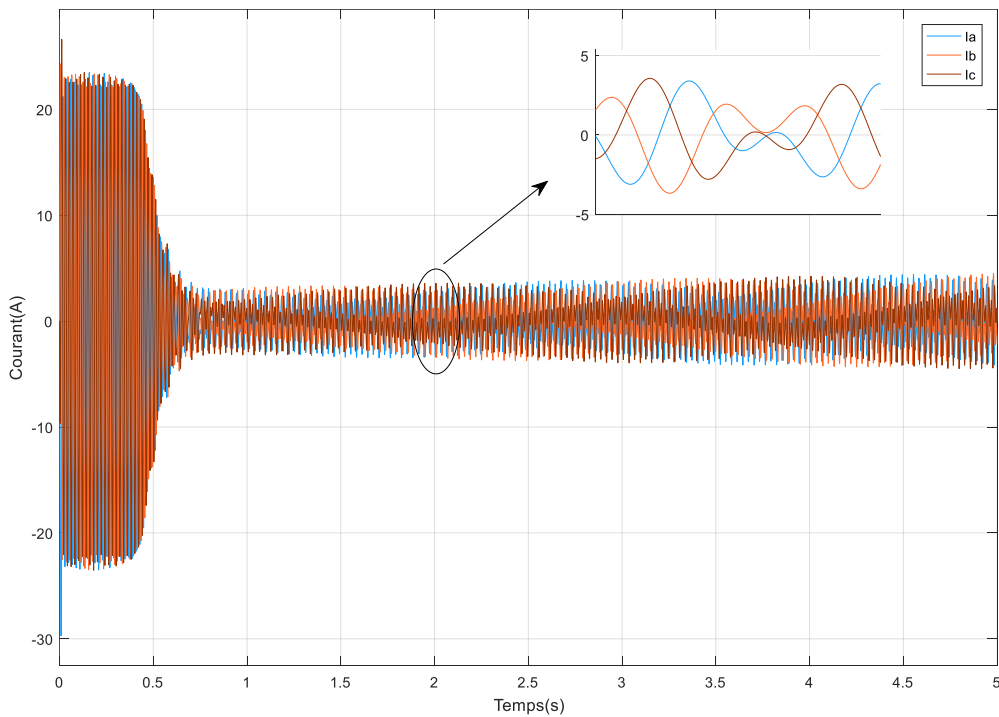


Figure III-17 : Le courant rotorique en présence des défauts rotorique



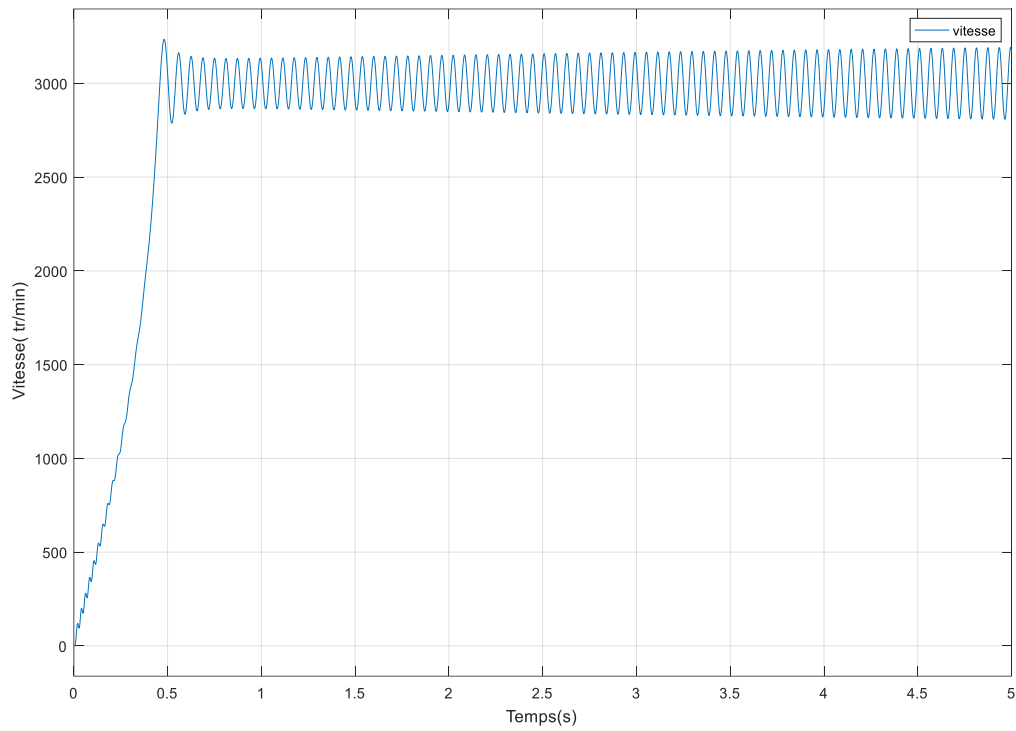


Figure III-18 : La vitesse en présence des défauts rotorique

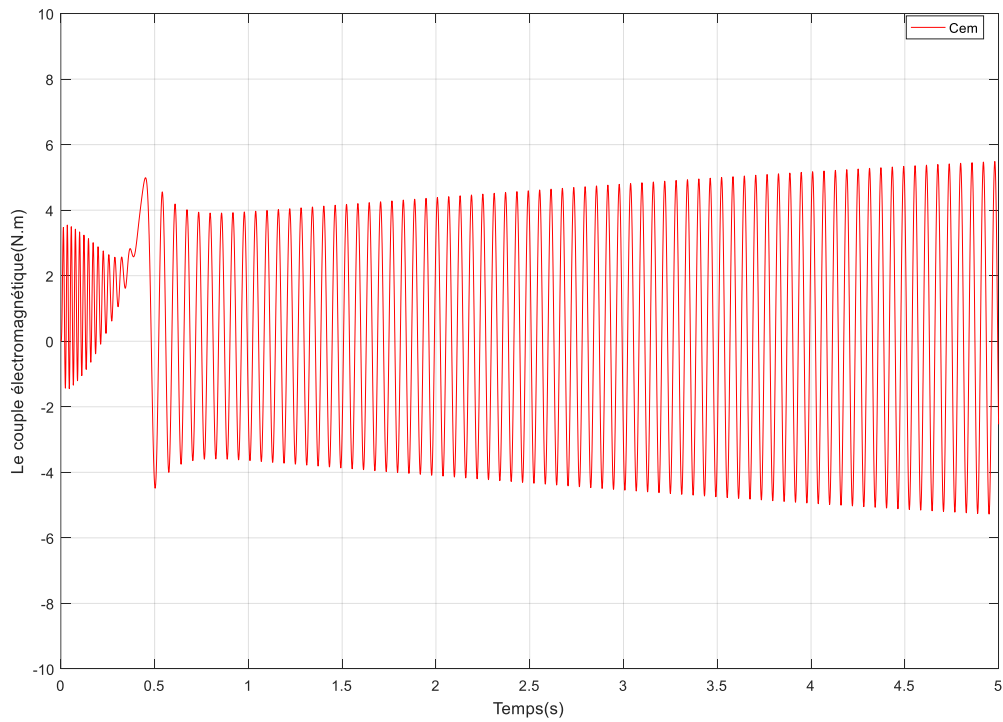


Figure III-19 : Le couple électromagnétique en présence des défauts rotorique

## III.8 L'interprétation en présence des défauts

### III.8.1 Défaut statorique

- **Courant statorique** : dans la figure (III-12) nous avons remarqué une augmentation du courant statorique dans les phases touchées par le défaut, cette augmentation de la résistance statorique en raison de court-circuit dans les enroulements, par conséquent, les courants statoriques ne seront plus équilibrés entre les phases indiquant un fonctionnement anormal de la machine.
- **Courant rotorique** : le courant rotorique dans une machine asynchrone à rotor à cage est principalement induit par le champ magnétique rotatif créé par le stator, dans la figure (III-13) nous avons remarqué que le défaut statorique provoque des déséquilibres dans le champ magnétique, cela peut avoir des effets indirects sur le courant rotorique.
- **La vitesse** : Un défaut statorique peut entraîner des variations indésirables de la vitesse de rotation de l'arbre de la machine. Ces variations peuvent être dues à des perturbations dans l'interaction entre le champ magnétique du stator et le rotor à cage, ce qui peut affecter la stabilité de la rotation. Dans la figure (III-14) nous avons remarqué une vitesse instable et des fluctuations importantes, indiquant un mauvais fonctionnement de la machine.
- **Le couple électromagnétique** : Le défaut statorique peut perturber l'interaction entre le champ magnétique du stator et le rotor à cage, ce qui peut entraîner une réduction du couple électromagnétique, dans la figure (III-15) nous avons des oscillations dans le couple électromagnétique. Les oscillations du couple peuvent être causées par une diminution de l'inductance statorique en raison du court-circuit dans les enroulements, ce qui affecte la réaction magnétique entre le stator et le rotor. Par conséquent, la capacité de la machine à générer du couple sera diminuée.

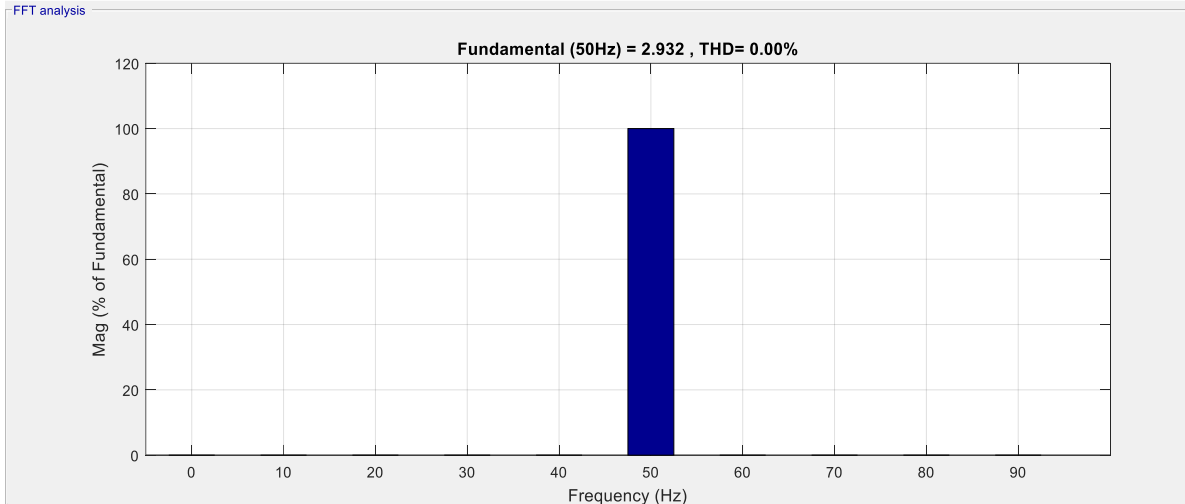
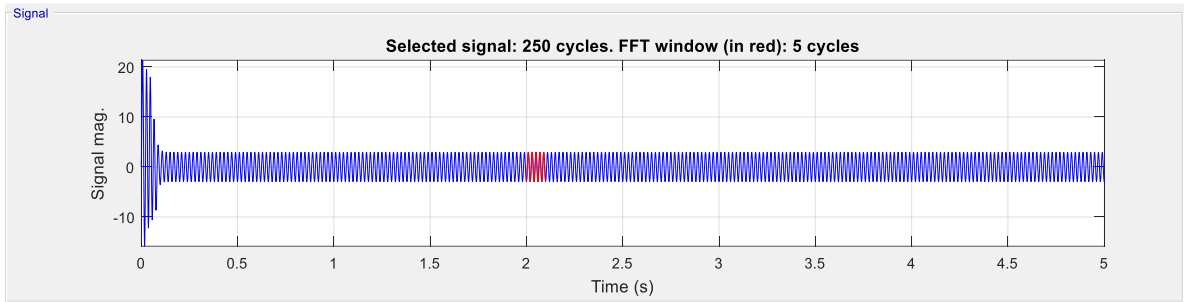
### III.8.2 Défaut rotorique

- **Le courant statorique** : Un défaut rotorique, tel que des barres cassées ou des ruptures de cage, peut entraîner des perturbations dans l'interaction entre le champ magnétique du stator et le rotor à cage. Cela peut provoquer des variations indésirables du courant rotorique, mais ces variations peuvent être moins prononcées par rapport au défaut statorique direct (III-12). Dans la figure (III-16) nous avons remarqué que le courant statorique peut montrer des fluctuations et des déséquilibres dans les 3 phases.

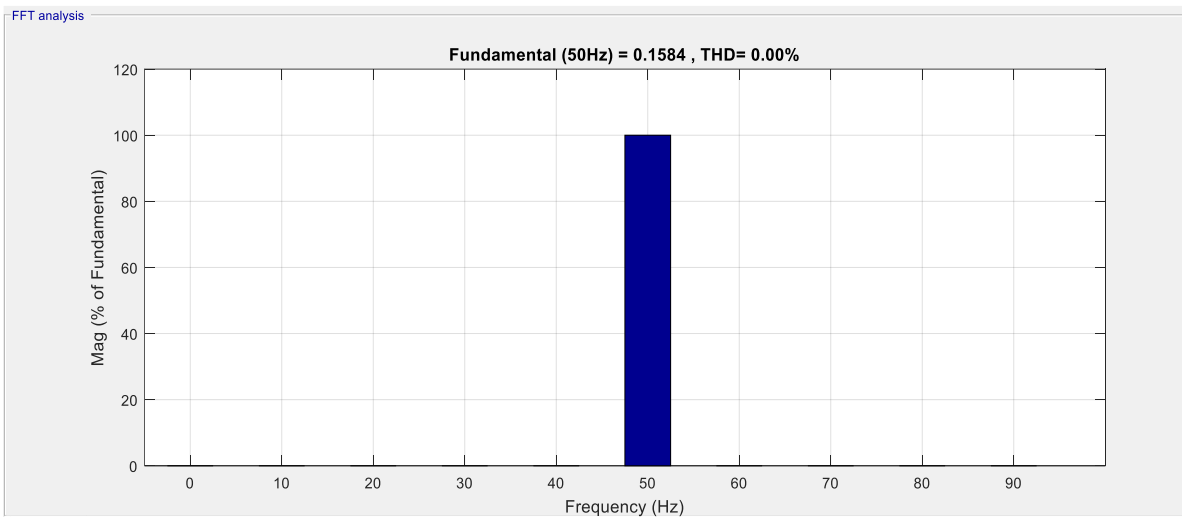
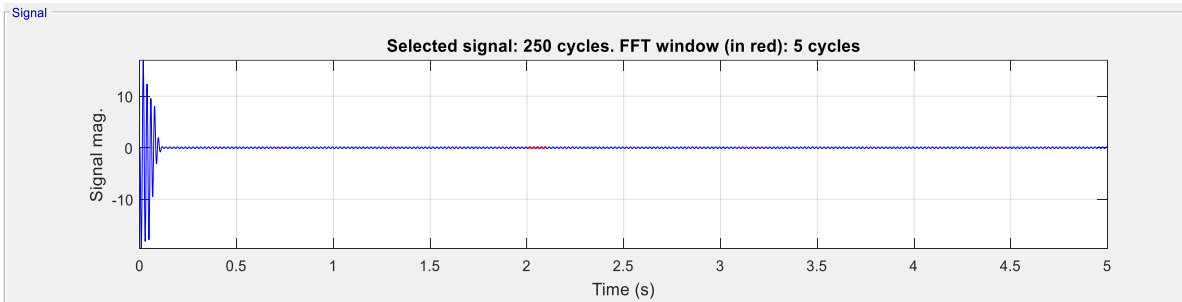
- **Le courant rotorique** : Un défaut rotorique, tel que des barres cassées ou des cages endommagées, perturbe l'interaction entre le champ magnétique du stator et le rotor à cage. Cela se traduit par des variations du courant statorique, bien que moins prononcées qu'avec un défaut statorique direct. Les résultats de la simulation dans la figure **(III-17)** montrent des fluctuations et des déséquilibres dans les courants rotorique des trois phases, indiquant un fonctionnement déséquilibré de la machine en raison du défaut rotorique.
- **La vitesse** : Un défaut rotorique peut entraîner des variations de la vitesse de rotation de l'arbre de la machine. Les barres cassées ou les ruptures de cage créent des déséquilibres dans le champ magnétique du rotor à cage, ce qui peut perturber la stabilité de la rotation. Dans la figure **(III-18)**, nous avons observé des fluctuations et instabilité de vitesse, indiquant un mauvais fonctionnement de la machine.
- **Le couple électromagnétique** : Un défaut rotorique, tel que des barres cassées ou des ruptures de cage, a un impact direct sur la génération de couple électromagnétique. En perturbant le flux magnétique et l'interaction entre le stator et le rotor, la capacité de la machine à produire du couple est réduite. La figure **(III-19)** montre des oscillations plus prononcées du couple électromagnétique par rapport au défaut statorique.

### III.9 L'analyse FFT

Les résultats précédents soulignent les limitations de la représentation et de la détection des défauts uniquement à partir des signaux temporels dans le cadre de la surveillance et du diagnostic des machines électriques. Pour surmonter ces limites, une approche plus approfondie de l'analyse du courant statorique est largement utilisée depuis longtemps pour identifier les défauts. Dans cette étude, la Transformée de Fourier (FFT) a été utilisée pour extraire les signatures fréquentielles de chaque type de défaut [46].

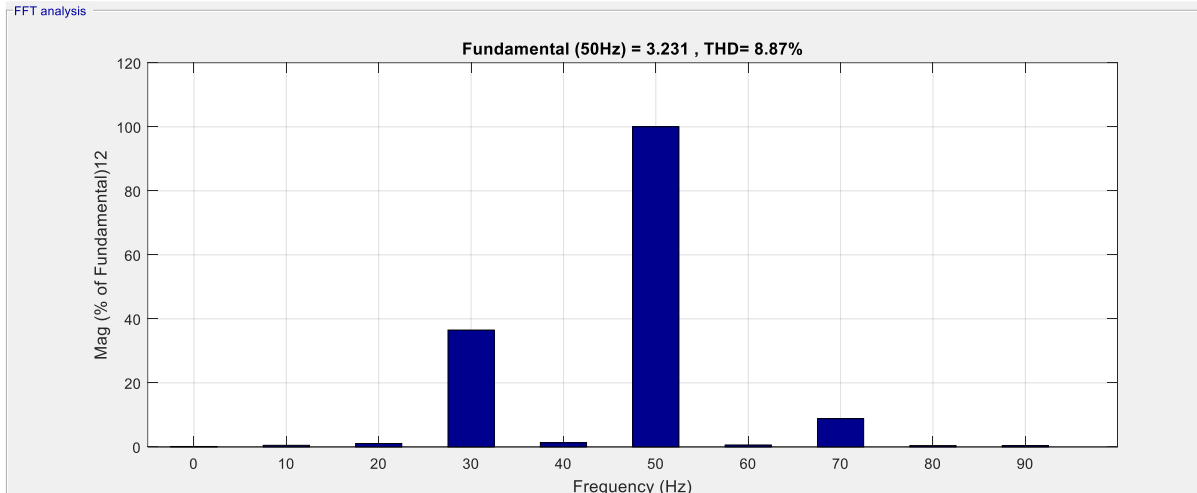
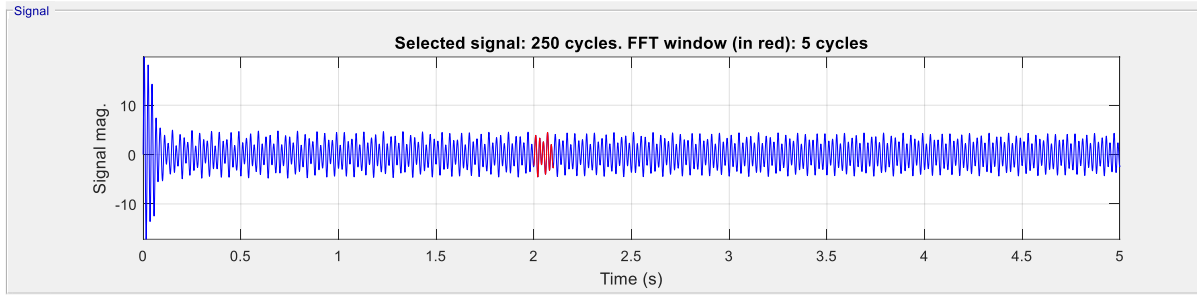


*Courant statorique*

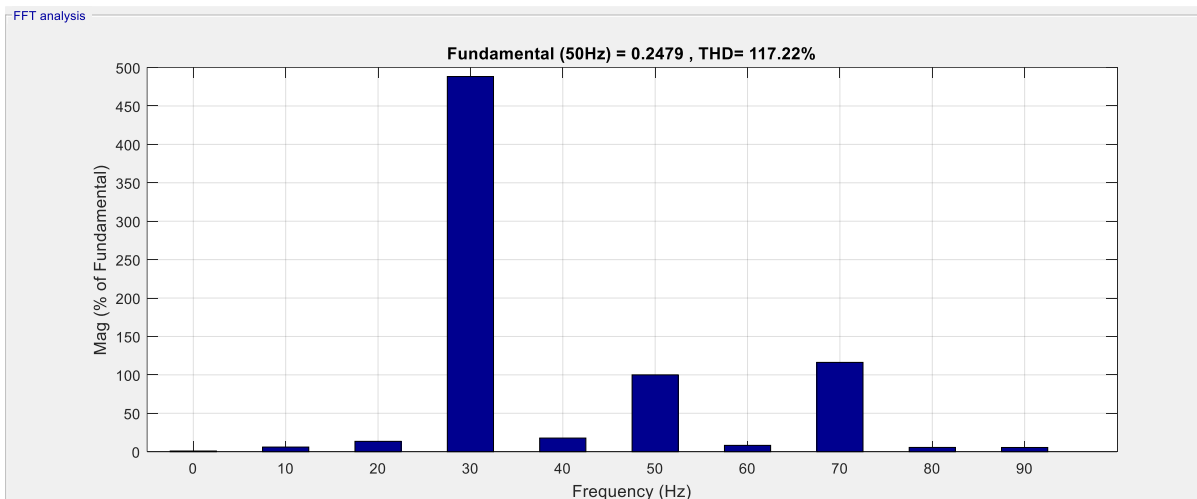
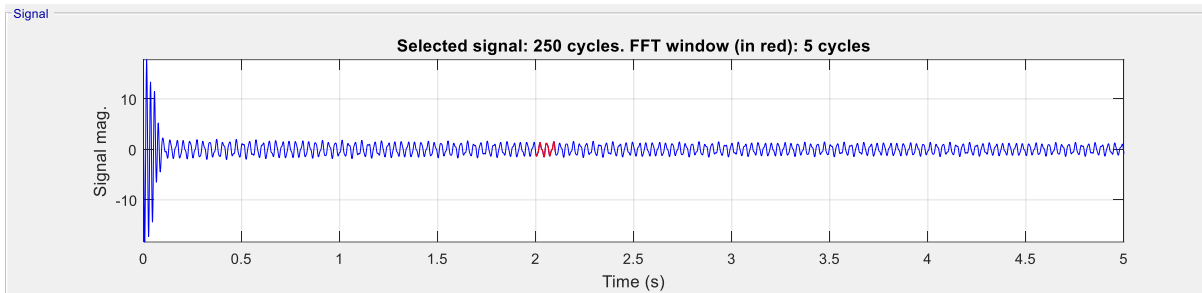


*Courant rotorique*

Figure III-20 : le spectre de courant statorique et rotorique a l'état sain

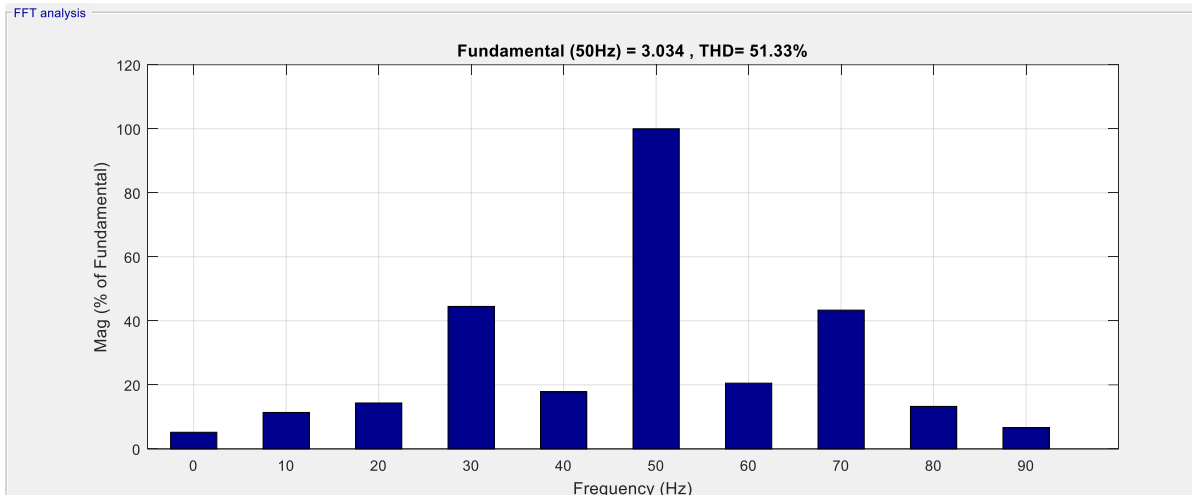
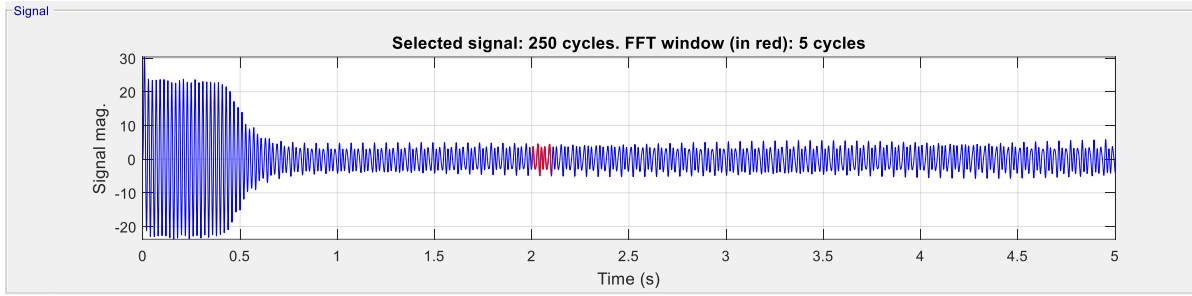


*Courant statorique*

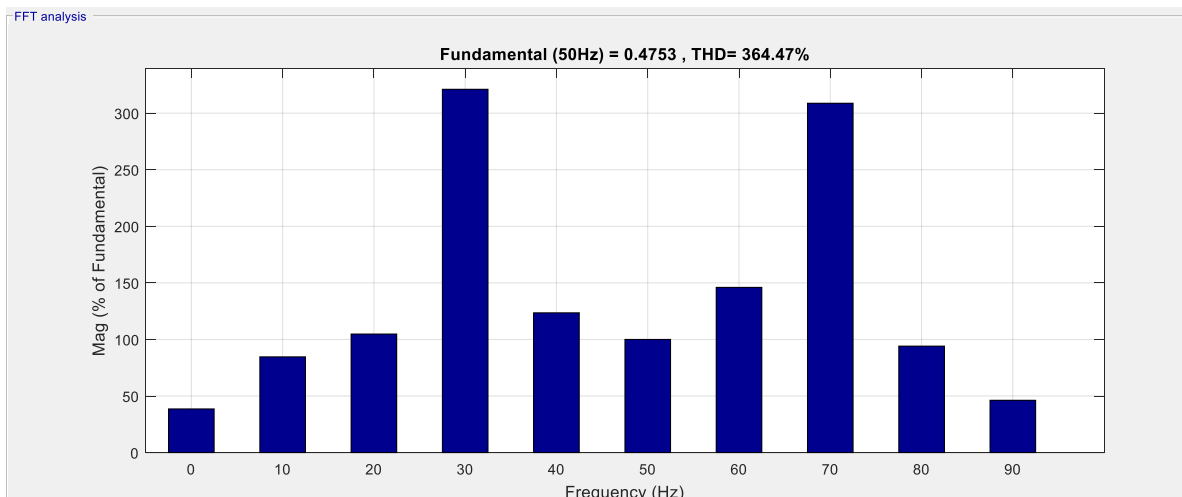
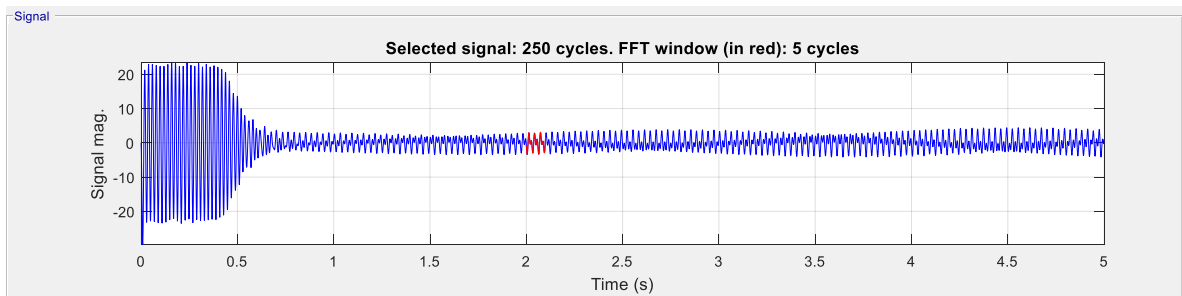


*Courant rotorique*

Figure III-21 : Le spectre de courant statorique et rotorique en défaut statorique



*Courant statorique*



*Courant rotorique*

Figure III-22 : Le spectre de courant statorique et rotorique en défaut rotorique

### **III.9.1 L'interprétation de L'analyse FFT**

Les trois figures (III -20, III-21, III-22), nous permettront de comparer les fréquences observées pour l'état sain et le cas du défaut du rotor et du stator. On constate qu'à l'état sain, il n'y a aucune fréquence autre que la fréquence fondamentale de 50 Hz, tandis que le défaut du stator affiche des fréquences de 30 Hz et 70 Hz, et le défaut du rotor affiche des fréquences plus basses, telles que 10 Hz et 20 Hz, ainsi que des fréquences plus élevées, comme 80 Hz.

Cette observation indique que chaque type de défaut produit des signatures fréquentielles distinctes. En identifiant ces fréquences caractéristiques, il est possible de différencier les différents types de défauts dans les machines asynchrone.

### **III.10 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons a fourni une introduction complète au processus de diagnostic des machines asynchrones, en mettant l'accent sur la modélisation, la simulation à l'aide de la transformation de Park, la création de défauts et l'analyse des résultats à l'aide de la méthode de FFT. Ces étapes sont essentielles pour comprendre le comportement des machines asynchrones et diagnostiquer efficacement d'éventuels problèmes.

# *Conclusion générale*



L'étude actuelle s'est focalisée sur l'analyse et le diagnostic des défauts éventuels présents dans les machines asynchrones à cage d'écureuil. À travers une approche méthodique et une utilisation de techniques de diagnostic sophistiquées, notre objectif était de détecter et de caractériser les différents types de défauts susceptibles d'affecter les éléments constitutifs de ces machines.

Cette étude a démontré l'importance du diagnostic dans la maintenance industrielle des machines asynchrones à cage. Les résultats obtenus ont montré que les techniques de diagnostic avancées, telles que la modélisation des défauts et l'analyse spectrale, peuvent être utilisées avec succès pour détecter et évaluer les défauts. Cela permet une intervention précoce et ciblée, réduisant ainsi les temps d'arrêt et les coûts de maintenance.

Cependant, il convient de noter que cette étude présente certaines limites. Nous nous sommes principalement concentrés sur les défauts courants, mais il existe d'autres types de pannes qui pourraient être étudiés à l'avenir. De plus, l'application pratique des résultats obtenus nécessite une collaboration étroite entre les ingénieurs de maintenance et les spécialistes en diagnostic.

Pour l'avenir, il est essentiel de poursuivre les recherches dans ce domaine en explorant de nouvelles méthodes de diagnostic, en intégrant des techniques avancées telles que l'apprentissage automatique et l'intelligence artificielle, et en développant des outils de surveillance en ligne pour une détection préventive des défauts.

En conclusion, cette étude a apporté des contributions significatives à la compréhension et à l'amélioration du diagnostic des machines asynchrones à cage. Elle a souligné l'importance d'une maintenance préventive pour assurer le bon fonctionnement des installations industrielles. En poursuivant ces efforts, nous pourrions garantir une plus grande fiabilité des machines asynchrones et contribuer à l'efficacité globale du cycle de production.

## Résumé :

Le but de ce travail est d'entamer le diagnostic des défauts dans les machines asynchrone, en particulier les courts-circuits entre les enroulements du stator et les défauts du rotor. L'analyse spectrale par les techniques FFT (Fast Fourier Transform) nous a permis de mieux comprendre l'impact de ce défaut en traçant les spectres des courants statorique et rotorique. Chaque défaut de stator ou de rotor a sa propre fréquence naturelle, de sorte que les résultats obtenus par la simulation sont très précis. L'analyse spectrale peut aider à identifier ces fréquences.

## الملخص

الهدف من هذا العمل هو بدء تشخيص العيوب في المحركات الغير متزامنة، ولا سيما اختصارات بين لفات الجزء الثابت و عيوب في الجزء الدوار. استخدمنا تحليل الطيف باستخدام تقنيات FFT (تحويل فورييه سريع) لفهم تأثير هذه العيوب بشكل أفضل من خلال رسم طيف التيارات في الجزء الثابت والجزء الدوار. كل عيب في الجزء الثابت والجزء الدوار لديه تردد طبيعي خاص به، مما يجعل النتائج التي تم الحصول عليها من المحاكاة دقيقة جدًا. يمكن لتحليل الطيف أن يساعد في تحديد هذه الترددات.

## Abstract

The purpose of this work is to initiate the diagnosis of faults in asynchronous machines, particularly short circuits between the stator windings and rotor faults. Spectral analysis using Fast Fourier Transform (FFT) techniques has allowed us to better understand the impact of these faults by plotting the spectra of stator and rotor currents. Each stator or rotor fault has its own natural frequency, so the results obtained through simulation are highly accurate. Spectral analysis can help identify these frequencies and assist in fault identification and diagnosis.

## Annex

Paramètre de la machine

$V_{sn}=220$  : tension nominale en V

$F_{sn}=50$  : fréquence nominale en Hz

$P_n=1000$  : puissance nominale en Watt

$I_{sn}=2.7$  : courant nominal en Ampère

$N_n=2840$  : vitesse nominale en tr/min

$P=1$  : nombre de pair de pôles

$N_{sn}=F_{sn}*60/p$  : vitesse de synchronisme nominale

$C_n=P_n/(N_n*2*\pi/60)$  : couple nominal

$C_n=3$  : couple nominal

$g_n=(N_{sn}-N_n)/N_{sn}$  : glissement nominal

$R_s = 4.7333$  : résistance statorique en Ohm

$R_r=5.9453$  : résistance rotorique en Ohm

$L_s = 0.3372$  : inductance cyclique statorique en Ohm

$L_r=0.3063$  : inductance cyclique rotorique en Henry

$M_{sr}=0.3020$  : inductance mutuelle cyclique en Henry

$J=0.0026$  : moment d'inertie en Kg/m<sup>2</sup>

$F=6.7104e-4$  : coefficient de frottement Nm/rad/s

$\sigma=1-M_{sr}^2/(L_s*L_r)$  :

$T_s=L_s/R_s$  : constante de temps statorique

$T_r=L_r/R_r$  : constante de temps rotorique

## *Bibliographie*

[1] Maaradji farouk abd eldjilil & Houari nadhir, « *Analyse FMD d'un four a induction* » PFE de Master, Université Ibn Khaldoun de Tiaret, 2021.

[2] D. Tenailleau, « *L'évolution de la maintenance industrielle* », TD maintenance, 29 juillet 2020. <https://td-maintenance.com/2020/07/29/levolution-de-la-maintenance-industrielle/> (consulté le 14 février 2023).

[3] Amalo Recrutement « *Maintenance industrielle : Définition, applications, métiers, formation, etc.* » 9 février 2021. <https://www.amalo-recrutement.fr/blog/maintenance-industrielle-qu-est-ce-que-c-est/> (consulté le 22 janvier 2023).

[4] « *chapitre\_i\_notions\_sur\_la\_maintenance\_industrielle.pdf* ». Consulté le : 23 mars 2023. [http://staff.univbatna2.dz/sites/default/files/mansouri\\_naima/files/chapitre\\_i\\_notions\\_sur\\_la\\_maintenance\\_industrielle.pdf](http://staff.univbatna2.dz/sites/default/files/mansouri_naima/files/chapitre_i_notions_sur_la_maintenance_industrielle.pdf)

[5] « *leilcllic616.pdf* ». Consulté le: 23 mars 2023. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.mcours.net/cours/pdf/leilcllic3/leilcllic616.pdf> ».

[6] Pascal denis , pierre boye andré bianciotto, « *GUIDE DE LA MAINTENANCE INDUSTRIELLE* », Livre , 2008e éd.

[7] jean héng, « *pratique de la maintenance préventive* » polycopié, 2002. [En ligne]. Disponible sur: [www.dunod.com](http://www.dunod.com)

[8] « *Définition - La Maintenance préventive systématique* », 20 avril 2021. <https://maintenancia.com/page/view-post?id=52> (consulté le 24 janvier 2023).

[9] « *L'Institut des Sciences et Techniques Appliquées « ISTA » de l'université des F. M. Constantine* », polycopié 2020.

[10] adzakpa, pelope « *Maintenance des systèmes distribués : méthodes d'aide à la décision temps réel.* ». Thèse de doctorat, Université de Technologie de Troyes, 2004.

- [11] Abderrahmane Souria et Cherchab benabad, « *La mise en place d'un plan de maintenance préventive sur un site de transport d'énergie électrique* » mémoire de master, Université Ibn Khaldoun de Tiaret Faculté des Sciences Appliquée, Tiaret.2021-2022
- [12] L. Sourget, « *Tout savoir sur la maintenance industrielle* », Mobility Work, 25 octobre 2021. <https://mobility-work.com/fr/blog/maintenance-industrielle/> (consulté le 25 janvier 2023).
- [13] Llaurens Jérémy, « *Mise en place d'un plan de maintenance préventive sur un site de production pharmaceutique* » Thèse, université Joseph Fourier, faculté de pharmacie de Grenoble, 16 Février 2011.
- [14] « *Outils de Diagnostic Maintenance industrielle Ermeo* ». <https://www.ermeo.com/blog/outils-diagnostic-maintenance-industrielle/> (consulté le 30 janvier 2023).
- [15] Amalo Recrutement « *Méthode ABC - Qu'est-ce que la méthode ABC ? Logistique* », 28 décembre 2020. <https://www.amalo-recrutement.fr/blog/methode-abc-qu-est-ce-que-c-est/> (consulté le 30 janvier 2023).
- [16] Saad Mohamed « *Stratégie de Maintenance.pdf* », polycopié , département Génie mécanique. université ibn-Khaldoun Tiaret.
- [17] SFI, « *En quoi consiste la méthode des 5M ? Est-elle différente de la méthode HACCP ?* » <https://www.nelinkia.com/blog/normes/methode-5m-methode-haccp.html> (consulté le 6 février 2023).
- [18] beniss mohamed amine, « *Etude AMDEC et mise en place du planning de la maintenance préventive d'une presse d'injection plastique* », Laboratoire d'Electronique, Signaux, Systèmes et d'Informatique (LESSI, Morocco, 2016.
- [19] Saad Mohamed, « *organisation et méthode de maintenance* », polycopié, département Génie mécanique. Université ibn-Khaldoun Tiaret.

- [20] M. Ammer, «*Surveillance et diagnostic des defaults des machines électriques: applications aux moteur asynchrones,*» Thèse de Doctorat en Sciences, Université du 20 Aout 1955, Skikda, 2012.
- [21] Sabour.K, Elazazi.S, «*Commande vectorielle da la machine asynchrone à double alimentation* » mémoire de master, université AKLI Mohaned Oulhadj de Bouira, 2015.
- [22]« *Généralités sur les machines asynchrones – Apprendre en ligne* ». <https://www.clicours.com/generalites-sur-les-machines-asynchrones/> (consulté le 16 février 2023).
- [23] m. a. elhamid, « *Contribution Au Diagnostic De La Machine Asynchrone,*» PFE de Master ,Université Mohamed Khider – Biskra, 25 / 05 /2017
- [24] cherier.f, amade. G, «*Modélisation en vue du diagnostic des défauts dans une machine asynchrone* » mémoire d'Ingénieur d'Etat, Université M'hamed Bougara-Boumerdès, 2009. »
- [25] A. FOURATI « *Modélisation électro-Magnéto-Mécanique d'une machine asynchrone sous approche angulaire Application au diagnostic des défauts de roulements en régime non-stationnaire* » Thèse de doctorat, Lyon, 2017
- [26] A. bernet « *Modélisation et optimisation d'une machine électrique homopolaire en poudre de fer,* »Thèse de doctorat Paris, 2015
- [27] « *Cage d'écureuil et rotor de phase - quelle est la différence* ». <https://i.electricianexp.com/fr/main/school/1237-korotkozamknuty-i-faznyy-rotor-v-chem-razlichie.html> (consulté le 19 février 2023).
- [28] « *Bobines de cuivre, rotor de moteur électrique isolé sur fond blanc* », 123RF. [https://fr.123rf.com/photo\\_90524214\\_bobines-de-cuivre-rotor-de-moteur-électrique-isolé-sur-fond-blanc.html](https://fr.123rf.com/photo_90524214_bobines-de-cuivre-rotor-de-moteur-électrique-isolé-sur-fond-blanc.html) (consulté le 19 février 2023).
- [29]« *MAINTENANCE MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASE BTS MS Option A - C* »  
polycopié.

- [30] BEY Mohamed, « *Polycopié Pédagogique En : Électrotechnique Appliquée. Électromécanique Spécialité : Maintenance Industrielle* », université ibn-khaldoun Tiaret, 2022.
- [31] Belhait Houssem Eddine, « *Détection des défauts de moteur asynchrone par l'analyse de courant statorique* » PFE master, université badji mokhtar - annaba, 2019.
- [32] Allianz, « *Présentation des avaries. Machines électriques tournantes* », cahier des préventions. » CP2, 1988
- [33] Bouguerne Abla, « *diagnostic automatique des défauts des moteurs asynchrones* », Magister de l'Université de Constantine Faculté des Sciences de L'Ingénieur Département d'Electrotechnique, 2009.
- [34] Ali ibrahim, « *Contribution au diagnostic de machines électromécaniques : Exploitation des signaux électriques et de la vitesse instantanée* », école doctorale sciences, ingénierie, santé, Diplôme délivré par l'Université Jean Monnet, 2009.
- [35] B. Vaseghi, « *Contribution à l'étude des machines électriques en présence de défaut entre-spores : Modélisation - Réduction du courant de défaut* », Thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2010.
- [36] Naït-Saïd M.S., Benbouzid M.E.H. et Benchaid A., « *Detection of broken bars induction motors using an extended Kalman filter for rotor resistance sensorless estimation* » *IEEE Transactions on énergie conversion*.
- [37] R. Casimir, « *Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes* » THESE, Année 2003
- [38] Sobczyk T. J., Izvorski A., « *Recognition of rotor eccentricity of induction motor based on the fourier spectra of phase currents* » Proc. ICEM'98 .
- [39] labiod laid et boutadjine fares, « *Diagnostic des défauts rotoriques des machines asynchrones (Résultats expérimentaux et de simulation)* » mémoire master , Université Echahid Hamma Lakhder d'El-Oued, 2019

[40] chelaghema mohamed lamine, « *Pronostic des défauts statoriques et rotoriques des machines asynchrones* » mémoire de master , Université Mohamed Seddik Ben Yahia - Jijel, 2018.

[41]:Mr. touafek Ishak « Extraction d'indicateurs robustes pour le diagnostic des défauts mécaniques : Comparaison de L'EMD et des ondelettes (WT) »Mémoire de magister présenté à l'universite ferhat abbas –setif ufas (algerie).

[42] Boughareb Khaled, « Surveillance et diagnostic des machines tournantes par analyse vibratoire. », UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA, 2019.

[43] ali bezziane « Commande Vectorielle de la Machine Asynchrone a rotor Défaillant », thèse de fin d'étude Université de Batna 2003 .

[44] « Simulation et étude expérimentale des défauts de la machine asynchrone de 1 KW » PFE Master, Université LARBI BEN M'HIDI Oum El-Bouaghi, 2016.

[45] Hicham, « électronique : Modèle de Park de la Machine Asynchrone », électronique, 16 février 2011. <http://electronique1.blogspot.com/2011/02/modele-de-park-de-la-machine-asynchrone.html> (consulté le 31 mai 2023).

[46] benali rania et benali nour el houda, « Conception d'un appareil de diagnostic des moteurs asynchrones à base d'Arduino » ] PFE Master, Université Ibn Khaldoun de Tiaret, 2020