



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies

Electrotechnique

Machine Electrique

Réf. : *Entrez la référence du document*

---

Présenté et soutenu par :

**BENELMIR MOULOUD**

Le : *samedi 24 mai 2025*

**Détection du défaut de cassure de barres rotoriques  
dans un moteur asynchrone triphasé alimenté par un  
variateur de vitesse**

---

**Jury :**

|           |                   |    |                      |           |
|-----------|-------------------|----|----------------------|-----------|
| <b>M.</b> | Adel Ghoggal      | Pr | Université de Biskra | Président |
| <b>M.</b> | YAHIA Khaled      | Pr | Université de Biskra | Encadreur |
| <b>M.</b> | Mouhamed sahraoui | Pr | Université de Biskra | Examineur |

---

**Année universitaire : 2024 – 2025**

## *Remerciements*

Avant tout, je rends grâce à Dieu Tout-Puissant qui m'a donné la force et la patience pour mener à bien ce travail.

Nous tenons à exprimer notre reconnaissance à toutes les personnes qui nous ont soutenus tout au long de la réalisation de ce travail, de près ou de loin.

Mes remerciements chaleureux vont également à mes camarades **Ahmed Ben Aïssa** et **Mehdi Ben Dakha**, pour leur esprit de collaboration et le partage de connaissances qui ont marqué notre parcours.

Enfin, j'adresse ma profonde reconnaissance à ma famille pour leur soutien inconditionnel, ainsi qu'à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mes chers parents, pour leur amour inconditionnel, leur patience et leurs sacrifices tout  
au long de ma vie.*

*Mon frère Brahim bien-aimé, source de courage et d'inspiration.*

*Mes chères soeurs, pour leur tendresse, leur soutien et leur présence réconfortante.*

*Tous les membres de ma famille, pour leur appui moral constant. Mes amis fidèles, pour  
leur encouragement et leur présence à mes côtés pendant les moments difficiles.*

*À toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce  
mémoire.*

**BENELMIR MOULOU**

# Résumé

Ce mémoire de master porte sur la détection et le diagnostic des défauts de rupture de barres dans le rotor des moteurs asynchrones, alimentés par un variateur de vitesse utilisant une commande scalaire ( $V/f$  constant) en boucle ouverte.

La transformée de Fourier rapide (FFT) est une méthode largement employée pour l'analyse des défauts dans les machines asynchrones. Elle offre de bons résultats dans les régimes de fonctionnement à puissance élevée ou à couple constant, mais elle présente des limites lorsque les conditions de charge, de vitesse de rotation ou de tension d'alimentation varient.

**Mots-clés :** Moteur asynchrone, variateur de vitesse, détection de défauts, barres de rotor cassées, analyse de fréquence, harmoniques et Simulation

## ملخص

هذا العمل يهدف إلى الكشف و تشخيص عطل كسر قضبان الدوار في المحركات الغير متزامنة التي يتم تغذيتها بواسطة مغير السرعة يعمل وفق تحكم سلمي ( $v/f$ ) ثابت و في نظام مفتوح الحلقة (اي دون تغذية راجعة).

من أجل التشخيص، تم استخدام تحويل فورييه السريع (FFT) ، وهي تقنية شائعة تسمح بتحليل الترددات داخل إشارات المحرك. هذه الطريقة فعّالة عندما يكون المحرك يعمل بطاقة عالية أو عند ثبات العزم، لكنها تواجه صعوبات عندما تكون سرعة الدوران، العزم ، أو التوتر الكهربائي متغيرة.

الكلمات المفتاحية : المحرك غير المتزامن ، مغير السرعة ، كشف الأعطال ، كسر في قضبان الدوار ، التحليل الترددي ، التوافقيات ، المحاكات .

# *Abstract*

This master's thesis focuses on the detection and diagnosis of broken rotor bar faults in asynchronous motors supplied by a variable speed drive using an open-loop scalar control (constant  $V/f$ ). The Fast Fourier Transform (FFT) is a widely used method for fault analysis in asynchronous machines. It provides good results under high power or constant torque operating conditions, but it shows limitations when load conditions, rotational speed, or supply voltage vary.

# *Table des matières*

|                                                                         |           |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Remerciements</b>                                                    | <b>II</b> |
| <i>Introduction Générale</i>                                            | <b>4</b>  |
| <b>1 Généralités sur la machine asynchrone triphasée</b>                | <b>6</b>  |
| 1.1 Introduction .....                                                  | 8         |
| 1.2 Définitions des termes de base utilisés en .....                    | 8         |
| 1.2.1 Détection .....                                                   | 9         |
| 1.2.2 Diagnostic .....                                                  | 9         |
| 1.3 DEFINITION DE QUELQUES TERMES LIES AU DIAGNOSTIC .....              | 9         |
| 1.3.1 Défaillance .....                                                 | 9         |
| 1.3.2 Défaut .....                                                      | 9         |
| 1.3.3 Disponibilité .....                                               | 10        |
| 1.3.4 Fiabilité .....                                                   | 10        |
| 1.3.5 La Maintenance .....                                              | 10        |
| 1.3.6 Maintenabilité .....                                              | 11        |
| 1.3.7 Sécurité .....                                                    | 12        |
| 1.3.8 Sûreté .....                                                      | 12        |
| 1.4 Constitution de la machine asynchrone .....                         | 12        |
| 1.5 Machine asynchrone à cage .....                                     | 13        |
| 1.5.1 Stator .....                                                      | 14        |
| 1.5.2 Rotor à cage .....                                                | 15        |
| 1.6 Principe de fonctionnement d'une MAS .....                          | 16        |
| 1.7 Étude statistique des défaillances de la machine asynchrone .....   | 17        |
| 1.7.1 Les causes initiales de défaillance (générateurs de pannes) ..... | 17        |
| 1.7.2 Les facteurs aggravants (amplificateurs de défauts) .....         | 18        |
| 1.7.3 Les défauts liés à la fabrication ou aux erreurs humaines .....   | 18        |
| 1.8 Les avantages et inconvénients de la MAS .....                      | 20        |

|          |                                                                       |           |
|----------|-----------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1.9      | Types des défauts et leurs causes .....                               | 20        |
| 1.9.1    | Défaillances mécaniques.....                                          | 20        |
| 1.9.2    | Défaillances électriques.....                                         | 23        |
| 1.10     | Méthodes de diagnostic sans modèle analytique .....                   | 27        |
| 1.10.1   | Méthode par traitement de signal.....                                 | 27        |
| 1.10.2   | Méthode par intelligence artificielle (IA) .....                      | 28        |
| 1.11     | Méthodes de détection des défauts ou Techniques de surveillance ..... | 28        |
| 1.11.1   | Analyse de la signature du courant statorique (MCSA) .....            | 28        |
| 1.11.2   | Analyse du couple électromagnétique.....                              | 28        |
| 1.11.3   | Analyse par mesure de la température .....                            | 29        |
| 1.11.4   | Analyse du flux.....                                                  | 29        |
| 1.11.5   | Analyse des signaux vibratoires.....                                  | 30        |
| 1.12     | Diagnostic par l'analyse de la puissance instantanée .....            | 30        |
| 1.13     | Conclusion.....                                                       | 31        |
| <b>2</b> | <b><i>Les Variateurs de Vitesse</i></b> .....                         | <b>32</b> |
| 2.1      | Introduction .....                                                    | 33        |
| 2.2      | Principe.....                                                         | 33        |
| 2.3      | Fonction des variateurs de vitesse.....                               | 36        |
| 2.3.1    | L'accélération contrôlée .....                                        | 36        |
| 2.3.2    | La décélération contrôlée.....                                        | 36        |
| 2.3.3    | La variation et la régulation de vitesse.....                         | 37        |
| 2.3.4    | L'inversion du sens de marche.....                                    | 39        |
| 2.3.5    | Le freinage d'arrêt.....                                              | 39        |
| 2.4      | Convertisseurs Statique .....                                         | 39        |
| 2.4.1    | Les redresseurs.....                                                  | 39        |
| 2.4.2    | Le circuit intermédiaire.....                                         | 42        |
| 2.4.3    | Les onduleurs .....                                                   | 44        |
| 2.5      | Modulation de largeur d'impulsion MLI (PWM).....                      | 44        |
| 2.6      | Les avantages et Les inconvénients d'un variateur de vitesse .....    | 45        |
| 2.6.1    | Les avantages d'un variateur de vitesse .....                         | 45        |
| 2.6.2    | Les inconvénients d'un variateur de vitesse .....                     | 46        |
| 2.7      | Le circuit de commande .....                                          | 46        |
| 2.7.1    | la commande $U/f = \text{Cst}$ (Scalaire) .....                       | 47        |



|          |                                                                                                                                                   |           |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.7.2    | La commande vectorielle de tension (ou de flux) .....                                                                                             | 48        |
| 2.8      | Les avantages et Les inconvénients des La commande vectorielle de flux.....                                                                       | 49        |
| 2.8.1    | Les avantage .....                                                                                                                                | 49        |
| 2.8.2    | Les inconvénients.....                                                                                                                            | 49        |
| 2.9      | CONCLUSION .....                                                                                                                                  | 49        |
| <b>3</b> | <b><i>Résultats expérimentaux du diagnostic du défaut de cassure de barres rotoriques d'un MAS alimenté par un variateur de vitesse</i></b> ..... | <b>50</b> |
| 3.1      | Introduction .....                                                                                                                                | 51        |
| 3.2      | Définition.....                                                                                                                                   | 51        |
| 3.2.1    | Norme ISO 20958-2015 .....                                                                                                                        | 52        |
| 3.3      | Défauts Détectables par Analyse du Courant Statorique.....                                                                                        | 52        |
| 3.4      | Causes de rupture de barres du rotor d'un moteur asynchrone .....                                                                                 | 53        |
| 3.5      | Mesure pratique du courant statorique (MCSA) .....                                                                                                | 55        |
| 3.6      | Etude de fonctionnement du moteur à l'état sain Signatures des harmo-<br>niques d'encoches rotoriques .....                                       | 56        |
| 3.7      | Spectres du courant statorique avec barres cassées .....                                                                                          | 58        |
| 3.8      | Estimation du nombre de barres cassée par un indicateur de sévérité .....                                                                         | 59        |
| 3.9      | Facteur de correction pour estimer le fonctionnement à charge réduite .....                                                                       | 59        |
| 3.10     | Paramètres influençant les bandes latérales.....                                                                                                  | 60        |
| 3.11     | Calcul des fréquences latérales dues à la cassure de barres du rotor .....                                                                        | 61        |
| 3.12     | Les Résultats obtenus dans l'état sain du MAS.....                                                                                                | 63        |
| 3.12.1   | Pour une fréquence $f_s=20\text{Hz}$ .....                                                                                                        | 63        |
| 3.12.2   | Pour une fréquence $f_s=30\text{Hz}$ .....                                                                                                        | 67        |
| 3.12.3   | Pour une fréquence $f_s=40\text{Hz}$ .....                                                                                                        | 70        |
| 3.12.4   | Pour une fréquence $f_s=50\text{Hz}$ .....                                                                                                        | 74        |
| 3.13     | Les Résultats obtenus dans l'état avec une barre cassée.....                                                                                      | 78        |
| 3.13.1   | Pour une fréquence $f_s=30\text{Hz}$ .....                                                                                                        | 78        |
| 3.13.2   | Pour une fréquence $f_s=50\text{Hz}$ .....                                                                                                        | 80        |
| 3.14     | Comparaison enter l'état sain et l'état avec une barre cassée .....                                                                               | 82        |
| 3.14.1   | Pour une fréquence $f_s=30\text{Hz}$ .....                                                                                                        | 82        |
| 3.14.2   | Pour une fréquence $f_s=50\text{Hz}$ .....                                                                                                        | 84        |
| 3.15     | Les résultats obtenus dans l'état avec deux barres cassées.....                                                                                   | 86        |
| 3.15.1   | Pour une fréquence $f_s=30\text{Hz}$ .....                                                                                                        | 86        |

|                                                                             |           |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.15.2 Pour une fréquence $f_s=20\text{Hz}$ .....                           | 88        |
| 3.16 Comparaison entre l'état sain et l'état avec deux barres cassées ..... | 89        |
| 3.16.1 Pour une fréquence $f_s=40\text{Hz}$ .....                           | 89        |
| 3.16.2 Pour une fréquence $f_s=20\text{Hz}$ .....                           | 91        |
| 3.17 Conclusion.....                                                        | 93        |
| <i>Conclusion Générale</i>                                                  | <b>94</b> |

# *Table des figures*

|      |                                                                                  |    |
|------|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1  | composantes de la surveillance industrielle.....                                 | 8  |
| 1.2  | Machine asynchrone.....                                                          | 13 |
| 1.3  | Éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.....         | 13 |
| 1.4  | Vue schématique en perspective Noyau du stator .....                             | 14 |
| 1.5  | Vue schématique en perspective Rainures du stator .....                          | 14 |
| 1.6  | Vue schématique en perspective du rotor à cage .....                             | 15 |
| 1.7  | Vue schématique en perspective Barres du rotor et anneaux de court-circuit ..... | 15 |
| 1.8  | Proportion des défauts.....                                                      | 19 |
| 1.9  | Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances .....  | 19 |
| 1.10 | Répartition des pannes sur les machines de fortes puissances.....                | 19 |
| 1.11 | Structure d'un roulement à billes .....                                          | 21 |
| 1.12 | Structure Les défauts de roulement à billes.....                                 | 21 |
| 1.13 | Défauts d'excentricité statique et dynamique .....                               | 22 |
| 1.14 | Types d'excentricité , (a) statique , (b) dynamique , (c) mixte.....             | 22 |
| 1.15 | Défaut d'un rotor à cage d'écureuil.....                                         | 24 |
| 1.16 | Exemple d'un défaut de cassure de barre d'un moteur asynchrone [?] .....         | 24 |
| 1.17 | défauts d'isolant dans un enroulement [?] .....                                  | 25 |
| 1.18 | court-circuit entre spires dû aux coupures de tension [?].....                   | 26 |
| 1.19 | court-circuit phase-phase [?].....                                               | 27 |
| 1.20 | capteur de température dans une plaque à bornes.....                             | 29 |
| 1.21 | techniques par visualisation des images thermiques .....                         | 29 |
| 1.22 | mesures vibratoires sur machine asynchrone.....                                  | 30 |
| 2.1  | principe de variateur de vitesse .....                                           | 34 |
| 2.2  | topologie des variateurs de vitesse standards .....                              | 34 |
| 2.3  | variateurs de vitesse SIEMNS SINAMICS V20 .....                                  | 35 |
| 2.4  | Moteur asynchrone triphasé connecté à un variateur de vitesse .....              | 35 |

|      |                                                                                                                                               |    |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.5  | Fonction des variateurs de vitesse.....                                                                                                       | 36 |
| 2.6  | Boucle ouverte .....                                                                                                                          | 38 |
| 2.7  | Boucle fermée.....                                                                                                                            | 38 |
| 2.8  | symboles des redresseurs .....                                                                                                                | 40 |
| 2.9  | redresseurs commandés.....                                                                                                                    | 40 |
| 2.10 | fonctionnement de la diode .....                                                                                                              | 41 |
| 2.11 | redresseurs non-commandés .....                                                                                                               | 41 |
| 2.12 | tension à ondulation résiduelle .....                                                                                                         | 41 |
| 2.13 | Circuit intermédiaire à courant continu variable .....                                                                                        | 42 |
| 2.14 | Circuit intermédiaire à tension continu constante ou variable .....                                                                           | 43 |
| 2.15 | Circuit intermédiaire à tension variable.....                                                                                                 | 43 |
| 2.16 | symboles des onduleurs .....                                                                                                                  | 44 |
| 2.17 | Principe PWM à commande par sinusoïde .....                                                                                                   | 45 |
| 2.18 | Le schéma équivalent du moteur asynchrone .....                                                                                               | 48 |
| 2.19 | Fonctionnement à couple constant.....                                                                                                         | 48 |
| 3.1  | Rotors du moteur asynchrone à l'état sain.....                                                                                                | 53 |
| 3.2  | Fissures dans un anneau de court-circuit du rotor .....                                                                                       | 53 |
| 3.3  | Fissure dans un joint entre la barre et l'anneau de court-circuit .....                                                                       | 54 |
| 3.4  | short-Circuit Ring.....                                                                                                                       | 54 |
| 3.5  | complete broken bar-lifted out of slot, bar not tight enough in the slot .....                                                                | 54 |
| 3.6  | Surveillance du Courant Statorique par Analyse MCSA .....                                                                                     | 55 |
| 3.7  | Current sensors.....                                                                                                                          | 55 |
| 3.8  | Surveillance du courant statorique par la méthode MCSA à l'aide d'un<br>ampèremètre à pince sur le secondaire du TC.....                      | 56 |
| 3.9  | Représentation théorique de Spectres du courant statorique .....                                                                              | 58 |
| 3.10 | Spectres du courant statorique de l'état sain et l'état avec barres cassées .                                                                 | 58 |
| 3.11 | Spectres du courant statorique ia du moteur sain sous alimenté par le<br>Convertisseur avec une fréquence de 20 Hz, à vide .....              | 63 |
| 3.12 | Spectres du courant statorique ia du moteur sain sous alimenté par le<br>Convertisseur avec une fréquence de 20HZ, la charge Cr=1.6Nm.....    | 64 |
| 3.13 | Spectres du courant statorique ia du moteur sain sous alimenté par le<br>Convertisseur avec une fréquence de 20 Hz, la charge Cr=6.6 Nm ..... | 65 |

|                                                                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.14 Spectres du courant statorique $i_a$ du moteur sain sous alimenté par le Convertisseur avec une fréquence de 20 Hz, la charge à vide , $C_r=1.6$ N.m , $C_r= 6.6$ N.m ..... | 66 |
| 3.15 Spectres du courant statorique $i_a$ du moteur sain sous alimenté par le Convertisseur avec une fréquence de 30 Hz, à vide .....                                            | 67 |
| 3.16 Spectres du courant statorique $i_a$ du moteur sain sous alimenté par le Convertisseur avec une fréquence de 30Hz, la charge $C_r=3.6$ Nm .....                             | 68 |
| 3.17 Spectres du courant statorique $i_a$ du moteur sain sous alimenté par le Convertisseur avec une fréquence de 30Hz, la charge $C_r=6.6$ Nm .....                             | 69 |
| 3.18 Spectres du courant statorique $i_a$ du moteur sain sous alimenté par le Convertisseur avec une fréquence de 30 Hz, la charge à vide , $C_r=1.6$ N.m , $C_r= 6.6$ N.m ..... | 70 |
| 3.19 Spectres du courant statorique $i_a$ du moteur sain sous alimenté par le Convertisseur avec une fréquence de 40 Hz.....                                                     | 70 |
| 3.20 Spectres du courant statorique $i_a$ du moteur sain sous alimenté par le Convertisseur avec une fréquence de 40 Hz, la charge $C_r=1.6$ Nm .....                            | 71 |
| 3.21 Spectres du courant statorique $i_a$ du moteur sain sous alimenté par le Convertisseur avec une fréquence de 40 Hz, la charge $C_r=3.6$ Nm .....                            | 72 |
| 3.22 Spectres du courant statorique $i_a$ du moteur sain sous alimenté par le Convertisseur avec une fréquence de 40 Hz, la charge à vide , $C_r=1.6$ N.m , $C_r= 3.6$ N.m ..... | 73 |
| 3.23 Spectres du courant statorique $i_a$ du moteur sain sous alimenté par le Convertisseur avec une fréquence de 50Hz.....                                                      | 74 |
| 3.24 Spectres du courant statorique $i_a$ du moteur sain sous alimenté par le Convertisseur avec une fréquence de 50 Hz, la charge $C_r=3.6$ Nm .....                            | 75 |
| 3.25 Spectres du courant statorique $i_a$ du moteur sain sous alimenté par le Convertisseur avec une fréquence de 50 Hz, la charge $C_r=6.6$ Nm .....                            | 76 |
| 3.26 Spectres du courant statorique $i_a$ du moteur sain sous alimenté par le Convertisseur avec une fréquence de 50 Hz, la charge à vide , $C_r=3.6$ N.m , $C_r= 6.6$ N.m ..... | 77 |

|                                                                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.27 Spectres du courants statorique ia du moteur avec une barre cassée alimenté par le convertisseur avec une fréquence de 30 Hz, la charge $C_r=3.6$ et $g=4.8\%$ .....    | 78 |
| 3.28 Spectres du courants statorique ia du moteur avec une barre cassée alimenté par le convertisseur avec une fréquence de 30 Hz, la charge $C_r=6.6$ et $g=9.3\%$ .....    | 79 |
| 3.29 Spectres du courants statorique ia du moteur avec une barre cassée alimenté par le convertisseur avec une fréquence de 50 Hz, la charge $C_r=3.6$ et $g=3.4\%$ .....    | 80 |
| 3.30 Spectres du courants statorique ia du moteur avec une barre cassée alimenté par le convertisseur avec une fréquence de 50 Hz, la charge $C_r=6.6$ et $g=6.2\%$          | 81 |
| 3.31 Spectres du courants statorique ia du moteur avec une barre cassée alimenté par le convertisseur avec une fréquence de 30 Hz, la charge $C_r=3.6$ N.m .....             | 82 |
| 3.32 Spectres du courants statorique ia du moteur avec une barre cassée alimenté par le convertisseur avec une fréquence de 30 Hz, la charge $C_r=6.6$ et $g=9.3\%$ .....    | 83 |
| 3.33 Spectres du courants statorique ia du moteur avec une barre cassée alimenté par le convertisseur avec une fréquence de 50 Hz, la charge $C_r=3.6$ et $g=3.4\%$ .....    | 84 |
| 3.34 Spectres du courants statorique ia du moteur avec une barre cassée alimenté par le convertisseur avec une fréquence de 50 Hz, la charge $C_r=6.6$ et $g=6.2\%$          | 85 |
| 3.35 Spectres du courants statorique ia du moteur avec deux barres cassées alimenté par le convertisseur avec une fréquence de 30 Hz, la charge $C_r=1.6$ N.m .....          | 86 |
| 3.36 Spectres du courants statorique ia du moteur avec deux barres cassées alimenté par le convertisseur avec une fréquence de 30 Hz, la charge $C_r=6.6$ N.m .....          | 87 |
| 3.37 Spectres du courants statorique ia du moteur avec deux barres cassées alimenté par le convertisseur avec une fréquence de 20 Hz, la charge $C_r=1.6$ et $g=3.2\%$ ..... | 88 |

|                                                                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.38 Spectres du courants statorique $i_a$ du moteur avec deux barres cassées alimenté par le convertisseur avec une fréquence de 20 Hz, la charge $C_r=6.6$ et $g=7.2\%$ ..... | 88 |
| 3.39 Spectres du courants statorique $i_a$ du moteur avec deux barres cassées alimenté par le convertisseur avec une fréquence de 40 Hz, la charge $C_r=1.6$ et $g=1.6\%$ ..... | 89 |
| 3.40 Spectres du courants statorique $i_a$ du moteur avec deux barres cassées alimenté par le convertisseur avec une fréquence de 40 Hz, la charge $C_r=6.6$ et $g=5.8\%$ ..... | 90 |
| 3.41 Spectres du courants statorique $i_a$ du moteur avec deux barres cassées alimenté par le convertisseur avec une fréquence de 20 Hz, la charge $C_r=1.6$ et $g=3.2\%$ ..... | 91 |
| 3.42 Spectres du courants statorique $i_a$ du moteur avec deux barres cassées alimenté par le convertisseur avec une fréquence de 20 Hz, la charge $C_r=6.6N.m$ .....           | 92 |

## *Liste des tableaux*

|     |                                                                              |    |
|-----|------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1 | Définitions des paramètres du glissement dans un moteur asynchrone . . .     | 17 |
| 1.2 | Les avantages et les inconvénients du moteur asynchrone.....                 | 20 |
| 3.1 | Évaluation de l'état du rotor en fonction de la différence d'amplitude N(dB) | 59 |
| 3.2 | Les fréquences latérales dues à une cassure de barres rotorique pour 50 Hz   | 61 |
| 3.3 | Paramètres du moteur utilisé .....                                           | 61 |
| 3.4 | Les fréquences latérales pour $f_s = 40$ Hz.....                             | 62 |
| 3.5 | Les fréquences latérales pour $f_s = 30$ Hz.....                             | 62 |
| 3.6 | Les fréquences latérales pour $f_s = 20$ Hz.....                             | 63 |



# *Nomenclature*

## **Acronymes**

---

|      |                                             |
|------|---------------------------------------------|
| Ns   | vitesse de synchronisme                     |
| N    | vitesse rotorique                           |
| e    | force électromotrice                        |
| g    | glissement                                  |
| IA   | intelligence artificielle                   |
| FFT  | Fréquentielle Transformée de Fourier Rapide |
| MLI  | modulation de largeur d'impulsion           |
| IGBT | transistors bipolaires à grille isolée      |
| Vs   | tension statorique                          |
| Lm   | l'inductance magnétisante                   |
| Ls   | l'inductance statorique                     |
| W    | vitesse électrique                          |
| F    | Fréquence d'alimentation                    |
| Ia   | courant statorique                          |
| Cr   | couple de charge                            |

# *Introduction Générale*

Caractérisée par sa robustesse et sa simplicité de construction, la machine asynchrone est largement utilisée dans le domaine industriel pour la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique. Toutefois, son utilisation dans les systèmes à vitesse variable a longtemps été limitée, au profit des machines à courant continu, en raison de la complexité de sa commande.

L'évolution des technologies, notamment l'électronique de puissance, la microélectronique et l'informatique embarquée, a permis de lever ces limitations. Désormais, la machine asynchrone est devenue une solution concurrentielle dans les applications à vitesse variable grâce à des algorithmes de commande performants.

Avec l'avènement des semi-conducteurs, la variation électronique de la vitesse des moteurs électriques a supplanté les anciennes technologies comme les groupes Ward-Leonard. La surveillance de l'état des systèmes et la détection précoce des défauts sont essentielles pour garantir leur fiabilité et leur disponibilité. La majorité des défauts évoluant lentement, leur détection précoce permet souvent d'éviter des défaillances majeures.

Il est important de distinguer entre la détection d'un défaut (identifier sa présence) et son diagnostic (identifier sa nature et sa localisation).

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les généralités sur la machine asynchrone, ses composants, ses avantages et inconvénients. Ensuite, nous avons étudié les différents types de défauts, leurs causes et enfin les méthodes de détection associées.

Dans le deuxième chapitre, nous avons commencé par présenter des notions générales sur le variateur de vitesse. Ensuite, nous avons étudié ses principaux composants, notamment le convertisseur statique, ainsi que la technique de modulation de largeur d'impulsions (MLI). Enfin, nous avons abordé les différentes méthodes de commande des variateurs de vitesse.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté les résultats expérimentaux relatifs au diagnostic des défauts de cassure de barres rotoriques (une barre cassée et deux barres cassées) dans les moteurs asynchrones triphasés alimentés par un variateur de vitesse.

fonctionnant sous la loi  $V/f$  constante. L'analyse spectrale a été réalisée à l'aide de la Transformée de Fourier Rapide (TFR) sur le courant statorique et le couple électromagnétique pour différentes vitesses de rotation.

# *Généralités sur la machine asynchrone triphasée*

---

|       |                                                                   |    |
|-------|-------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1   | Introduction .....                                                | 8  |
| 1.2   | Définitions des termes de base utilisés en .....                  | 8  |
| 1.2.1 | Détection .....                                                   | 9  |
| 1.2.2 | Diagnostic .....                                                  | 9  |
| 1.3   | DEFINITION DE QUELQUES TERMES LIES AU DIAGNOSTIC .....            | 9  |
| 1.3.1 | Défaillance .....                                                 | 9  |
| 1.3.2 | Défaut .....                                                      | 9  |
| 1.3.3 | Disponibilité .....                                               | 10 |
| 1.3.4 | Fiabilité .....                                                   | 10 |
| 1.3.5 | La Maintenance .....                                              | 10 |
| 1.3.6 | Maintenabilité .....                                              | 11 |
| 1.3.7 | Sécurité .....                                                    | 12 |
| 1.3.8 | Sûreté .....                                                      | 12 |
| 1.4   | Constitution de la machine asynchrone .....                       | 12 |
| 1.5   | Machine asynchrone à cage .....                                   | 13 |
| 1.5.1 | Stator .....                                                      | 14 |
| 1.5.2 | Rotor à cage .....                                                | 15 |
| 1.6   | Principe de fonctionnement d'une MAS .....                        | 16 |
| 1.7   | Étude statistique des défaillances de la machine asynchrone ..... | 17 |
| 1.7.1 | Les causes initiales de défaillance (générateurs de pannes) ..... | 17 |
| 1.7.2 | Les facteurs aggravants (amplificateurs de défauts) .....         | 18 |
| 1.7.3 | Les défauts liés à la fabrication ou aux erreurs humaines .....   | 18 |

|        |                                                                       |    |
|--------|-----------------------------------------------------------------------|----|
| 1.8    | Les avantages et inconvénients de la MAS.....                         | 20 |
| 1.9    | Types des défauts et leurs causes .....                               | 20 |
| 1.9.1  | Défaillances mécaniques.....                                          | 20 |
| 1.9.2  | Défaillances électriques.....                                         | 23 |
| 1.10   | Méthodes de diagnostic sans modèle analytique.....                    | 27 |
| 1.10.1 | Méthode par traitement de signal.....                                 | 27 |
| 1.10.2 | Méthode par intelligence artificielle (IA) .....                      | 28 |
| 1.11   | Méthodes de détection des défauts ou Techniques de surveillance ..... | 28 |
| 1.11.1 | Analyse de la signature du courant statorique (MCSA) .....            | 28 |
| 1.11.2 | Analyse du couple électromagnétique.....                              | 28 |
| 1.11.3 | Analyse par mesure de la température .....                            | 29 |
| 1.11.4 | Analyse du flux.....                                                  | 29 |
| 1.11.5 | Analyse des signaux vibratoires.....                                  | 30 |
| 1.12   | Diagnostic par l'analyse de la puissance instantanée .....            | 30 |
| 1.13   | Conclusion.....                                                       | 31 |

---

## 1.1 Introduction

Les moteurs asynchrones triphasés sont largement utilisés dans les applications à vitesse variable. Ils peuvent être commandés soit par une méthode scalaire ( $U/f = \text{constant}$ ), soit par une commande vectorielle. Ces machines sont réputées pour leur robustesse et leur adaptation aux applications de forte puissance. Cependant, malgré ces qualités, elles peuvent présenter des défaillances dues à un vieillissement prématuré.

Dans ce chapitre, nous commencerons par présenter quelques notions de base sur la maintenance et le diagnostic. Ensuite, nous décrirons brièvement les différents constituants de la machine asynchrone à cage, en évoquant les divers défauts pouvant les affecter. Enfin, nous exposerons les méthodes de diagnostic les plus couramment utilisées [21].

## 1.2 Définitions des termes de base utilisés en diagnostic

### • Surveillance

La surveillance est un mécanisme d'observation et d'analyse qui permet d'évaluer l'état d'un système en fournissant des indicateurs pertinents. Elle consiste principalement à détecter et classifier les pannes en suivant l'évolution du système, puis à les diagnostiquer en identifiant les éléments défectueux et en déterminant leurs causes principales.

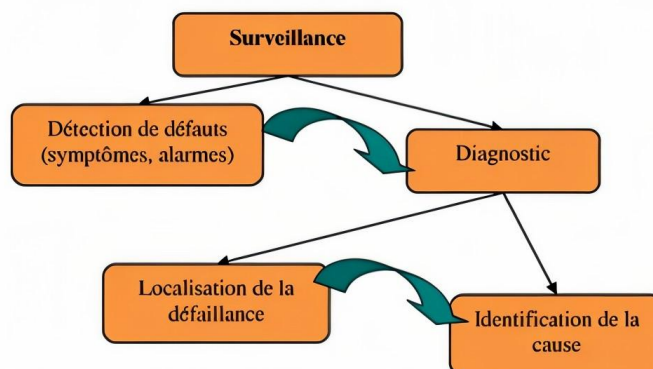


Fig 1.1: composantes de la surveillance industrielle

La surveillance se compose donc de deux fonctions principales qui sont la détection et le diagnostic :

### **1.2.1 Détection**

Pour détecter les défaillances du système, il faut être capable de classer les situations observables comme étant normales ou anormales. Cette classification n'est pas triviale, étant donnée le manque d'information qui caractérise généralement les situations anormales. Une simplification communément adoptée consiste à considérer comme anormale toute situation qui n'est pas normale [11].

### **1.2.2 Diagnostic**

La fonction de diagnostic a pour objectif de rechercher les causes d'une panne et d'identifier les composants responsables de son apparition. Elle se divise en deux éléments essentiels : la localisation et l'identification des causes. La localisation permet de déterminer le composant ou le sous-système défaillant. L'identification des causes consiste à comprendre l'origine de la panne, c'est-à-dire ce qui l'a provoquée [11].

## **1.3 DEFINITION DE QUELQUES TERMES LIES AU DIAGNOSTIC**

### **1.3.1 Défaillance**

Une défaillance est un événement qui provoque une modification du fonctionnement d'un système. Lorsque cela se produit, le système ne fonctionne plus normalement et ne peut plus assurer pleinement sa fonction [16].

### **1.3.2 Défaut**

Est une déviation non permise d'au moins une propriété ou un paramètre caractéristique du système par rapport à un comportement usuel, nominal ou acceptable.

Ensemble d'actions visant à évaluer l'état d'un procédé à partir de la connaissance de son fonctionnement. A partir de l'observation du procédé, on détermine par comparaison

avec les divers états de fonctionnement connus (ou un raisonnement logique) le degré de défaillance du système, l'origine de ses défaillances et leurs causes [16].

### **1.3.3 Disponibilité**

La disponibilité désigne la capacité d'un équipement ou d'un système à fonctionner chaque fois qu'il est requis. Cela garantit une fiabilité totale durant son utilisation. Pour assurer cette disponibilité, il est nécessaire d'effectuer une maintenance préventive afin d'anticiper toute usure ou défaillance [18].

### **1.3.4 Fiabilité**

La fiabilité est la capacité d'un système à fonctionner pendant une certaine durée sans panne. Elle est caractérisée par le temps moyen de bon fonctionnement [18].

### **1.3.5 La Maintenance**

La mission principale d'un ingénieur est d'assurer la disponibilité des systèmes industriels, c'est-à-dire garantir que le système fonctionne lorsqu'il est sollicité. Cette responsabilité repose essentiellement sur la maintenance. Selon l'Association Française de Normalisation (AFNOR), la maintenance est définie comme : « l'ensemble des activités destinées à maintenir ou à rétablir un bien dans un état permettant d'accomplir une fonction requise. » Il existe deux grandes catégories de maintenance : Maintenance corrective et Maintenance préventive (systématique, conditionnelle) [18].

- **Maintenance corrective**

C'est un ensemble d'activités réalisées après la défaillance d'un équipement. Autrement dit, la maintenance corrective est effectuée après la détection d'une panne, et elle s'applique automatiquement aux défaillances complètes et soudaines. Ce type de maintenance est généralement réservé aux équipements peu coûteux, non stratégiques pour la production, et dont la panne a une faible influence sur la sécurité et le bon déroulement des opérations [20].

- **Maintenance préventive**

Ce type de maintenance a pour objectif de réduire la probabilité de défaillance et d'éviter les pannes des équipements pendant leur utilisation. Sa mise en oeuvre nécessite



une décomposition des sous-systèmes en composants tels que les roulements, le circuit magnétique, arbres de transmission, bobines, isolateurs électriques et cetera...

Les objectifs de la maintenance préventive :

- Augmenter la durée de vie des équipements et assurer leur bon fonctionnement sur le long terme.
- Diminuer le budget de la maintenance en réduisant les réparations coûteuses.
- Supprimer les causes des accidents graves et améliorer la sécurité dans l'environnement de travail [20].

#### ⇒ **Maintenance préventive systématique**

La maintenance préventive systématique est un type de maintenance planifiée selon un calendrier prédéfini, comprenant des actions telles que le graissage, la lubrification, le nettoyage, le dépoussiérage et le calibrage. Son objectif est d'éviter les causes de pannes et de ralentir l'usure des composants du système. En général, cette maintenance concerne les éléments dont une panne peut être coûteuse, mais dont le remplacement reste abordable.

Exemple : Dans les usines, le nettoyage régulier des filtres à air des machines est programmé afin d'éviter l'accumulation de poussière, ce qui pourrait entraîner une surchauffe et une défaillance des équipements [20].

#### ⇒ **Maintenance préventive conditionnelle**

La maintenance préventive conditionnelle est un type de maintenance déclenché lorsqu'un symptôme spécifique est observé, comme une élévation anormale de température, des vibrations excessives ou un jeu mécanique important. Ces signes permettent de prévoir une défaillance imminente et d'intervenir juste avant qu'elle ne se produise. Cette maintenance est effectuée dès qu'une mesure dépasse un seuil défini pour une grandeur physique telle que la température ou la pression.

Exemple : Dans les centrales électriques, si la température d'un palier (bearing) d'un moteur augmente de manière anormale, une intervention est immédiatement réalisée pour éviter une panne majeure du système [20].

### **1.3.6 Maintenabilité**

La maintenabilité désigne la facilité avec laquelle un système ou un équipement peut être entretenu. Elle peut être considérablement améliorée grâce à la mise en place de

systèmes de diagnostic permettant de détecter rapidement les pannes et de faciliter les réparations.

Exemple : Dans les moteurs asynchrones, l'utilisation de systèmes d'analyse des vibrations ou de surveillance du courant permet de détecter des défaillances telles que la rupture des barres du rotor ou le déséquilibre des roulements. Ces systèmes facilitent une intervention précoce, réduisant ainsi les temps d'arrêt et rendant la maintenance plus efficace.

### **1.3.7 Sécurité**

Le terme sécurité regroupe l'ensemble des caractéristiques liées à l'utilisation d'un système ou d'un équipement, ainsi que les dangers potentiels pouvant affecter l'utilisateur ou le matériel.

Exemple (concernant les moteurs asynchrones) :

Dans les moteurs électriques asynchrones, des dispositifs de protection comme les disjoncteurs thermiques et les relais sont installés pour éviter les surchauffes et les surintensités, réduisant ainsi les risques d'accidents et protégeant les équipements contre les dommages.

### **1.3.8 Sûreté**

La sûreté englobe les concepts de disponibilité, de fiabilité, de maintenabilité et de sécurité. Elle caractérise le niveau de confiance que l'on peut accorder au bon fonctionnement d'un système sans risques de défaillance imprévue.

Exemple (concernant les moteurs asynchrones) :

Dans les moteurs électriques asynchrones, la sûreté est assurée par une conception fiable, une maintenance régulière et l'intégration de dispositifs de protection tels que les relais thermiques et les capteurs de vibrations, garantissant ainsi un fonctionnement continu sans arrêts imprévus.

## **1.4 Constitution de la machine asynchrone**

La machine asynchrone, ou moteur à induction, est composée d'un stator et d'un rotor, tous deux constitués de tôles d'acier avec des encoches pour les enroulements.

Le stator est fixe et contient les enroulements reliés à la source d'alimentation.

Le rotor, monté sur un axe, peut être bobiné ou à cage d'écureuil, ce dernier ayant ses enroulements en court-circuit permanent [01-20].

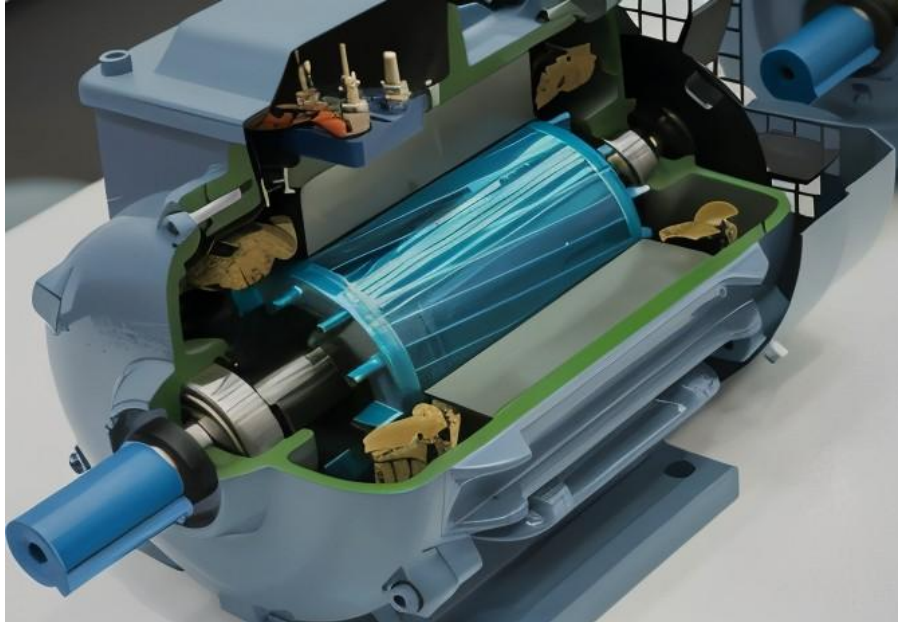


Fig 1.2: Machine asynchrone

## 1.5 Machine asynchrone à cage

Les éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil sont illustrés dans la Figure 1-3.

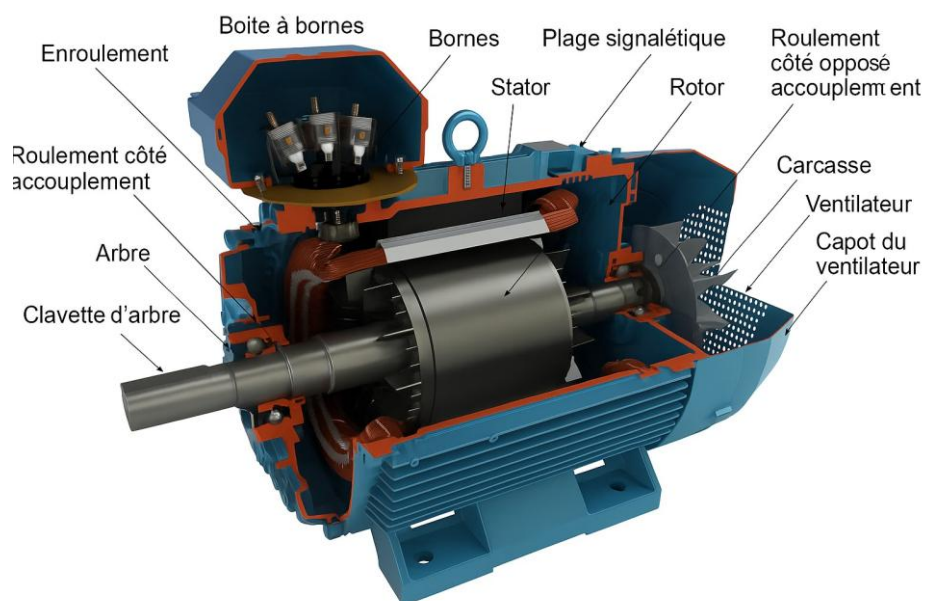


Fig 1.3: Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil

### 1.5.1 Stator

Le stator est constitué d'un enroulement réparti dans les encoches du circuit magnétique. Ce dernier est formé d'un empilage de tôles avec des encoches parallèles à l'axe de la machine (Figure 1-3) [10].

L'enroulement statorique est composé de deux parties principales :

- Les conducteurs d'encoches.
- Les têtes de bobines.

Les conducteurs d'encoches créent le champ magnétique dans l'entrefer, permettant la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines assurent la fermeture des courants en organisant la circulation du courant entre les conducteurs. L'objectif est d'obtenir une distribution du courant la plus sinusoïdale possible à la surface de l'entrefer, afin de réduire les ondulations du couple électromagnétique [11].



Fig 1.4: Vue schématique en perspective Noyau du stator

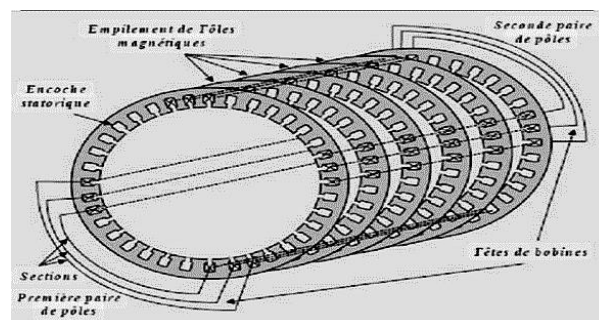


Fig 1.5: Vue schématique en perspective Rainures du stator

### 1.5.2 Rotor à cage

Dans le rotor à cage d'écureuil, les anneaux de court-circuit permettent la circulation du courant entre les barres rotoriques placées dans les encoches. Ces barres, disposées régulièrement, forment le circuit électrique du rotor. Cette cage est insérée dans un circuit magnétique composé de tôles empilées sur l'arbre de la machine, similaire à celui d'un rotor bobiné [10].

Les conducteurs du rotor à cage sont fabriqués soit par coulage d'un alliage d'aluminium, soit à partir de barres massives de cuivre, qui sont ensuite fixées dans les tôles du rotor "Il y a généralement une grande résistance entre les barres du rotor et les tôles magnétiques, ce qui rend les courants de fuite négligeables, sauf en cas de rupture d'une barre." [08].

Le moteur à cage d'écureuil est bien plus simple à fabriquer que le moteur à rotor bobiné, ce qui réduit son coût de production. En outre, il possède un empilement plus important de tôles magnétiques ainsi que des spires en court-circuit. C'est pourquoi il représente la majorité des moteurs asynchrones actuellement en service [10].



Fig 1.6: Vue schématique en perspective du rotor à cage

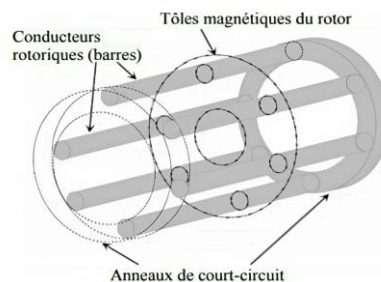


Fig 1.7: Vue schématique en perspective Barres du rotor et anneaux de court-circuit

## 1.6 Principe de fonctionnement d'une MAS

Le principe de fonctionnement de la machine asynchrone repose entièrement sur les lois de l'induction électromagnétique. Elle peut être assimilée à un transformateur à champ magnétique tournant, où :

- Le stator est comparable à l'enroulement primaire, recevant le courant de la source et générant le champ magnétique.
- Le rotor est assimilé à l'enroulement secondaire en court-circuit, dans lequel un courant induit est généré par induction électromagnétique.

Le fonctionnement de la machine asynchrone repose sur l'interaction électromagnétique entre :

- Le champ magnétique tournant, créé lorsque le courant triphasé alimente l'enroulement statorique à partir du réseau électrique.
- Les courants induits dans le rotor, qui apparaissent lorsque les conducteurs du rotor sont traversés par ce champ tournant, générant ainsi une force électromotrice induite et un courant dans le rotor, ce qui entraîne la rotation du moteur [07-17].

Lorsque le rotor tourne à une vitesse  $n_s$  différente du synchronisme, l'application de la loi de FARADAY à un des enroulements rotoriques montre que celui-ci devient le siège d'une force électromotrice qui étant court-circuité sur les enroulements va donner naissance à un courant dont l'intensité est limitée par l'impédance de ce dernier. L'interaction entre ce courant et le champ glissant va donner naissance à des forces s'exerçant sur les brins du rotor dont le moment par rapport à l'axe de rotation constituera le couple de la machine. Lorsque le champ est sinusoïdal, sa vitesse de rotation est [07] :

$$n_s = \frac{\Omega}{p} \quad \text{ou} \quad \frac{60f}{p} \quad (1.1)$$

Avec :

$f$  est la fréquence d'alimentation

$p$  représente le nombre de paires de pôles

L'interaction électromagnétique des deux parties d'une machine asynchrone (sans collecteur) n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant ( $n_s$ ) diffère de celle du rotor ( $n$ ), c'est-à-dire, lorsque  $n \neq n_s$ , car dans le cas contraire, c'est-à-dire lorsque  $n = n_s$ , le champ serait immobile par rapport au rotor et aucun courant ne serait induit

dans l'enroulement rotorique[7].

Le rapport :

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s} = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (1.2)$$

| Symbole                | Signification                       | Interprétation                                                             |
|------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| $g$                    | Glissement                          | Le rapport de la différence entre les deux vitesses à la vitesse synchrone |
| $\Omega_s$             | Vitesse angulaire Synchrone (rad/s) | La Vitesse du champ tournant généré par le courant dans le rotor           |
| $\Omega$ ou $\Omega_r$ | Vitesse angulaire du rotor (rad/s)  | La Vitesse réelle du rotor                                                 |
| $n_s$                  | Vitesse synchrone (tr/min)          | La Vitesse réelle à laquelle tourne champ magnétique                       |
| $n$ ou $n_r$           | Vitesse réelle du rotor (tr/min)    | La Vitesse de rotation réelle du rotor                                     |

Table 1.1: Définitions des paramètres du glissement dans un moteur asynchrone

## 1.7 Étude statistique des défaillances de la machine asynchrone

Les machines asynchrones peuvent subir différents types de défaillances, qui peuvent être d'origine électrique, mécanique ou magnétique. Ces défaillances résultent de plusieurs facteurs que l'on peut regrouper en trois catégories principales :

### 1.7.1 Les causes initiales de défaillance (générateurs de pannes)

Ce sont les éléments déclencheurs des défauts, comme :

- La surchauffe du moteur.

- Les courts-circuits ou défauts électriques.
- Les surtensions d'alimentation.
- Les problèmes d'isolation.
- L'usure des composants mécaniques (notamment les roulements).
- La rupture de fixations, etc.

### **1.7.2 Les facteurs aggravants (amplificateurs de défauts)**

Ces facteurs contribuent à accélérer ou à aggraver la défaillance, tels que [22] :

- Les surcharges fréquentes.
- Les vibrations mécaniques.
- Un environnement humide.
- Un échauffement constant.
- Une lubrification insuffisante.
- Le vieillissement des composants, etc.

### **1.7.3 Les défauts liés à la fabrication ou aux erreurs humaines**

Ils incluent :

- Les malfaçons ou défauts de fabrication.
- L'utilisation de composants défectueux.
- Des protections mal adaptées.
- Un mauvais dimensionnement de la machine, etc.

Une étude statistique réalisée en 1988 par une compagnie d'assurance allemande spécialisée dans les systèmes industriels a analysé les pannes survenues sur des moteurs asynchrones de puissance moyenne (entre 50kW et 200kW). Les résultats de cette étude sont présentés dans la figure 1-8 [30-29].



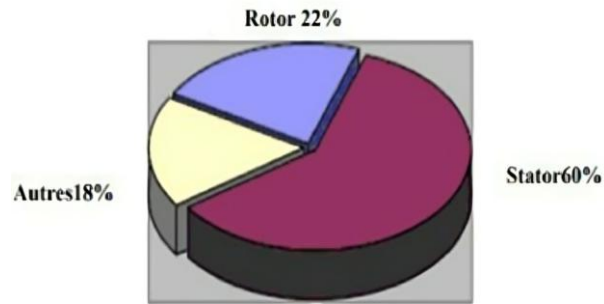


Fig 1.8: Proportion des défauts

La répartition des pannes dans les différentes parties du moteur est présentée sur la figure 1-9 :

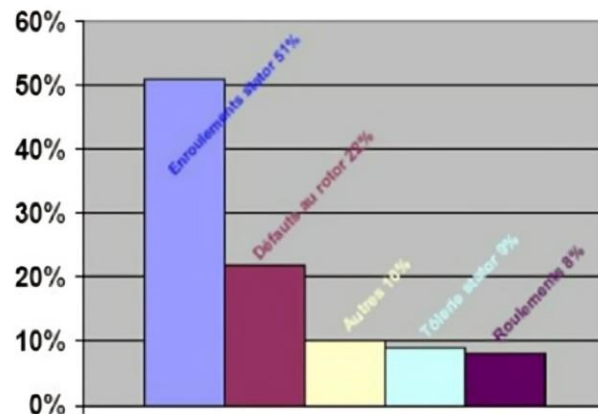


Fig 1.9: Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances

Une autre étude statistique faite sur des machines de grande puissance (de 100kW à 1MW) donne des résultats qui sont présentés sur la figure 1-10 [9] :

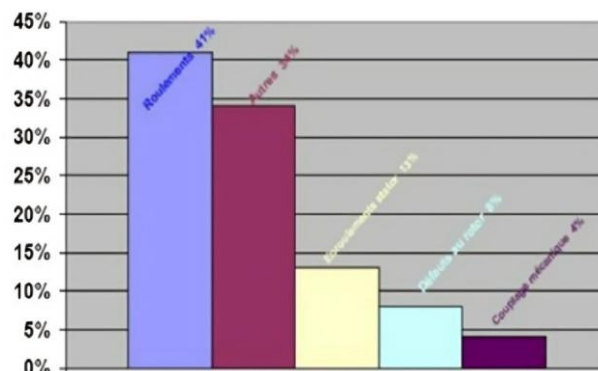


Fig 1.10: Répartition des pannes sur les machines de fortes puissances

Les machines de ce type sont soumises à des contraintes mécaniques importantes, ce qui justifie le taux élevé de défaillances au niveau des roulements. Par conséquent, elles

nécessitent une maintenance mécanique rigoureuse et régulière afin de garantir leur bon fonctionnement et prolonger leur durée de vie.

## 1.8 Les avantages et inconvénients de la MAS

Les avantages et les inconvénients du moteur asynchrone sont assez nombreux mais les principaux sont résumés dans le tableau suivant [06]:

| Les avantages                                                                                                                                                           | Les inconvénients                                                                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• La robustesse</li> <li>• La simplicité de construction</li> <li>• Leurs bas coûts</li> <li>• Un rendement excellent</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Non découplage naturel</li> <li>• Non linéarités</li> </ul> |

Table 1.2: Les avantages et les inconvénients du moteur asynchrone

## 1.9 Types des défauts et leurs causes

Le moteur asynchrone peut être sujet à plusieurs types de pannes affectant ses performances et son efficacité. Certaines des principales défaillances peuvent être classées comme suit :

### 1.9.1 Défaillances mécaniques

#### • Défauts de roulement

Le moteur asynchrone peut rencontrer des problèmes affectant son fonctionnement et ses performances. Certaines pannes principales peuvent être classées en plusieurs catégories, comme les défauts électriques liés au courant et à la tension, les défauts mécaniques concernant les parties mobiles, et les défauts d'isolation causés par la chaleur et l'humidité.

L'usure des roulements se produit lorsque ceux-ci ne peuvent plus tourner correctement en raison de leur détérioration. Cela peut être causé par un manque de lubrification ou l'utilisation d'huiles inadaptées, augmentant ainsi les frottements et les dommages. De plus, des charges excessives ou de fortes vibrations peuvent accélérer leur dégradation. Avec le temps, cela peut provoquer des bruits anormaux et réduire l'efficacité du moteur [05].



Fig 1.11: Structure d'un roulement à billes

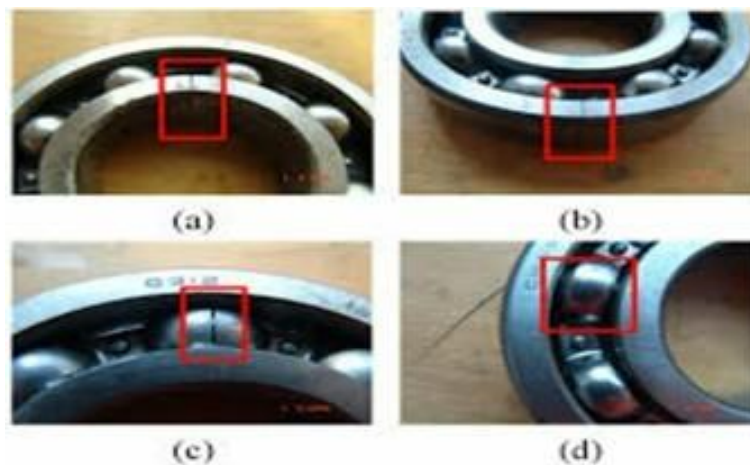


Fig 1.12: Structure Les défauts de roulement à billes

- **Défauts d'excentricité**

Dans certains cas, le moteur peut subir un désalignement du rotor, provoquant des oscillations du couple dues à un décalage entre le centre de rotation de l'arbre et celui du rotor. Ce phénomène, appelé excentricité, peut être causé par un mauvais positionnement

des paliers lors de l'assemblage, une usure des roulements, un déséquilibre de charge, ou encore un défaut de fabrication tel qu'une erreur d'usinage [04-05].

On distingue trois catégories d'excentricité (figure 1-13) :

- **L'excentricité statique** est généralement causée par un mauvais alignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à celui du stator, entraînant un déséquilibre au sein du moteur.
- **L'excentricité dynamique** se produit lorsque le centre de rotation du rotor est différent du centre géométrique du stator, et en plus, le centre du rotor tourne autour du centre géométrique du stator. Ce type d'excentricité est causé par une déformation du cylindre du rotor ou du stator.
- **L'excentricité mixte** représente la somme des deux cas statique et dynamique.

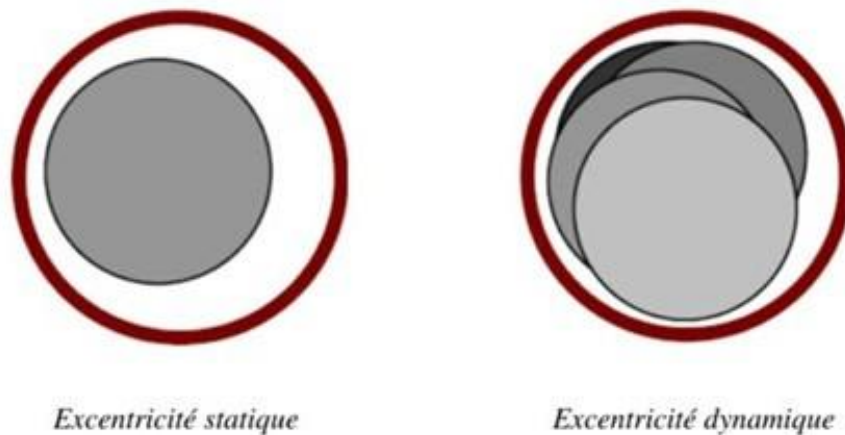


Fig 1.13: Défauts d'excentricité statique et dynamique

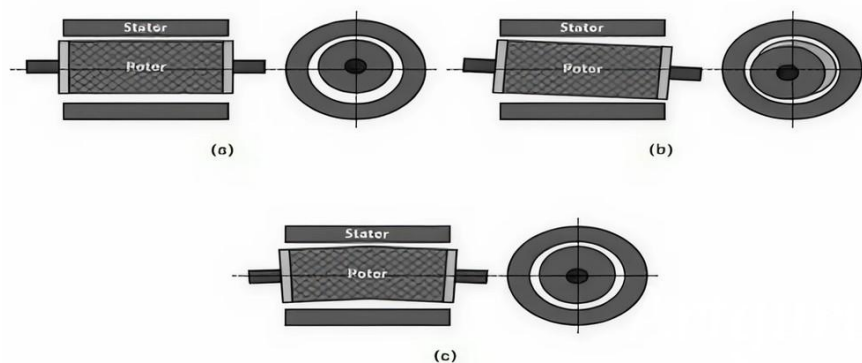


Fig 1.14: Types d'excentricité, (a) statique, (b) dynamique, (c) mixte

- **Défauts de l'arbre moteur**

L'utilisation d'un matériau inadapté lors de la fabrication de l'arbre du moteur peut entraîner l'apparition de fissures, pouvant aboutir à une rupture complète de l'arbre et à l'arrêt définitif de la machine asynchrone. De plus, un environnement corrosif, comme l'humidité, peut fragiliser l'arbre en provoquant des microfissures qui, à long terme, peuvent conduire à la destruction totale du moteur.

Par ailleurs, des contraintes mécaniques importantes appliquées sur l'arbre peuvent engendrer un désalignement supplémentaire, qu'il soit statique, dynamique ou mixte, affectant ainsi les performances de la machine.

- **Défauts créés par les flasques**

Des défauts peuvent survenir lors de la phase de fabrication, notamment un mauvais positionnement des flasques, entraînant un désalignement des roulements à billes. Ce défaut induit une excentricité au niveau de l'arbre du moteur. Ce type de défaillance peut être détecté grâce à une analyse vibratoire ou une analyse harmonique des courants absorbés par la machine [15].

## **1.9.2 Défaillances électriques**

- **Défauts rotorique**

L'analyse du spectre du courant statorique en régime permanent permet de détecter des défaillances rotoriques, telles que les ruptures des barres du rotor ou des anneaux de court-circuit :

⇒ **Défaut de cassure des barres**

La rupture des barres d'un moteur asynchrone est l'un des défauts les plus couramment étudiés en laboratoire en raison de sa facilité de réalisation. Cette rupture engendre une dissymétrie du rotor, conduisant à la formation d'un champ tournant opposé à celui généré par le stator, et cela à la fréquence de glissement. Par conséquent, un courant supplémentaire est induit dans le bobinage statorique [02].

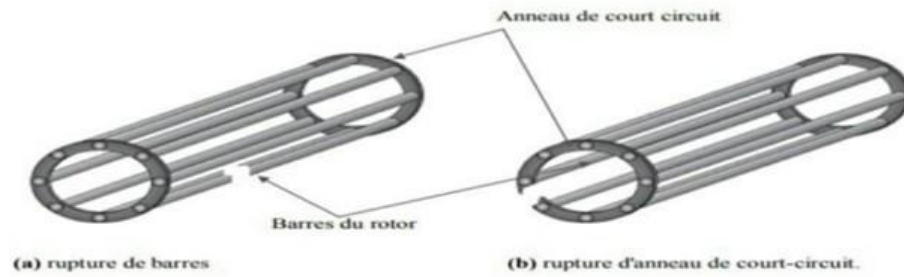


Fig 1.15: Défaut d'un rotor à cage d'écureuil

### ⇒ Cassure d'une portion d'anneau de court-circuit

La cassure d'une portion d'anneau est un défaut aussi fréquent que la rupture des barres. Ces cassures sont causées soit par des bulles de coulée, soit par les dilatations différentielles entre les barres et les anneaux. De plus, les portions d'anneaux de court-circuit transportent des courants plus élevés que ceux des barres du rotor, ce qui les rend plus vulnérables aux dommages [01-15].

Comme il est difficile à détecter, ce défaut est souvent classé avec la rupture des barres dans les études statistiques, voire confondu avec celui-ci. Ainsi, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité, etc.), ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent provoquer leur cassure [09-03].

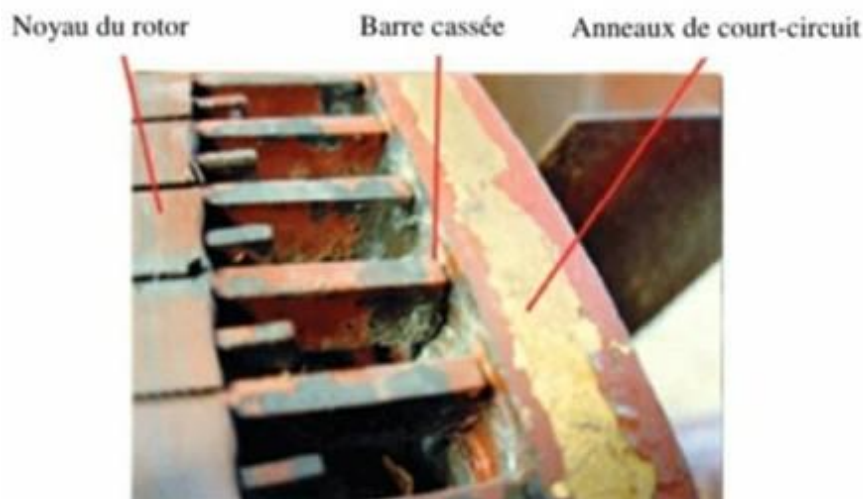


Fig 1.16: Exemple d'un défaut de cassure de barre d'un moteur asynchrone [03]

### • Défauts statorique

L'apparition d'un défaut au niveau des circuits électriques du stator dans une machine asynchrone peut avoir plusieurs origines. Par exemple, les défauts de type court-circuit

entre les spires de la même phase sont fréquents et peuvent se produire soit au niveau des têtes de bobines, soit dans les encoches.

Ce type de défaut peut être causé par une détérioration des isolants des spires du bobinage statorique. On peut également citer les courts-circuits entre une phase et le neutre, entre une phase et la carcasse métallique de la machine, ou encore entre deux phases du stator [06-09].

#### ⇒ **Défauts d'isolant dans un enroulement**

La détérioration des isolants dans les enroulements du moteur peut entraîner un court-circuit. Cette dégradation est principalement due à l'élévation de la température des composants du moteur, causée par différentes pertes telles que les pertes Joule, les pertes fer et les pertes mécaniques.

Il est important de noter que les matériaux isolants possèdent des limites mécaniques, thermiques et électriques. Lorsque les conditions de fonctionnement dépassent ces limites, l'isolation peut se dégrader, entraînant un contact électrique entre les différentes parties de l'enroulement et, par conséquent, l'apparition d'un court-circuit [12].



Fig 1.17: défauts d'isolant dans un enroulement [13]

#### ⇒ **Défaillances du circuit magnétique**

Les tôles du circuit magnétique sont normalement isolées entre elles, mais un court-circuit accidentel peut survenir. Ce défaut peut être causé par :

- Un court-circuit des conducteurs qui peut également provoquer un échauffement local intense dans les tôles.
- Les corps étrangers projetés dans l'entrefer peuvent entraîner l'abrasion des tôles et causer des courts-circuits.



⇒ **Circuit ouvert sur une phase**

Lorsqu'une phase est ouverte, le courant ne passe plus, ce qui rend la situation moins dangereuse qu'un court-circuit. Un court-circuit provoque une forte chaleur qui peut abîmer l'isolation et les enroulements.

De plus, un circuit ouvert ne crée pas de résistance quand un champ magnétique variable est appliqué, donc il n'a pas un grand impact sur le fonctionnement du moteur [14].

⇒ **Court-circuit entre spire**

La détection précoce d'un court-circuit entre spires permet d'éviter un dommage grave au stator, car le défaut peut se propager aux autres spires. Cela permet de réduire les coûts de maintenance et de limiter les arrêts pour réparation.

Plusieurs techniques existent pour détecter ce type de défaut avec une efficacité variable. Par exemple, Penman et La Dans ont utilisé une méthode basée sur le flux axial de fuite, nécessitant l'installation d'une grande bobine pour détecter l'anomalie [14].



Fig 1.18: court-circuit entre spires dû aux coupures de tension [13]

⇒ **Court-circuit entre phases**

Un court-circuit entre deux phases peut se produire n'importe où dans le moteur, mais il arrive souvent aux extrémités des bobines, où les fils des phases sont proches. Son effet dépend de son emplacement :

- Près de l'alimentation, il cause un très fort courant, pouvant brûler les fils et arrêter le moteur immédiatement.
- Près du neutre, il crée un déséquilibre du courant, mais sans forcément brûler les fils.



Dans un moteur asynchrone, ce problème augmente le courant dans le rotor, ce qui peut provoquer une surchauffe et perturber son fonctionnement [15].



Fig 1.19: court-circuit phase-phase [15]

## 1.10 Méthodes de diagnostic sans modèle analytique

Ces méthodes ne nécessitent pas un modèle précis du système, mais reposent sur la reconnaissance de signatures de défauts. Ces signatures, obtenues par modélisation ou par des mesures expérimentales, sont ensuite stockées dans une base de données. Par la suite, elles sont exploitées pour l'analyse du signal ou par des systèmes experts tels que la classification et la reconnaissance de formes afin de détecter les défauts [17].

### 1.10.1 Méthode par traitement de signal

La méthode de diagnostic par traitement du signal ne nécessite pas de connaître les signatures de défauts à l'avance. Cependant, lorsqu'elles sont obtenues par modélisation ou par des mesures expérimentales, elles sont enregistrées dans une base de données. L'analyse des défauts se fait ensuite par l'interprétation des signaux ou à l'aide de systèmes experts. Cette approche permet de détecter plusieurs types de défauts, notamment [18] :

- Les ruptures de barres ou de portions d'anneaux au rotor.
- Les courts-circuits entre les spires du stator.
- L'excentricité statique et dynamique du rotor.

### **1.10.2 Méthode par intelligence artificielle (IA)**

L'intelligence artificielle imite l'intelligence humaine et s'inspire des phénomènes naturels, des approches heuristiques et évolutionnaires. Elle est de plus en plus utilisée pour la supervision et le diagnostic, améliorant ainsi la fiabilité et l'efficacité de la détection des défauts. Ces techniques exploitent les signatures de défauts avec ou sans modèle, sans nécessiter une connaissance précise du système. Aujourd'hui, les recherches s'orientent vers ces méthodes avancées pour optimiser le diagnostic et la détection des anomalies, notamment grâce aux réseaux de neurones [16].

## **1.11 Méthodes de détection des défauts ou Techniques de surveillance**

Plusieurs techniques de surveillance ont été développées par différents chercheurs pour détecter les défauts de rupture des barres du rotor dans les moteurs à induction. Ces techniques se basent sur l'analyse de plusieurs paramètres de fonctionnement du moteur, en étudiant les signaux électriques et mécaniques afin d'identifier toute anomalie éventuelle.

### **1.11.1 Analyse de la signature du courant statorique (MCSA)**

Pour analyser les défauts avec précision, les recherches se sont particulièrement orientées vers l'étude du spectre des courants statoriques pour deux raisons principales : d'une part, la mesure de ces courants est simple, et d'autre part, ils fournissent des informations sur divers types de défauts. Cependant, l'utilisation de la transformation de Fourier rapide (FFT) pour analyser ces signaux n'est pertinente en termes d'identification que si les fréquences caractéristiques de chaque défaut sont déjà connues [28].

De plus, cette méthode exige un nombre suffisant de points d'acquisition afin d'assurer une précision fréquentielle acceptable. Cette technique est généralement appliquée lorsque la machine fonctionne en régime permanent [18].

### **1.11.2 Analyse du couple électromagnétique**

L'utilisation de ce signal est un choix pertinent pour la détection des défauts liés à la charge. En effet, les variations du couple de charge entraînent des modifications du

flux magnétique et du courant dans la machine. De plus, la torsion de l'arbre provoque l'apparition d'harmoniques dans le spectre du couple [19].

### 1.11.3 Analyse par mesure de la température

Un capteur peut être monté sur l'enroulement, intégré dans l'isolant ou placé dans la plaque à bornes. Il constitue un bon indicateur de la surchauffe de la machine, qui est un signe de défauts. De plus, des techniques récentes de visualisation des images thermiques par infrarouge sont utilisées pour le diagnostic des différents défauts [19].

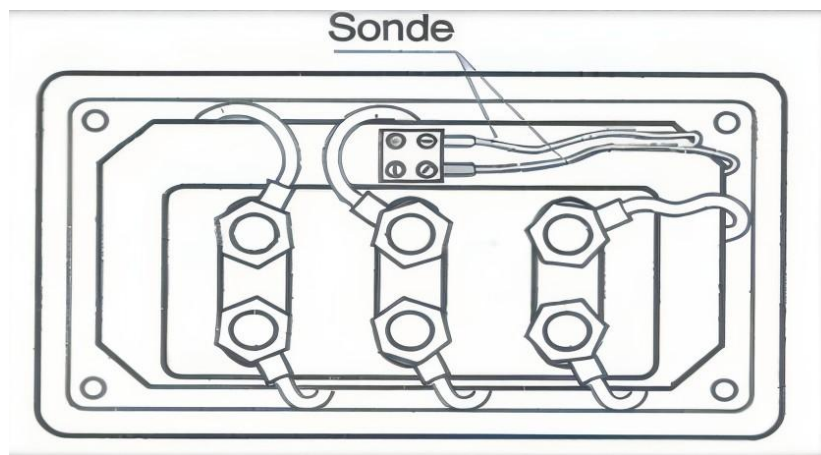


Fig 1.20: capteur de température dans une plaque à bornes

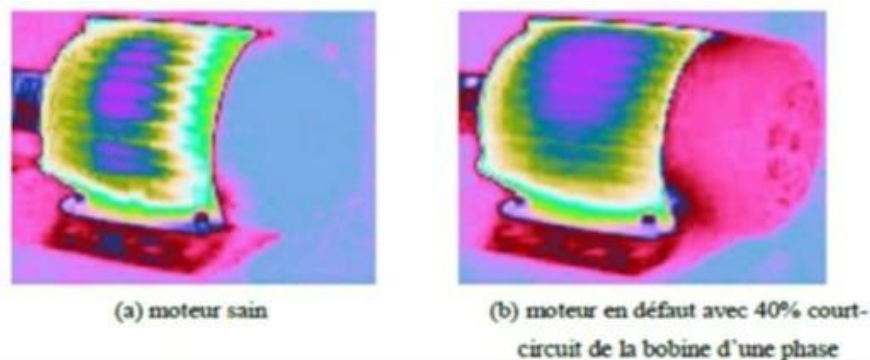


Fig 1.21: techniques par visualisation des images thermiques

### 1.11.4 Analyse du flux

Tout déséquilibre, qu'il soit magnétique, mécanique, électrique ou électromagnétique, au niveau du rotor ou du stator, peut influencer la conversion électromécanique ainsi que la distribution du champ à l'intérieur et à l'extérieur de la machine. Ainsi, des études ont

été réalisées afin d'extraire, à partir de la mesure des flux d'entrefer, axiaux ou de fuite, les signatures caractéristiques de certains défauts. Pour cela, des bobines exploratrices sont installées à l'extérieur de la machine, parallèlement et perpendiculairement à l'axe du rotor [19].

### 1.11.5 Analyse des signaux vibratoires

L'analyse des défaillances des moteurs électriques à l'aide des signaux vibratoires et acoustiques permet de détecter presque tous les défauts, en particulier les défauts mécaniques pouvant survenir durant le fonctionnement. Cette analyse est réalisée à l'aide de capteurs, généralement des accéléromètres, placés sur les paliers dans les directions verticale, axiale et radiale [19].

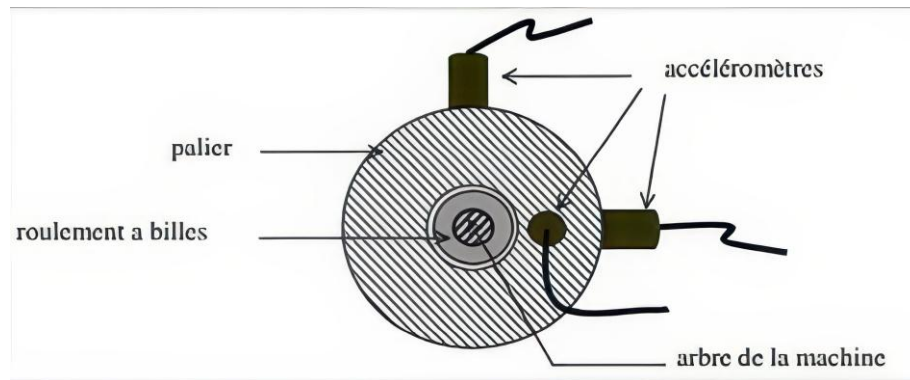


Fig 1.22: mesures vibratoires sur machine asynchrone

## 1.12 Diagnostic par l'analyse de la puissance instantanée

L'utilisation de la puissance instantanée pour la détection des défauts dans les moteurs asynchrones a fait l'objet de nombreuses études. Il est évident que le signal de la puissance contient plus d'informations que le courant d'une seule phase, ce qui constitue un avantage par rapport aux autres méthodes.

Cette approche est employée pour détecter les défauts mécaniques ainsi que les défauts électriques, tels que les courts-circuits entre spires du stator. Dans ce cadre, M.Drif et ses collaborateurs ont démontré l'efficacité de l'utilisation de la puissance apparente pour la détection d'un défaut d'excentricité [19].

## **1.13 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté la machine asynchrone ainsi que ses différents constituants, en mettant en évidence ses avantages et ses inconvénients. Dans la deuxième partie, nous avons exposé les défauts et leurs causes. Enfin, nous avons examiné les méthodes de diagnostic des défauts des machines ainsi que les différentes techniques d'analyse. Le chapitre suivant abordera le variateur de vitesse utilisé pour ajuster la vitesse d'un moteur à courant alternatif.

## *Les Variateurs de Vitesse*

---

|       |                                                                             |    |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1   | Introduction .....                                                          | 33 |
| 2.2   | Principe .....                                                              | 33 |
| 2.3   | Fonction des variateurs de vitesse.....                                     | 36 |
| 2.3.1 | L'accélération contrôlée .....                                              | 36 |
| 2.3.2 | La décélération contrôlée.....                                              | 36 |
| 2.3.3 | La variation et la régulation de vitesse .....                              | 37 |
| 2.3.4 | L'inversion du sens de marche .....                                         | 39 |
| 2.3.5 | Le freinage d'arrêt.....                                                    | 39 |
| 2.4   | Convertisseurs Statique .....                                               | 39 |
| 2.4.1 | Les redresseurs.....                                                        | 39 |
| 2.4.2 | Le circuit intermédiaire.....                                               | 42 |
| 2.4.3 | Les onduleurs .....                                                         | 44 |
| 2.5   | Modulation de largeur d'impulsion MLI (PWM).....                            | 44 |
| 2.6   | Les avantages et Les inconvénients d'un variateur de vitesse .....          | 45 |
| 2.6.1 | Les avantages d'un variateur de vitesse.....                                | 45 |
| 2.6.2 | Les inconvénients d'un variateur de vitesse .....                           | 46 |
| 2.7   | Le circuit de commande .....                                                | 46 |
| 2.7.1 | la commande $U/f = Cst$ (Scalaire) .....                                    | 47 |
| 2.7.2 | La commande vectorielle de tension (ou de flux) .....                       | 48 |
| 2.8   | Les avantages et Les inconvénients des La commande vectorielle de flux..... | 49 |
| 2.8.1 | Les avantage .....                                                          | 49 |
| 2.8.2 | Les inconvénients.....                                                      | 49 |
| 2.9   | CONCLUSION .....                                                            | 49 |

---

## 2.1 Introduction

Autrefois, la plupart des moteurs fonctionnaient à une vitesse fixe. Pour ajuster leur vitesse en fonction des besoins des machines, on utilisait des dispositifs mécaniques complexes. Cependant, avec les avancées technologiques, il est désormais possible de contrôler la vitesse des moteurs de manière plus efficace et flexible grâce aux variateurs de vitesse électroniques [24].

## 2.2 Principe

Les variateurs de vitesse standards, couramment utilisés dans le domaine industriel, sont constitués de deux convertisseurs reliés par un étage intermédiaire en courant continu appelé bus DC, composé essentiellement de condensateurs. Cette topologie permet une conversion indirecte de type AC/DC/AC. Le premier convertisseur est un redresseur à diodes, non commandé, mais très robuste et économique. Il permet de générer une tension continue à partir d'un réseau d'alimentation monophasé (pour les faibles puissances) ou triphasé (pour les puissances plus élevées). Cette tension continue est ensuite appliquée à un onduleur de tension triphasé, commandé par Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI). Ce dernier permet de contrôler à la fois la fréquence et l'amplitude de la tension envoyée au moteur, ce qui permet de réguler efficacement sa vitesse de rotation [25].

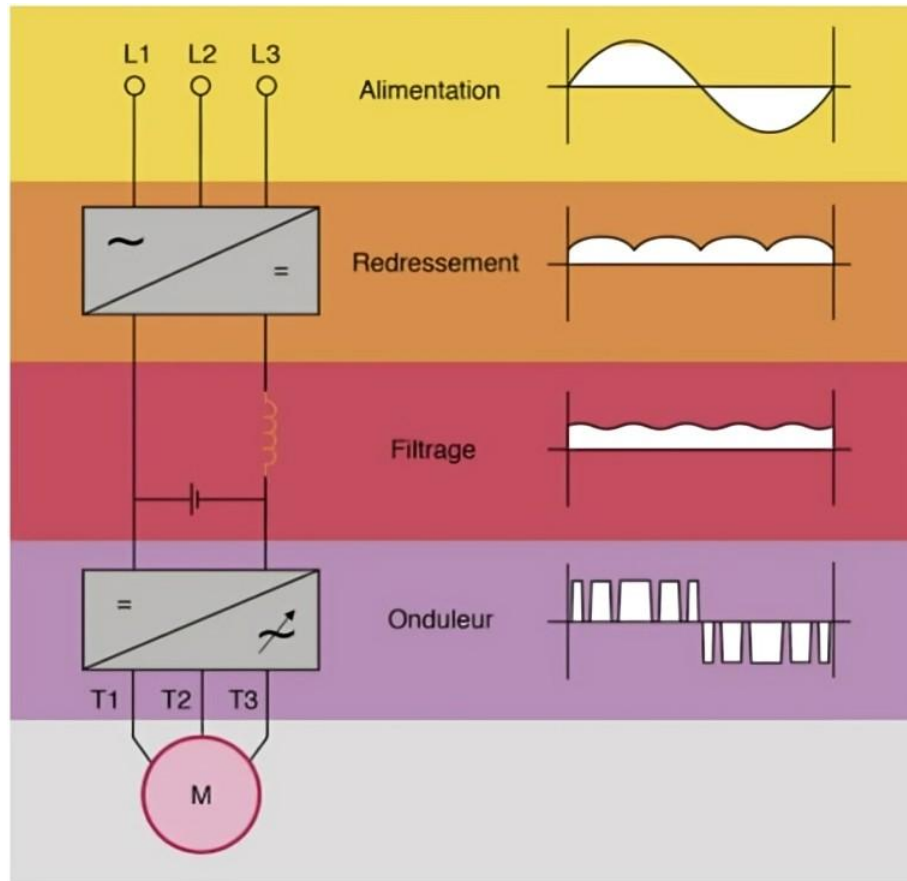


Fig 2.1: principe de variateur de vitesse

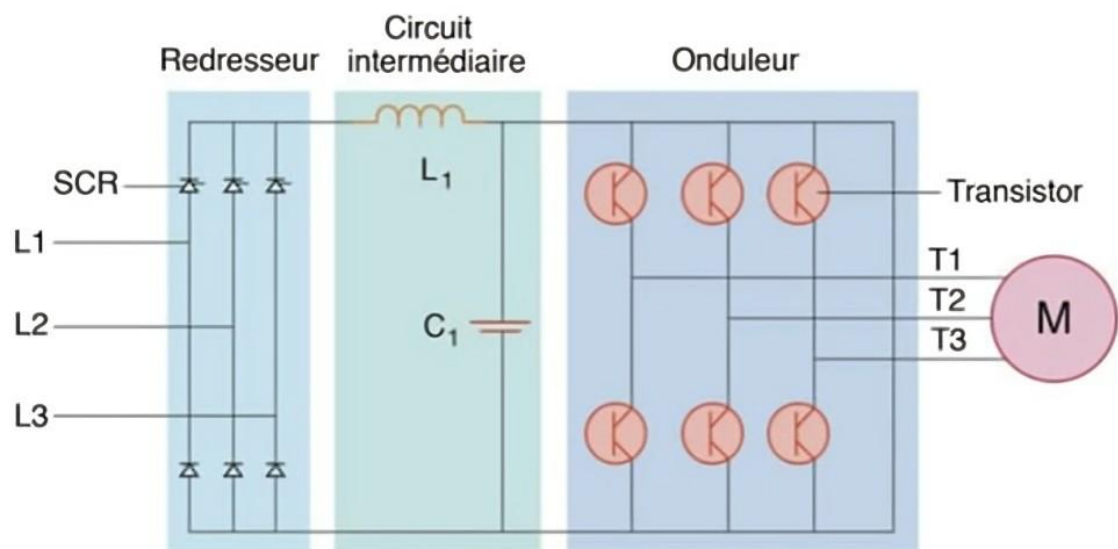


Fig 2.2: topologie des variateurs de vitesse standards





Fig 2.3: Variateur de vitesse hitachi X200



Fig 2.4: Moteur asynchrone triphasé connecté à un variateur de vitesse

## 2.3 Fonction des variateurs de vitesse

Au niveau des ascenseurs, parmi la multitude de possibilités de fonctions qu'offrent les variateurs de vitesse actuels, on épinglera [24] :

- L'accélération contrôlée.
- La décélération contrôlée.
- La variation et la régulation de vitesse.
- L'inversion du sens de marche.
- Le freinage d'arrêt.

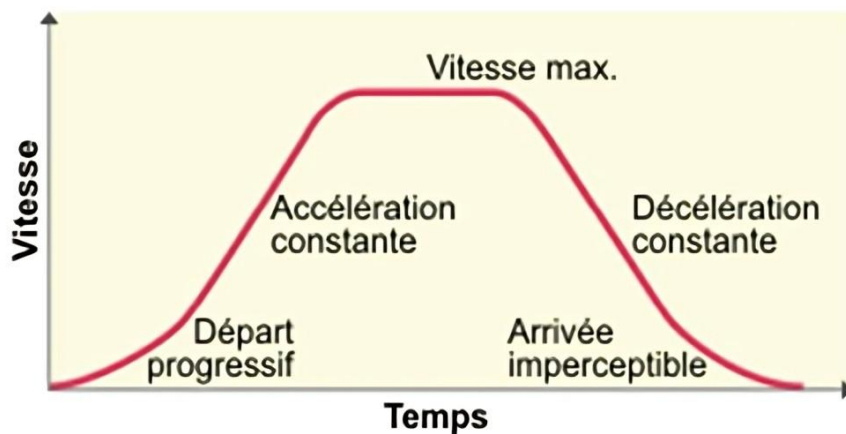


Fig 2.5: Fonction des variateurs de vitesse

### 2.3.1 L'accélération contrôlée

Le profil de la courbe de démarrage d'un moteur d'ascenseur est avant tout lié au confort des utilisateurs dans la cabine. Il peut être soit linéaire ou en forme de "s". Ce profil ou "rampe" est la plupart du temps ajustable en permettant de choisir le temps de mise en vitesse de l'ascenseur [24].

### 2.3.2 La décélération contrôlée

Les variateurs de vitesse ne servent pas uniquement à assurer une accélération progressive du moteur, mais jouent également un rôle essentiel dans la gestion de la décélération, notamment dans le cas des ascenseurs. Il est en effet impossible de couper simplement

l'alimentation du moteur et de laisser celui-ci s'arrêter naturellement, car le couple résistant (dû aux variations constantes entre le poids de la cabine et celui du contrepoids) rend cet arrêt imprécis, inconfortable et potentiellement dangereux pour les passagers. Pour garantir confort et sécurité, le variateur permet de maîtriser la phase de ralentissement, en assurant un arrêt fluide et un positionnement précis au niveau de l'étage. On distingue à ce niveau deux types de freinage [24-25].

- **Freinage en cas de décélération rapide**

Lorsque la décélération souhaitée est supérieure à la décélération naturelle, un freinage électrique est nécessaire. Celui-ci peut être réalisé soit par renvoi de l'énergie vers le réseau électrique, soit par dissipation dans un système de freinage statique (résistances de freinage).

- **Freinage en cas de décélération lente**

Lorsque la décélération souhaitée est inférieure à la décélération naturelle, le moteur développe un couple moteur supérieur au couple résistant, permettant ainsi de maintenir le contrôle du mouvement jusqu'à l'arrêt complet.

### **2.3.3 La variation et la régulation de vitesse**

Parmi les modes de fonctionnement classiques des variateurs de vitesse, on distingue la variation de vitesse proprement dite, dans laquelle la vitesse du moteur est déterminée par une consigne d'entrée (tension ou courant), sans prise en compte de la vitesse réelle du moteur.

Cette dernière peut fluctuer en fonction de plusieurs facteurs, notamment la charge appliquée ou la variation de la tension d'alimentation. Ce mode de fonctionnement est qualifié de boucle ouverte, car il ne comporte aucun système de rétroaction (feedback) permettant de corriger les écarts entre la consigne et la vitesse réelle du moteur (voir Figure 2-6) [24-27].

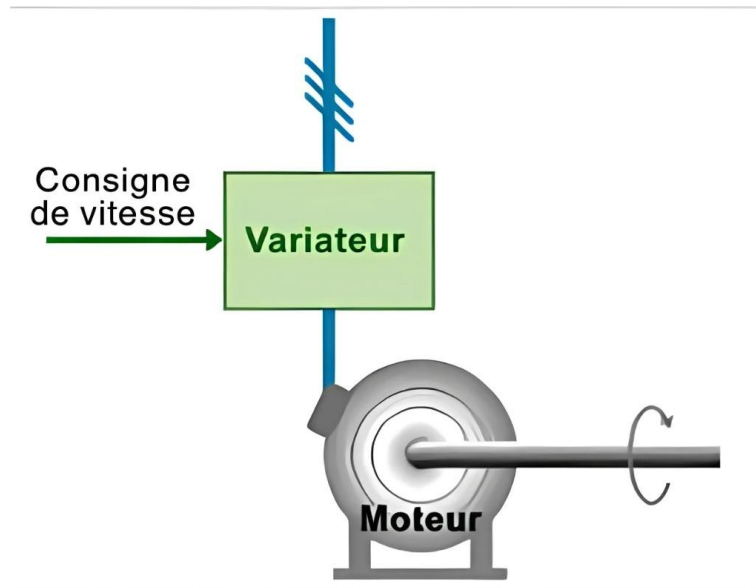


Fig 2.6: Boucle ouverte

- **Fonctionnement en boucle fermée des variateurs de vitesse**

Contrairement au fonctionnement en boucle ouverte, le mode en boucle fermée permet une régulation plus précise de la vitesse du moteur. Dans ce système, un capteur (comme un codeur) mesure en temps réel la vitesse réelle du moteur. Cette mesure est ensuite comparée à la consigne de vitesse. Si un écart est détecté, le variateur ajuste automatiquement la commande envoyée au moteur pour corriger la différence. Ce type de fonctionnement est particulièrement adapté aux applications nécessitant une grande précision et une stabilité de vitesse, même en présence de variations de charge ou de perturbations extérieures (voir Figure 2-7) [24].

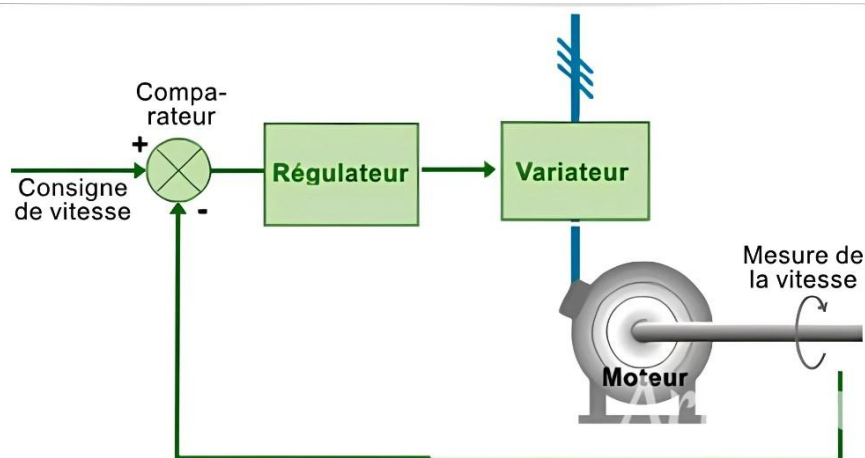


Fig 2.7: Boucle fermée

### **2.3.4 L'inversion du sens de marche**

Sur la plupart des variateurs de vitesse, il est possible d'inverser automatiquement le sens de marche. L'inversion de l'ordre des phases d'alimentation du moteur de l'ascenseur s'effectue [24] :

- Soit par inversion de la consigne d'entrée.
- Soit par un ordre logique sur une borne.
- Soit par une information transmise par une connexion à un réseau de gestion.

### **2.3.5 Le freinage d'arrêt**

C'est un freinage de sécurité pour les ascenseurs :

- Avec des moteurs asynchrones, le variateur de vitesse est capable d'arrêter le courant continu au niveau des enroulements statoriques et par conséquent stopper net le champ tournant ; la dissipation de l'énergie mécanique au niveau du rotor du moteur (danger d'échauffement important).
- Avec des moteurs à courant continu, le freinage s'effectue au moyen d'une résistance connectée sur l'induit de la machine [24].

## **2.4 Convertisseurs Statique**

Un convertisseur statique est un dispositif électronique permettant d'adapter une source d'énergie électrique à un récepteur spécifique, en assurant la conversion nécessaire pour répondre aux exigences de fonctionnement de ce dernier. Le choix du convertisseur dépend à la fois du type de machine à piloter (moteur à courant continu, moteur asynchrone, etc.) et de la nature de la source d'alimentation (monophasée ou triphasée). Ainsi, plusieurs familles de convertisseurs statiques sont distinguées selon leur domaine d'application et les caractéristiques du système à commander [23].

### **2.4.1 Les redresseurs**

Est un convertisseur destiné à alimenter une charge qui nécessite de l'être par une tension ou un courant continu à partir d'une source alternative. L'alimentation est, la

plupart du temps, un générateur de tension. Cette opération se réalise par l'utilisation [21] :

- Soit d'un pont de diodes, le redresseur est "non-commandé".
- Soit d'un pont de thyristors, alors le redresseur est commandé.

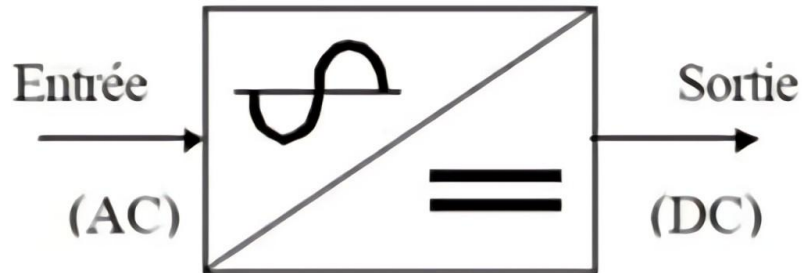


Fig 2.8: symboles des redresseurs

#### • Le redresseur commandé

Dans les redresseurs commandés, les diodes sont remplacées par des thyristors pour commander la puissance voulue aux bornes du récepteur [23].

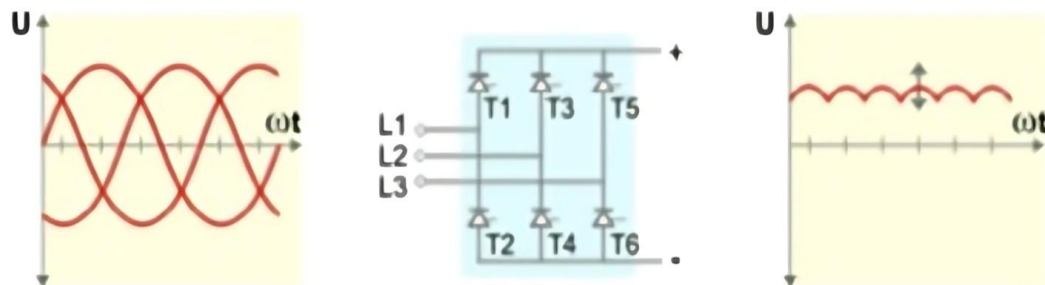


Fig 2.9: redresseurs commandés

#### • Le redresseur non commandé

Comme le montre la figure ci-dessous, des deux alternances d'une tension monophasée alternative (positive et négative), seule l'alternance positive passe à travers la diode entre les électrodes couramment appelées "anode" et "cathode" ; on dit que la diode est "passante".

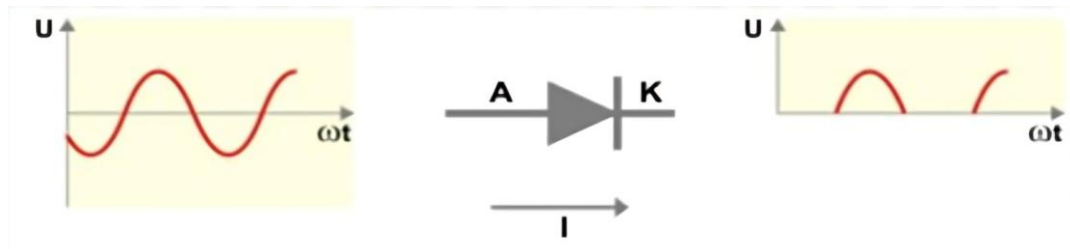


Fig 2.10: fonctionnement de la diode

Pour obtenir une tension continue à la sortie du redresseur, il est nécessaire de trouver un système qui permette d'exploiter les deux alternances ; c'est le pont de diodes. Dans un redresseur triphasé non-commandé, le pont de diodes permet, comme le montre la Figure 2-11, de générer une tension continue en redressant l'alternance négative de chaque une des trois tensions composées. On voit que la tension de sortie n'est pas tout à fait continue et comporte une ondulation résiduelle [24].

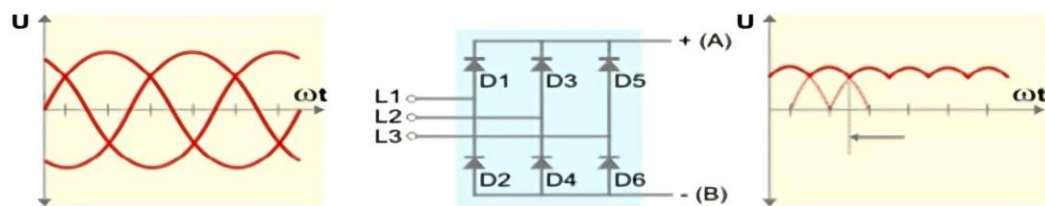


Fig 2.11: redresseurs non-commandés

La tension à ondulation résiduelle sortant du redresseur a une valeur moyenne de l'ordre de 1.35 fois la tension du réseau.

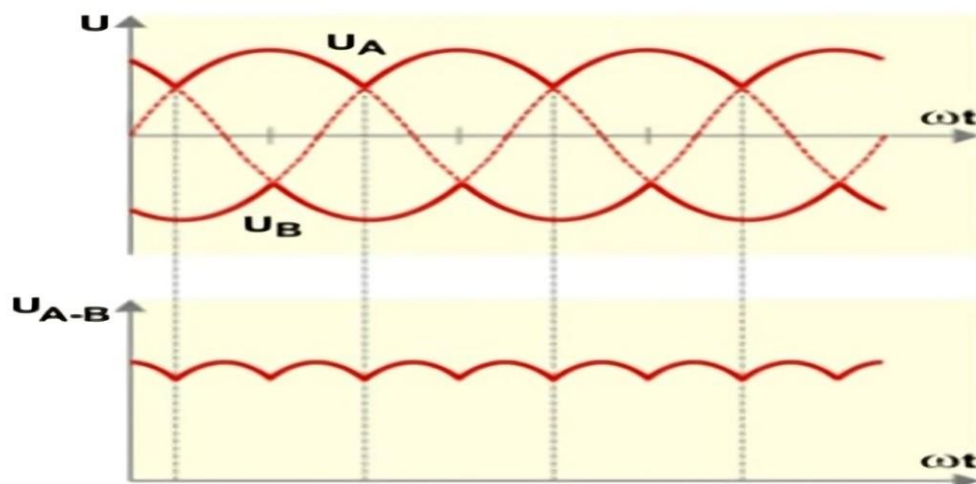


Fig 2.12: tension à ondulation résiduelle

### 2.4.2 Le circuit intermédiaire

Dans le cadre de la commande d'un moteur asynchrone triphasé, le circuit intermédiaire joue un rôle central dans la chaîne de conversion d'énergie. En effet, après la phase de redressement, le courant alternatif provenant du réseau est transformé en courant continu, mais ce dernier présente des ondulations qui peuvent perturber le fonctionnement du moteur. Le circuit intermédiaire, souvent composé de condensateurs et parfois d'inductances, permet de filtrer ces ondulations, garantissant ainsi une alimentation continue et stable à l'onduleur. De plus, ce circuit assure une adaptation dynamique de la tension en fonction des besoins du moteur. En cas de variations brusques de charge (accélérations, freinages, etc.), l'énergie excédentaire peut être temporairement stockée dans ce circuit, évitant ainsi les surtensions ou les interruptions de service. Ce comportement est particulièrement utile dans des applications comme les ascenseurs, les convoyeurs ou les grues, où les charges varient fréquemment et rapidement. Ainsi, le circuit intermédiaire ne se contente pas d'un rôle passif, mais contribue activement à la qualité de la commande et à la protection du système global [24].

- **Le circuit intermédiaire à courant continu variable**

Ce type de circuit intermédiaire est caractéristique des variateurs alimentés par source de courant. Il est composé d'une bobine (ou self) de lissage qui agit comme un filtre passe-bas pour réduire les ondulations résiduelles. En d'autres termes, cette bobine transforme la tension de sortie du redresseur, caractérisée par des ondulations résiduelles, en un courant continu pur [24].



Fig 2.13: Circuit intermédiaire à courant continu variable

- **Le circuit intermédiaire à tension continue constante ou variable**

Ce type de circuit intermédiaire caractérise les variateurs à source de tension. Il est constitué d'une bobine (ou self) de lissage "passe-bas" (pour filtrer les basses fréquences) et d'un condensateur "passe-haut" (pour filtrer les hautes fréquences), permettant ainsi



de réduire l'ondulation résiduelle.

- Pour un redresseur commandé, le circuit intermédiaire transforme la tension de sortie du redresseur, caractérisée par des ondulations résiduelles, en une tension continue d'amplitude variable.

- Pour un redresseur non-commandé, la tension à l'entrée de l'onduleur est une tension continue dont l'amplitude est constante [23].

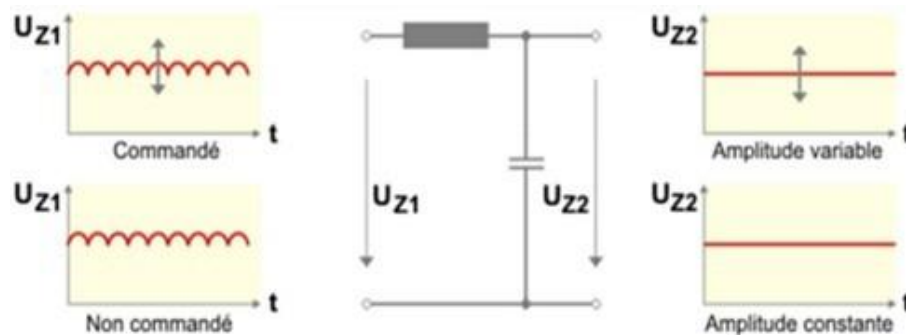


Fig 2.14: Circuit intermédiaire à tension continu constante ou variable

### • Le circuit intermédiaire à tension variable

À l'entrée du filtre, un hacheur, composé d'un transistor et d'une diode "roue libre", est ajouté. Dans ce cas, le circuit intermédiaire transforme la tension continue de sortie du redresseur, caractérisée par des ondulations résiduelles, en une tension carrée qui est ensuite lissée par le filtre. Cela aboutit à la création d'une tension variable, selon que le pilote du hacheur rend le transistor passant ou non.

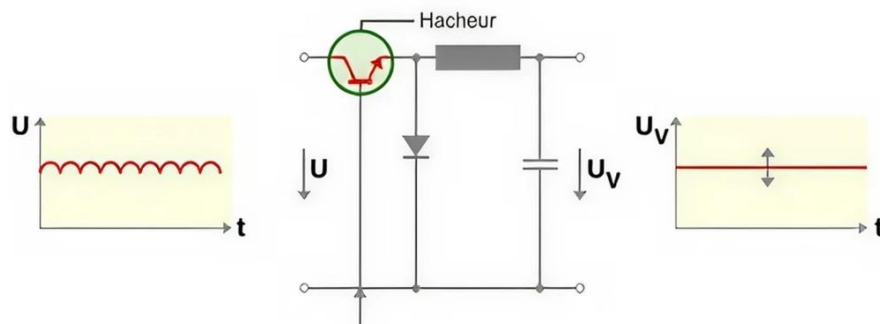


Fig 2.15: Circuit intermédiaire à tension variable

### 2.4.3 Les onduleurs

Les onduleurs sont des convertisseurs statiques continu-alternatif qui permettent de fabriquer une source de tension alternative à partir d'une source de tension continue.

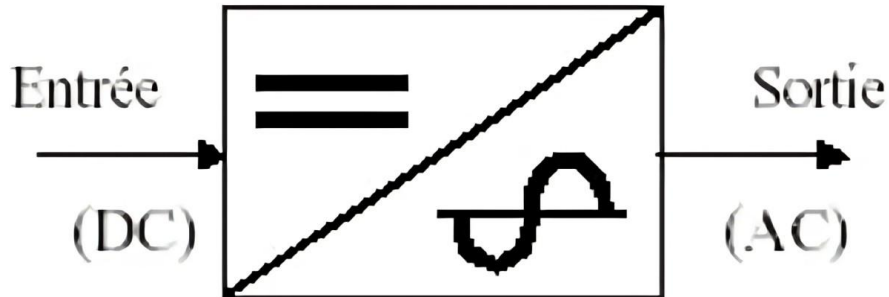


Fig 2.16: symboles des onduleurs

On distingue les onduleurs de tension et les onduleurs de courant, en fonction de la source d'entrée continue : source de tension ou source de courant. La technologie des onduleurs de tension est la plus maîtrisée et est présente dans la majorité des systèmes industriels, couvrant toutes les gammes de puissance, allant de quelques Watts à plusieurs MW [23].

## 2.5 Modulation de largeur d'impulsion MLI (PWM)

Cette technique est largement utilisée dans l'industrie. Le principe de cette technique est expliqué dans la figure 9. La comparaison d'une onde sinusoïdale de fréquence  $f_r$  et d'amplitude  $A_r$  (appelée onde de référence) avec une autre onde triangulaire de fréquence  $f_p$  bien supérieure à  $f_r$  et d'amplitude  $A_p$  permet de déterminer les points d'intersection qui définissent les instants de commutation des interrupteurs. Il en résulte un temps d'impulsion variable entre "passant" ou "non-passant", reconstituant un courant sinusoïdal en sortie du variateur de vitesse [13].

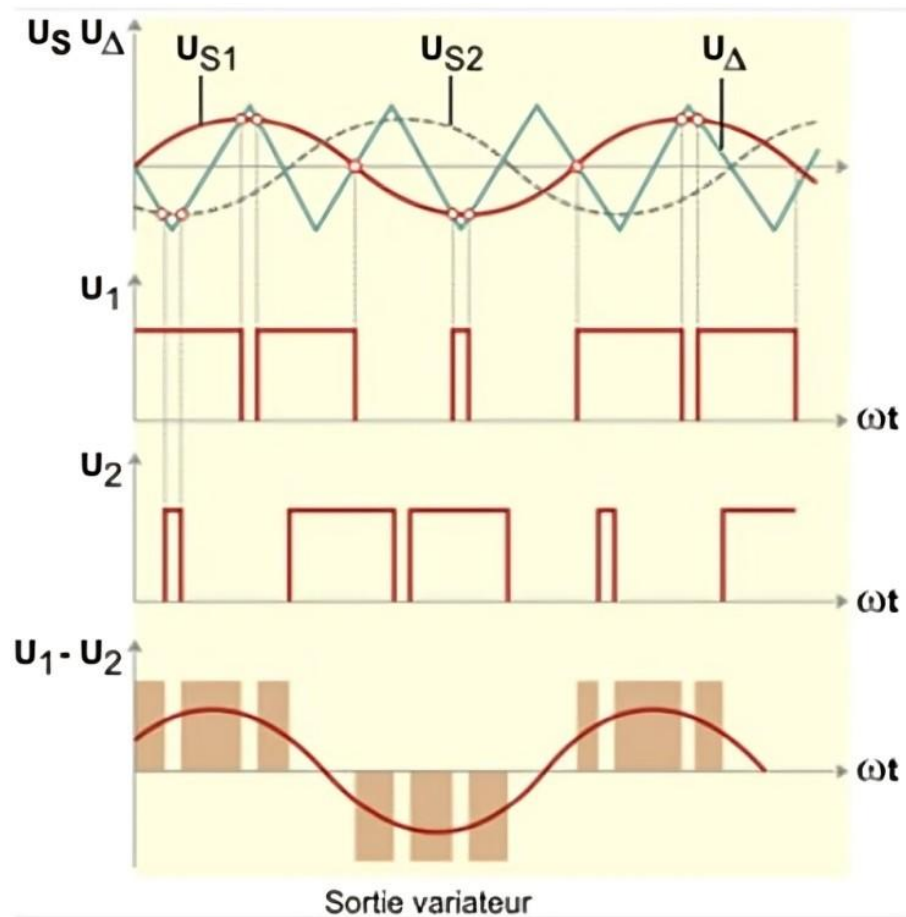


Fig 2.17: Principe PWM à commande par sinusoïde

## 2.6 Les avantages et Les inconvénients d'un variateur de vitesse

### 2.6.1 Les avantages d'un variateur de vitesse

Le recours aux variateurs de vitesse offre plusieurs avantages :

- Démarrage progressif des moteurs réduisant les chutes de tension dans le réseau et limitant les courants de démarrage.
- Amélioration du facteur de puissance.
- Précision accrue de la régulation de vitesse.
- Prolongement de la durée de service du matériel entraîné.
- Diminution de la consommation d'électricité. De nouveaux variateurs de vitesse plus performants peuvent éviter l'interruption des procédés en cas de perturbation du réseau de courte durée [25].

## 2.6.2 Les inconvénients d'un variateur de vitesse

- Tous les variateurs de vitesse intégrant des dispositifs de commutation (diodes, thyristors, IGBT, etc.) forment une charge non linéaire qui engendre des courants harmoniques, sources de distorsion de l'onde dans le réseau électrique.
- Cette dégradation de l'onde peut perturber les équipements électriques du client que ceux du réseau électrique ne mesure pas l'immunité.
- Par ailleurs, des résonances harmoniques peuvent également apparaître entre les variateurs de vitesse et les batteries de condensateurs.
- Les effets néfastes peuvent se manifester par la défaillance des équipements électriques (surchauffeurs moteurs, des câbles et des transformateurs), par la dégradation de l'isolation des moteurs commandés ou par l'interruption des procédés (fusibles grillés) [25].

## 2.7 Le circuit de commande

Le circuit de commande ne fait pas partie du circuit de puissance du variateur de vitesse, mais il joue un rôle essentiel dans quatre fonctions principales :

- Le pilotage des semi-conducteurs du variateur.
- L'échange d'informations de commande, de régulation et d'analyse avec les périphériques.
- Le contrôle et l'affichage des défauts.
- La protection du variateur et du moteur.

L'apparition des microprocesseurs a permis d'améliorer considérablement la rapidité d'exécution des ordres de commande et de régulation, surpassant les autres circuits comme l'onduleur ou le circuit intermédiaire.

Ainsi, le circuit de commande peut déterminer le schéma d'impulsions optimal des semi-conducteurs selon les conditions de fonctionnement du moteur (charge, réseau, consignes...).

La régulation de vitesse des moteurs triphasés à courant alternatif se base sur deux types de commande :

- La commande scalaire ( $U/f$ ).
- La commande vectorielle de flux (VVC : Voltage Vector Control).

Ces deux méthodes déterminent la manière de programmer les algorithmes de commande et de régulation des variateurs, chacune ayant ses avantages en fonction des exi-

gences spécifiques en couple, vitesse et précision [24].

### 2.7.1 La commande U/f = Cst (Scalaire)

La commande U/f se base sur la mesure de grandeurs scalaires (valeurs d'amplitude en tension et en fréquence). C'est le système de commande de base des variateurs de fréquence standards. La commande en U/f se justifie à partir du schéma équivalent classique de la machine asynchrone, La figure II.19 représente le schéma équivalent par phase d'une machine asynchrone. Le flux est créé par le courant circulant dans l'inductance magnétisante  $L_m$ . Les performances optimales du moteur sont obtenues si le flux, et donc le courant magnétisant, est maintenu sensiblement constant sur toute la gamme de vitesse. Le courant magnétisant peut être calculé par l'expression [24-26] :

$$I_d = \frac{E_s}{L_m * \omega} \quad (2.1)$$

Avec :

$$E_s = V_s - (R_s + L_s * \omega)I \quad (2.2)$$

En négligeant :

$$(R_s + L_s * \omega)I \quad (2.3)$$

On obtient :

$$I_d = \frac{V_s}{\omega} \frac{I}{L_m} = \frac{V_s}{f} \frac{I}{2\pi * L_m} \quad (2.4)$$

Le courant d'excitation du moteur peut être maintenu constant en conservant un rapport U/f constant. Cependant, lorsque la fréquence et la tension sont faibles, les termes internes du moteur comme  $(R_s + L_s)I$ , en particulier  $R_s$ , ne peuvent plus être négligés.

Dans ces conditions, pour maintenir un flux magnétique constant, le simple maintien du rapport U/f constant ne suffit plus, car le courant absorbé varie selon la charge du moteur [26].

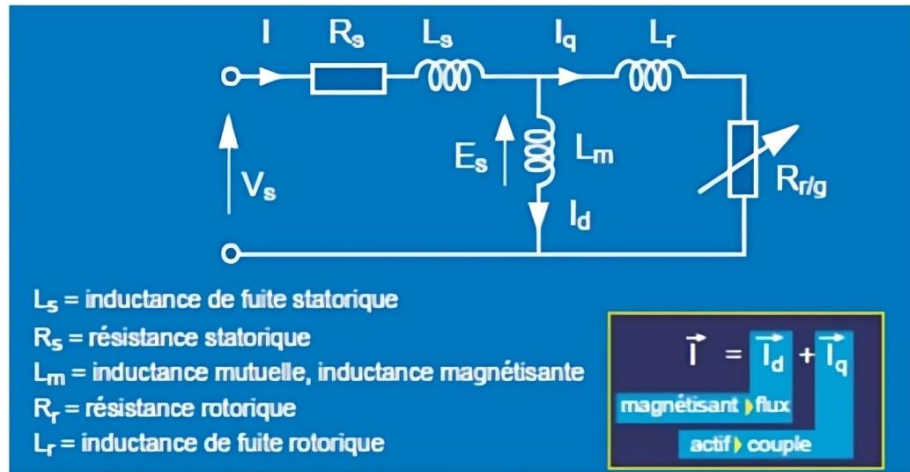


Fig 2.18: Le schéma équivalent du moteur asynchrone

La figure 2-19 montres les profils des courbes du couple en fonction de la vitesse pour différents rapports  $U/f$  :

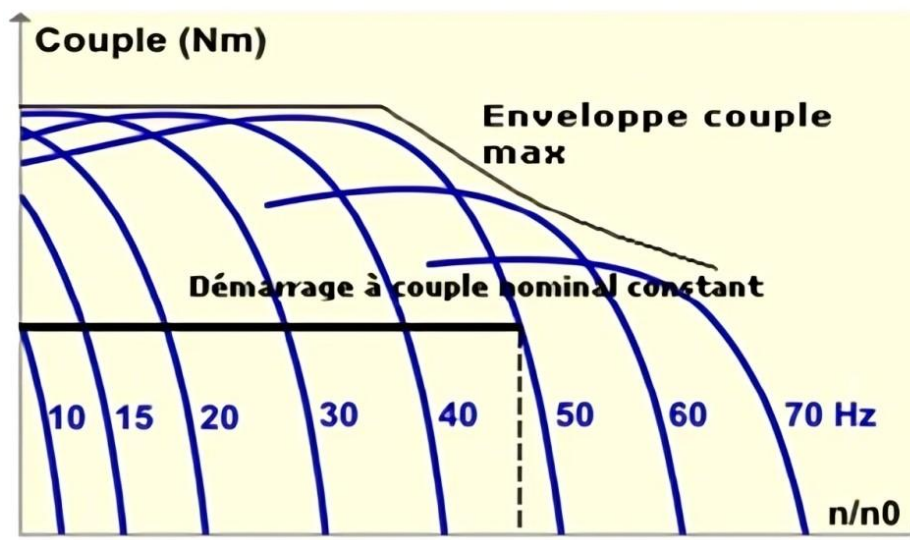


Fig 2.19: Fonctionnement à couple constant

## 2.7.2 La commande vectorielle de tension (ou de flux)

Ce type de commande nécessite une saisie précise des paramètres du moteur, notamment ceux indiqués sur la plaque signalétique. La commande vectorielle en tension repose sur le calcul de la magnétisation optimale du moteur en fonction de la charge, grâce à des paramètres de compensation pour contrôler le glissement et l'effort mécanique. Elle fonctionne avec les vecteurs de tension à vide et les vecteurs de compensation selon les variations de la charge.

La commande à champ orienté, quant à elle, se base sur les valeurs des courants actifs, du flux magnétisant et du couple électromagnétique. À l'aide d'un modèle mathématique adapté, elle permet de déterminer le couple nécessaire au moteur à partir des vecteurs de flux statorique et de courant rotorique, ce qui permet d'optimiser le champ magnétique et la vitesse du moteur en fonction des sollicitations [24-26].

## **2.8 Les avantages et Les inconvénients des La commande vectorielle de flux**

### **2.8.1 Les avantage**

- Bonne réaction aux variations de charge.
- Régulation précise de la vitesse.
- Couple intégral à vitesse nulle.
- Performance semblable aux entraînements à courant continu.
- Réaction rapide aux variations de vitesse et large plage de vitesses (1/100).
- Meilleure réaction dynamique aux variations de sens de rotation.
- Une seule stratégie de commande pour toute la plage de vitesse est nécessaire.

### **2.8.2 Les inconvénients**

- Nécessite de connaître les caractéristiques précises du moteur [24].

## **2.9 CONCLUSION**

Dans ce chapitre, nous avons étudié le variateur de vitesse. Premièrement, nous avons expliqué le principe de fonctionnement du variateur de vitesse ainsi que ses différents modes de fonctionnement. Deuxièmement, nous avons présenté le convertisseur statique, qui constitue un composant essentiel du variateur de vitesse. Enfin, nous avons abordé les différentes techniques de commande des variateurs de vitesse.

# *Résultats expérimentaux du diagnostic du défaut de cassure de barres rotoriques d'un MAS alimenté par un variateur de vitesse*

---

|        |                                                                                                       |    |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1    | Introduction .....                                                                                    | 51 |
| 3.2    | Définition.....                                                                                       | 51 |
| 3.2.1  | Norme ISO 20958-2015 .....                                                                            | 52 |
| 3.3    | Défauts Détectables par Analyse du Courant Statorique.....                                            | 52 |
| 3.4    | Causes de rupture de barres du rotor d'un moteur asynchrone .....                                     | 53 |
| 3.5    | Mesure pratique du courant statorique (MCSA).....                                                     | 55 |
| 3.6    | Etude de fonctionnement du moteur à l'état sain Signatures des harmoniques d'encoches rotoriques..... | 56 |
| 3.7    | Spectres du courant statorique avec barres cassées .....                                              | 58 |
| 3.8    | Estimation du nombre de barres cassée par un indicateur de sévérité .....                             | 59 |
| 3.9    | Facteur de correction pour estimer le fonctionnement à charge réduite .....                           | 59 |
| 3.10   | Paramètres influençant les bandes latérales.....                                                      | 60 |
| 3.11   | Calcul des fréquences latérales dues à la cassure de barres du rotor .....                            | 61 |
| 3.12   | Les Résultats obtenus dans l'état sain du MAS.....                                                    | 63 |
| 3.12.1 | Pour une fréquence $f_s=20\text{Hz}$ .....                                                            | 63 |
| 3.12.2 | Pour une fréquence $f_s=30\text{Hz}$ .....                                                            | 67 |
| 3.12.3 | Pour une fréquence $f_s=40\text{Hz}$ .....                                                            | 70 |
| 3.12.4 | Pour une fréquence $f_s=50\text{Hz}$ .....                                                            | 74 |
| 3.13   | Les Résultats obtenus dans l'état avec une barre cassée.....                                          | 78 |
| 3.13.1 | Pour une fréquence $f_s=30\text{Hz}$ .....                                                            | 78 |



|        |                                                                        |    |
|--------|------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.13.2 | Pour une fréquence $f_s=50\text{Hz}$ .....                             | 80 |
| 3.14   | Comparaison entre l'état sain et l'état avec une barre cassée .....    | 82 |
| 3.14.1 | Pour une fréquence $f_s=30\text{Hz}$ .....                             | 82 |
| 3.14.2 | Pour une fréquence $f_s=50\text{Hz}$ .....                             | 84 |
| 3.15   | Les résultats obtenus dans l'état avec deux barres cassées .....       | 86 |
| 3.15.1 | Pour une fréquence $f_s=30\text{Hz}$ .....                             | 86 |
| 3.15.2 | Pour une fréquence $f_s=20\text{Hz}$ .....                             | 88 |
| 3.16   | Comparaison entre l'état sain et l'état avec deux barres cassées ..... | 89 |
| 3.16.1 | Pour une fréquence $f_s=40\text{Hz}$ .....                             | 89 |
| 3.16.2 | Pour une fréquence $f_s=20\text{Hz}$ .....                             | 91 |
| 3.17   | Conclusion.....                                                        | 93 |

---

## 3.1 Introduction

L'analyse du courant statorique (MCSA) est une méthode de surveillance des moteurs électriques qui permet de détecter des défauts mécaniques ou électriques en étudiant les variations du courant absorbé. L'objectif est d'identifier précocement les anomalies pour éviter les pannes critiques.

## 3.2 Définition

L'Analyse Spectrale du Courant Statorique (Motor Current Signature Analysis-MCSA) constitue une méthode avancée de diagnostic des moteurs électriques asynchrones. Cette technique non intrusive repose sur l'examen des composantes fréquentielles du courant absorbé afin d'identifier des signatures caractéristiques associées à divers défauts mécaniques ou électriques.

### 3.2.1 Norme ISO 20958-2015

L'analyse du courant statorique via la Transformation de Fourier Rapide (FFT) est une méthode de référence pour le diagnostic des défauts dans les machines asynchrones. Cette approche repose sur la détection de composantes spectrales anormales dans le spectre fréquentiel du courant, révélatrices de défaillances mécaniques ou électriques.

La littérature technique recense les principaux défauts des machines asynchrones, leurs origines et leurs causes, tout en identifiant leurs signatures fréquentielles caractéristiques.

Parmi les méthodes de diagnostic, l'analyse du courant statorique (MCSA " Motor Current Signature Analysis") est largement utilisée en raison de ses avantages pratiques :

- Simplicité de mise en œuvre, ne nécessitant pas d'équipements complexes.
- Coût réduit, car exploitant des capteurs déjà installés dans les systèmes industriels.
- Diagnostic sans interruption de fonctionnement, favorisant la maintenance prédictive.

Cependant, pour garantir la fiabilité des résultats, les conditions de fonctionnement doivent rester stables pendant l'acquisition, notamment :

- Le couple mécanique (Torque).
- La fréquence d'alimentation (Frequency).
- La tension d'alimentation (Voltage).

## 3.3 Défauts Détectables par Analyse du Courant Statorique

Cette méthode permet d'identifier plusieurs anomalies, dont :

- Des fissures dans les barres du rotor.
- Des défauts de coulée du rotor.
- Les ruptures des anneaux court-circuités.
- Des fissures dans les anneaux du rotor.
- Augmentation de l'excentricité de l'entrefer.
- Des dommages dans les roulements.
- Court-circuit inter-enroulements dans l'enroulement du stator.

### 3.4 Causes de rupture de barres du rotor d'un moteur asynchrone

- Défauts de fabrication.
- Contraintes thermiques.
- Contrainte mécanique causée par des défauts de palier.
- Démarrages fréquents du moteur à la tension nominale.
- Fatigue du matériau de la barre du rotor [02].



Fig 3.1: Rotors du moteur asynchrone à l'état sain

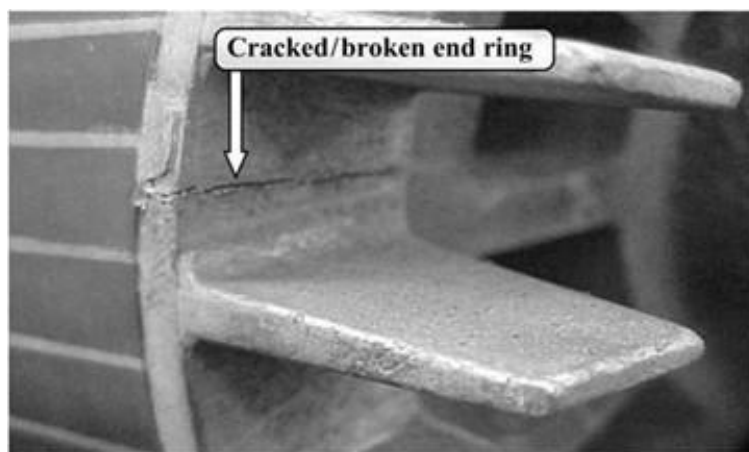


Fig 3.2: Fissures dans un anneau de court-circuit du rotor



Fig 3.3: Fissure dans un joint entre la barre et l'anneau de court-circuit

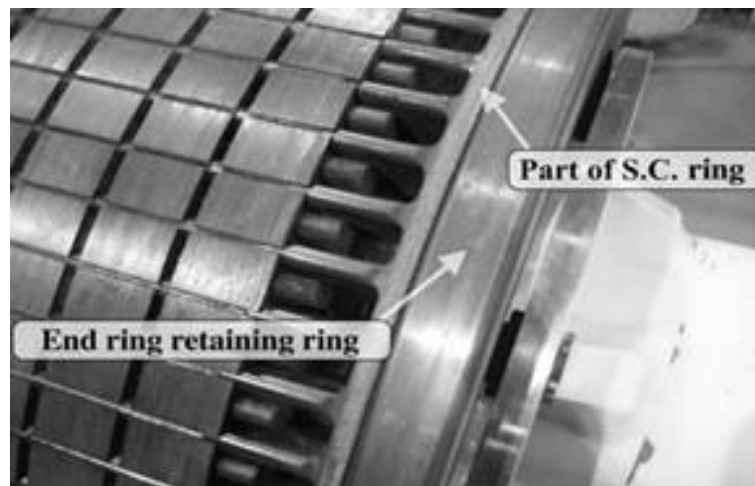


Fig 3.4: short-Circuit Ring

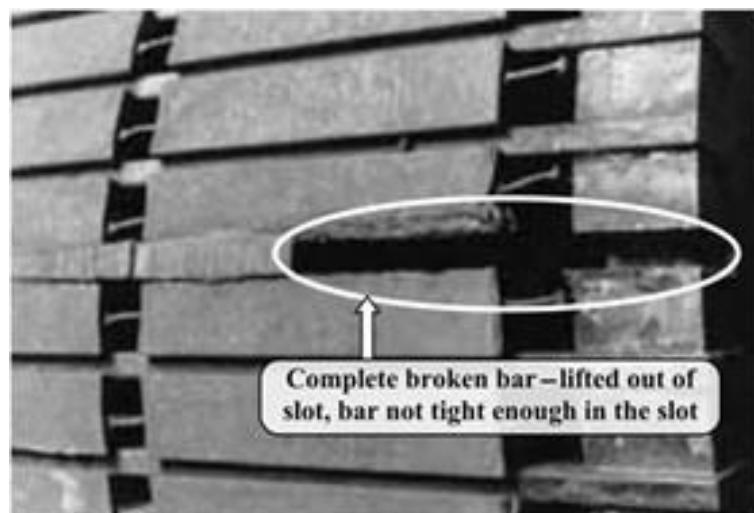


Fig 3.5: complete broken bar-lifted out of slot, bar not tight enough in the slot

### 3.5 Mesure pratique du courant statorique (MCSA)

Surveillance du Courant Statorique par Analyse MCSA :

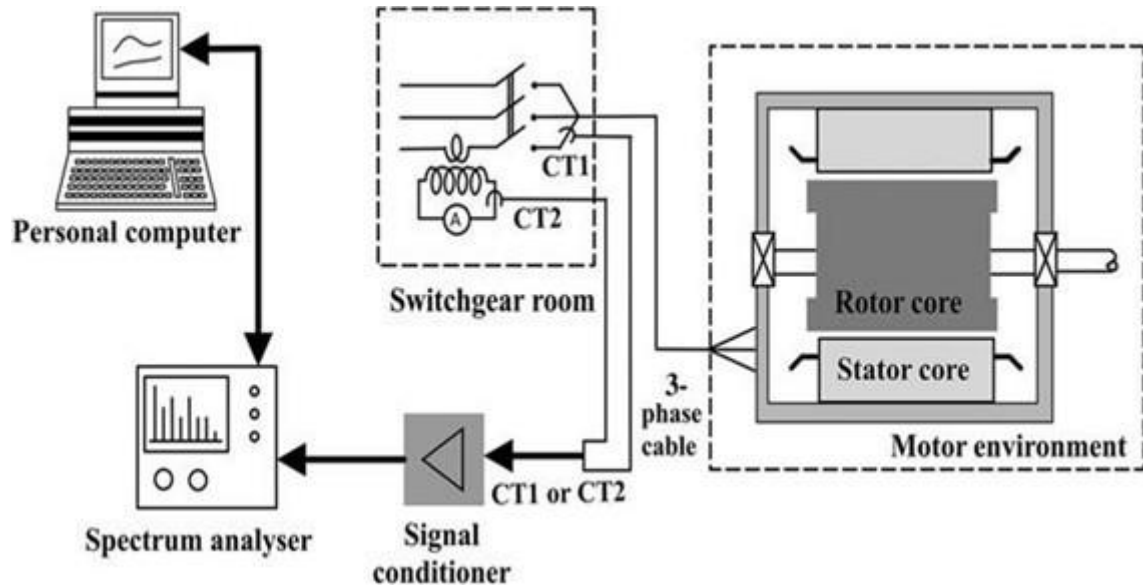


Fig 3.6: Surveillance du Courant Statorique par Analyse MCSA



Fig 3.7: Current sensors

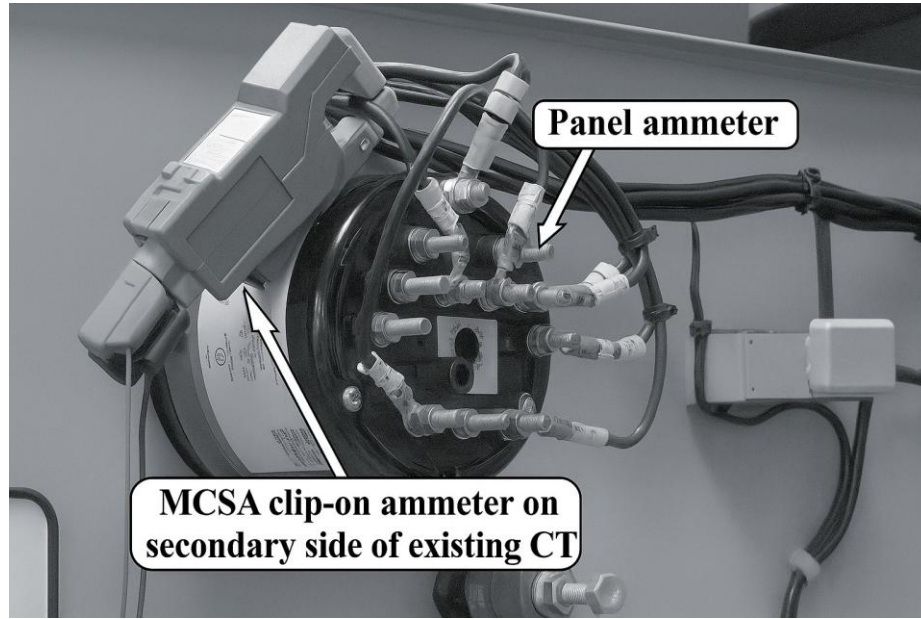


Fig 3.8: Surveillance du courant statorique par la méthode MCSA à l'aide d'un ampèremètre à pince sur le secondaire du TC

### 3.6 Etude de fonctionnement du moteur à l'état sain

#### Signatures des harmoniques d'encoches rotoriques

L'induction magnétique dans l'entrefer n'est pas parfaitement sinusoïdale. Elle dépend de plusieurs paramètres, tels que la configuration des enroulements statoriques et la géométrie de la cage rotorique pour les moteurs à cage. En raison de cette structure, il a été prouvé que, outre l'harmonique fondamental, le spectre du courant statorique présente également des harmoniques dites d'encoches rotoriques (RSH), dont les fréquences sont données par :

$$f_{RSH} = \left| \left( v \pm \frac{KNr}{p} (1-g) \right) f_s \right| p \quad (3.1)$$

Avec :

$f_s$  La fréquence de la tension d'alimentation

$v$  L'ordre des harmoniques de temps de la tension

$k$  Un entier positif

$p$  Le nombre de paires de pôles

$Nr$  le nombre de barres rotoriques

$g$  glissement Pour  $k = 1$  et  $v = 1$  on définit ce qui sont appelés l'harmoniques d'encoches principales (PSH).

- **Harmoniques de cassures de barres rotoriques dans le spectrale du courant statorique**

Puisque les allures temporelles ne donnent pas beaucoup d'informations, on est obligé d'aller vers les méthodes de traitement de signal.

Pour un défaut de cassure de barres rotoriques, il y aura de nouveaux harmoniques dans les courants statoriques aux fréquences :

$$f_{bc} = (1 \pm 2kg)fs \quad (3.2)$$

- **Explication**

Un défaut dans le rotor va engendrer une sorte d'asymétrie qui, dans le cas d'une alimentation par un système de tensions triphasé symétrique, va être à l'origine d'un champ magnétique tournant inverse de fréquence ( $-gf$ ) dans le circuit rotorique. Cela va engendrer des courants circulant dans le circuit statorique à une fréquence :

$$f_{g, bc} = (1 - 2g)f \quad (3.3)$$

Cette fréquence provoque une modulation du courant, ce qui provoque des oscillations du couple donnant des fluctuations de la vitesse. Alors une autre composante apparaît aussi dans le spectre du courant statorique à une fréquence :

$$f_{d, bc} = (1 + 2g)f \quad (3.4)$$

Il a été démontré qu'un processus répétitif donne naissance à une série d'harmoniques dont les fréquences sont données par :

$$f_{bc} = (1 \pm 2kg)fs \quad (3.5)$$

### 3.7 Spectres du courant statorique avec barres cassées

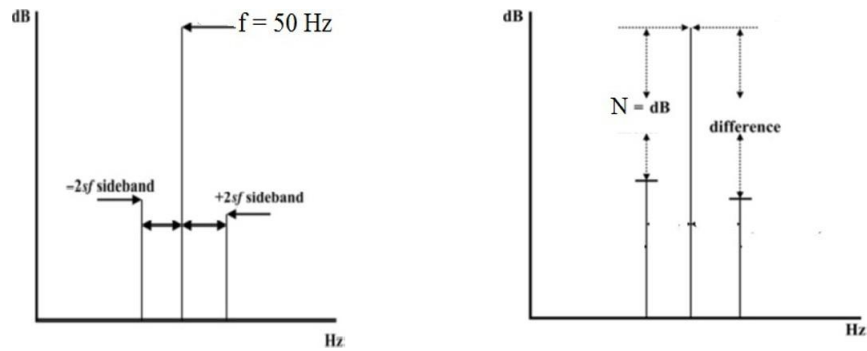


Fig 3.9: Représentation théorique de Spectres du courant statorique

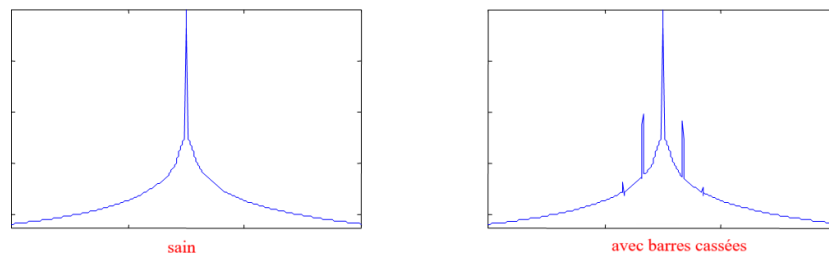


Fig 3.10: Spectres du courant statorique de l'état sain et l'état avec barres cassées

| Différence en amplitude N (dB) | Condition du rotor(100%de la charge nominale)                                |
|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| >60                            | Excellent                                                                    |
| 54 – 60                        | Bon                                                                          |
| 48 – 54                        | Modérée                                                                      |
| 42 – 48                        | Fissure de barre peut être en développement ou des joints à haute résistance |
| 36 – 42                        | Deux barres peuvent être fissurées ou des joints à haute résistance          |



|         |                                                                      |
|---------|----------------------------------------------------------------------|
| 30 – 36 | Plusieurs barres fendues ou ouvertes ou bagues d'extrémité probables |
| <30     | Plusieurs barres cassées et / ou anneaux fin très probable           |

Table 3.1: Évaluation de l'état du rotor en fonction de la différence d'amplitude N(dB)

Avec :

$$N(db) = 20 \log(I_{nom}/I_{gaoche}) \quad (3.6)$$

### 3.8 Estimation du nombre de barres cassée par un indicateur de sévérité

Basé sur l'application de MCSA à des milliers de moteurs asynchrone, on utilise un facteur de barre de rotor cassé équivalent BBf :

$$BBf = 2Nr/10 \quad (3.7)$$

Avec :

$N$  Différence d'amplitude entre l'harmonique fondamentale et  $(1-2g)fs$  (dB)

$p$  Le nombre de paires de pôles

$Nr$  Le nombre de barres rotoriques. Si  $BBf \geq 0.5$  il y a possibilité de barres cassées

### 3.9 Facteur de correction pour estimer le fonctionnement à charge réduite

La majorité des moteurs asynchrones dans l'industrie fonctionnent à un niveau inférieur à la pleine charge nominale (courant, puissance, couple). Quand une mesure de la bande latérale inférieure  $(1-2g)fs$  en ampères (ILSB) est faite à charge réduite pour un glissement actuel  $go$ , la grandeur (ILSBr) de la bande latérale inférieure se référant à la

pleine charge pour un glissement nominale ( $gnom$ ) est donné par :

$$ILSBr = ILSB \times BBc \quad (3.8)$$

Avec :

$$BBc = (gnom/go) \quad (3.9)$$

On aura une nouvelle valeur de  $Nc$  : Différence d'amplitude corrigée entre l'harmonique fondamentale et l'harmonique  $(1-2g)fs(dB)$ .

Un facteur de correction  $BBc$  est proposé, qui peut être appliqué pour compenser l'estimation de  $BBfr$  à charge réduite et se référer à la charge nominale pour obtenir  $BBf$ .

### 3.10 Paramètres influençant les bandes latérales

Les grandeurs des bandes latérales  $\pm 2sf$  sont fonction de nombreuses facteurs :

- Type et gravité des défauts d'enroulement de la cage.
- Conception de la cage du rotor.
- Nombre de barres de rotor.
- Nombre de pôle.
- L'inertie du rotor et l'oscillation de la vitesse du rotor à  $2sf$  due à la rupture des barres, ce qui affecte l'ampleur de la bande latérale supérieure  $+2sf$  et peut réduire l'amplitude de la bande latérale inférieure  $-2sf$ .

### 3.11 Calcul des fréquences latérales dues à la cassure de barres du rotor

| Désignation                        | Formule                                         | Valeur (Hz)     |
|------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------|
| Fréquence d'alimentation ( $f_s$ ) |                                                 | 50              |
| Fréquence latérale inférieure      | $f_s(1 - 2s) = 50 \times (1 - 2 \times 0,0467)$ | $\approx 45,33$ |
| Fréquence latérale supérieure      | $f_s(1 + 2s) = 50 \times (1 + 2 \times 0,0467)$ | $\approx 54,67$ |

Table 3.2: Les fréquences latérales dues à une cassure de barres rotorique pour 50Hz

| Paramètre                              | Valeur     |
|----------------------------------------|------------|
| Puissance nominale                     | 1kW        |
| Tension d'alimentation                 | 220/380V   |
| Fréquence d'alimentation               | 50Hz       |
| Nombre de paires de pôles              | 2          |
| Vitesse synchrone ( $n_s$ )            | 1500tr/min |
| Vitesse nominale ( $n_r$ )             | 1430tr/min |
| Glissement ( $s = (n_s - n_r) / n_s$ ) | 0,0467     |

Table 3.3: Paramètres du moteur utilisé

**Remarque :** Les fréquences latérales autour de 50Hz sont caractéristiques d'un défaut de type cassure de barres du rotor. L'apparition de pics aux alentours de 43,9Hz et

56,2Hz (comme observé sur la figure) confirme la présence de ce type de défaut, en raison de l'effet du glissement et des interactions électromagnétiques dans le rotor.

| Désignation                        | Formule                                         | Valeur (Hz)     |
|------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------|
| Fréquence d'alimentation ( $f_s$ ) |                                                 | 40              |
| Fréquence latérale inférieure      | $f_s(1 - 2s) = 40 \times (1 - 2 \times 0,0467)$ | $\approx 36,26$ |
| Fréquence latérale supérieure      | $f_s(1 + 2s) = 40 \times (1 + 2 \times 0,0467)$ | $\approx 43,74$ |

Table 3.4: Les fréquences latérales pour  $f_s = 40\text{Hz}$

**Remarque :** Lorsque le moteur asynchrone est alimenté par un variateur de fréquence avec  $f_s = 40\text{Hz}$ , les fréquences latérales liées à une cassure de barres du rotor se déplacent autour de cette nouvelle fréquence d'alimentation. Elles sont directement influencées par le glissement ( $s$ ) selon la formule  $f_s(1 \pm 2s)$ .

| Désignation                        | Formule                                         | Valeur (Hz)     |
|------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------|
| Fréquence d'alimentation ( $f_s$ ) |                                                 | 30              |
| Fréquence latérale inférieure      | $f_s(1 - 2s) = 30 \times (1 - 2 \times 0,0467)$ | $\approx 27,20$ |
| Fréquence latérale supérieure      | $f_s(1 + 2s) = 30 \times (1 + 2 \times 0,0467)$ | $\approx 32,80$ |

Table 3.5: Les fréquences latérales pour  $f_s = 30\text{ Hz}$

**Remarque :** Lorsque le moteur est alimenté à  $f_s = 30\text{Hz}$ , les fréquences latérales associées à un défaut de type cassure de barres se situent autour de cette fréquence, suivant la relation  $f_s(1 \pm 2s)$ , avec  $s = 0,0467$ .

| Désignation                        | Formule                                         | Valeur (Hz)     |
|------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------|
| Fréquence d'alimentation ( $f_s$ ) |                                                 | 20              |
| Fréquence latérale inférieure      | $f_s(1 - 2s) = 20 \times (1 - 2 \times 0,0467)$ | $\approx 18,13$ |
| Fréquence latérale supérieure      | $f_s(1 + 2s) = 20 \times (1 + 2 \times 0,0467)$ | $\approx 21,87$ |

Table 3.6: Les fréquences latérales pour  $f_s = 20$  Hz

**Remarque :** Lorsque le moteur est alimenté à  $f_s = 20$ Hz, les fréquences latérales liées à un défaut de type cassure de barres se trouvent autour de cette fréquence, calculées par  $f_s(1 \pm 2s)$ , avec  $s = 0,0467$ .

## 3.12 Les Résultats obtenus dans l'état sain du MAS

### 3.12.1 Pour une fréquence $f_s=20$ Hz

#### 3.12.1.1 À vide

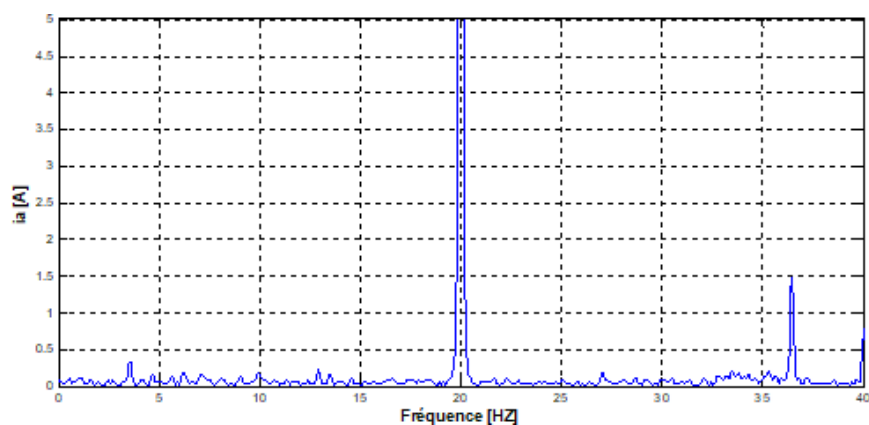


Fig 3.11: Spectres du courant statorique  $i_a$  du moteur sain sous alimenté par le Convertisseur avec une fréquence de 20Hz, à vide

- **Interprétation**

La figure représente l'analyse spectrale phase-courant (FFT) d'un moteur asynchrone en fonctionnement normal. Un pic principal très prononcé est observé à 20Hz, ce qui correspond à la fréquence d'alimentation du moteur, fournie par un variateur de vitesse (onduleur). L'absence de bandes latérales autour de cette fréquence fondamentale indique que le rotor est exempt de défauts, comme un arbre cassé. On observe également des harmoniques secondaires à 35-38Hz, qui pourraient être liées à des effets de contrôle du moteur ou à des composants naturels du système. Ce spectre confirme que le moteur fonctionne en conditions normales et souligne l'importance de l'analyse FFT pour surveiller les performances du moteur sans intervention mécanique.

### 3.12.1.2 Charge $C_r = 1.6Nm$

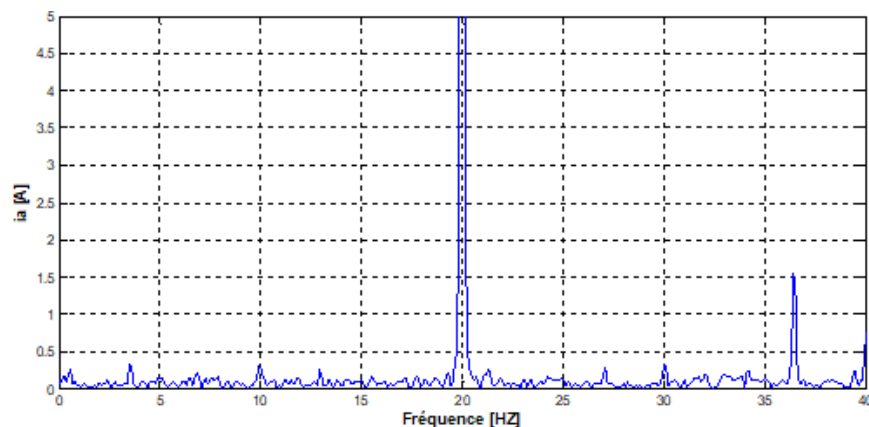


Fig 3.12: Spectres du courant statorique  $i_a$  du moteur sain sous alimenté par le Convertisseur avec une fréquence de 20Hz, la charge  $C_r=1.6Nm$

- **Interprétation**

La figure ci-dessus montre le spectre de fréquence (FFT) du courant de phase d'un moteur asynchrone alimenté par un onduleur, fonctionnant sous une charge mécanique de 1,6Nm. On observe un pic fondamental très prononcé autour de 20Hz, ce qui correspond à la fréquence de sortie de l'onduleur à ce niveau de charge. L'absence de bandes latérales significatives autour de cette fréquence indique que le rotor est en bon état, sans défauts tels que des barres cassées. En outre, des composantes harmoniques apparaissent autour de 35-38Hz, probablement dues aux effets de commutation du variateur ou aux interactions non linéaires entre l'onduleur et le moteur. Ce résultat confirme que, même sous une

charge modérée, l'analyse FFT permet une évaluation fiable de l'état de santé du moteur, et que le fonctionnement reste stable et sain.

### 3.12.1.3 Charge $C_r = 6.6\text{Nm}$

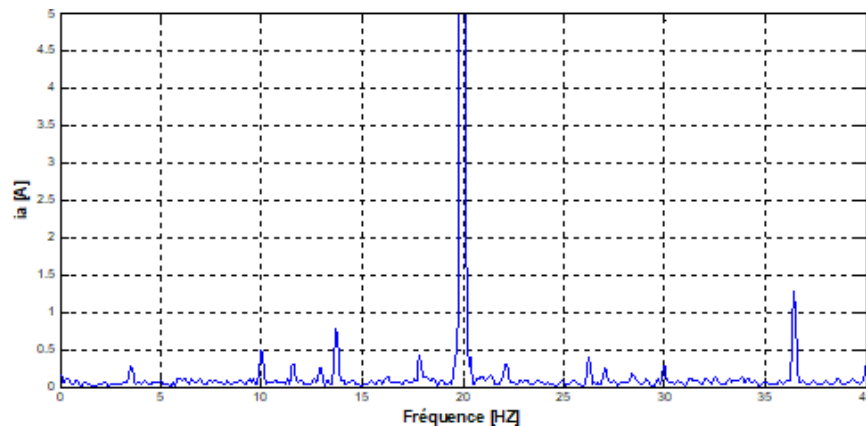


Fig 3.13: Spectres du courant statorique  $i_a$  du moteur sain sous alimenté par le Convertisseur avec une fréquence de 20Hz, la charge  $C_r=6.6\text{Nm}$

#### • Interprétation

La figure présente une analyse par transformée de Fourier rapide (FFT) du courant de phase d'un moteur asynchrone entraîné par onduleur et soumis à une charge mécanique de 6,6Nm. Le spectre présente un pic principal très net à environ 20Hz, correspondant à la fréquence d'alimentation de l'onduleur. L'absence de bandes latérales prononcées autour de cette fréquence fondamentale indique que le rotor est en bon état et ne présente aucun défaut structural tel que des tiges cassées. Cependant, une intensification relative de certaines composantes harmoniques est observée, notamment à 35Hz, ce qui peut être attribué à l'augmentation de la charge mécanique. En effet, des charges plus élevées entraînent généralement des courants et des interactions électromagnétiques plus importants dans le moteur, ce qui peut entraîner une augmentation des harmoniques. Cette observation souligne l'importance de l'analyse spectrale pour surveiller l'effet de la charge sur le comportement dynamique d'un moteur tout en garantissant son bon fonctionnement.

#### 3.12.1.4 Comparaison

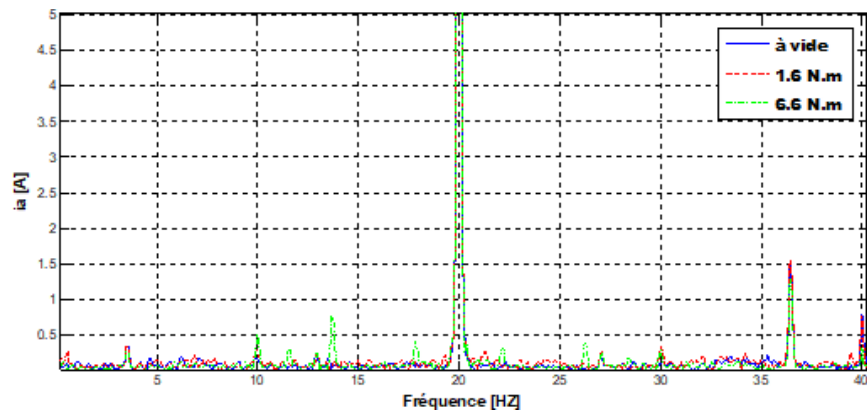


Fig 3.14: Spectres du courant statorique  $i_a$  du moteur sain sous alimenté par le Convertisseur avec une fréquence de 20Hz, la charge à vide ,  $C_r=1.6\text{N.m}$  ,  $C_r= 6.6\text{N.m}$

#### • Interprétation

L'analyse des signaux sous l'effet de l'augmentation de la charge a révélé de légères hausses d'amplitude des vibrations, toutefois ces variations restent dans des limites acceptables et ne suggèrent aucun défaut mécanique apparent. De plus, l'analyse spectrale confirme le bon état du moteur, sans présence d'indications de rupture des barres du rotor, ce qui témoigne d'un fonctionnement normal et d'une bonne santé globale de la machine.



### 3.12.2 Pour une fréquence $f_s=30\text{Hz}$

#### 3.12.2.1 À vide

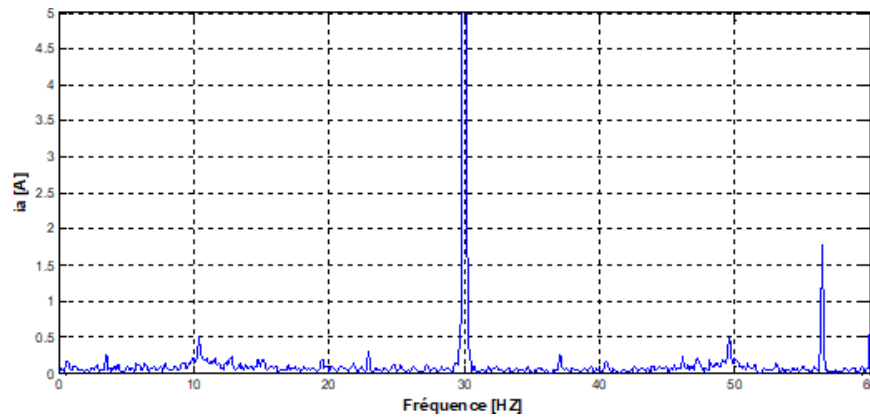


Fig 3.15: Spectres du courant statorique  $i_a$  du moteur sain sous alimenté par le Convertisseur avec une fréquence de 30Hz, à vide

- **Interprétation**

La figure montre l'analyse spectrale (FFT) du courant de phase d'un moteur asynchrone alimenté par un onduleur, fonctionnant à vide (sans charge mécanique). Le spectre présente un pic fondamental marqué à environ 30Hz, correspondant à la fréquence d'alimentation du moteur. En l'absence de charge, les composantes harmoniques restent faibles, et aucune bande latérale significative n'est observée autour de la fréquence fondamentale, ce qui confirme l'absence de défauts tels que des barres cassées dans le rotor. On note tout de même la présence de pics harmoniques plus élevés aux alentours de 56 Hz, généralement liés aux effets de modulation du signal par l'onduleur. Cette configuration met en évidence le bon état du moteur à vide, et démontre l'utilité de l'analyse FFT pour caractériser le comportement électrique du moteur même en l'absence de sollicitation mécanique.

### 3.12.2.2 Charge $C_r = 3.6\text{Nm}$

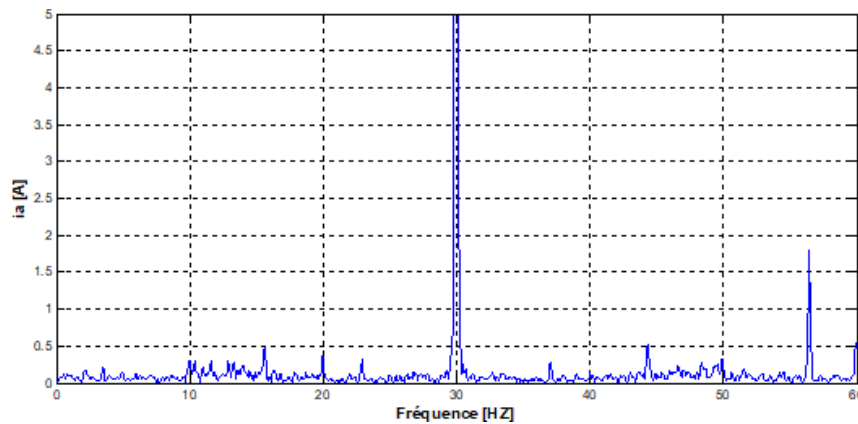


Fig 3.16: Spectres du courant statorique  $i_a$  du moteur sain sous alimenté par le Convertisseur avec une fréquence de 30Hz, la charge  $C_r=3.6\text{Nm}$

- **Interprétation**

La figure présente le spectre de fréquence (FFT) du courant de phase d'un moteur asynchrone alimenté par un onduleur et soumis à une charge mécanique de 3,6Nm. Le pic fondamental apparaît à environ 30Hz, correspondant à la fréquence de sortie de l'onduleur. Aucun signe clair de défaut n'est observé autour de cette fréquence, en particulier l'absence de bandes latérales, ce qui indique que le rotor est en bon état (aucune cassure de barre détectée). Des composantes harmoniques apparaissent, notamment vers 56Hz, ce qui peut être lié à la commutation de l'onduleur ou à l'influence de la charge sur les régimes transitoires du moteur. L'analyse FFT montre ici que le moteur fonctionne de manière stable sous une charge modérée, et confirme l'efficacité de cette méthode pour le diagnostic non intrusif de l'état du moteur.

### 3.12.2.3 Charge $C_r = 6.6\text{Nm}$

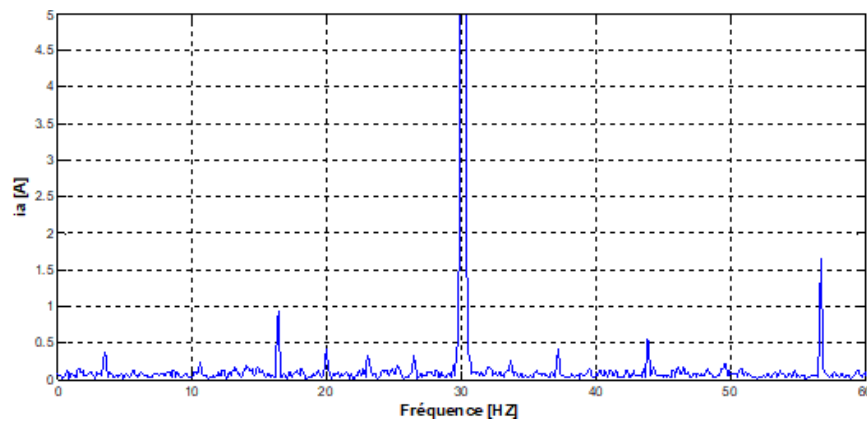


Fig 3.17: Spectres du courant statorique  $i_a$  du moteur sain sous alimenté par le Convertisseur avec une fréquence de 30Hz, la charge  $C_r=6.6\text{Nm}$

#### • Interprétation

La figure illustre le spectre de fréquence (FFT) du courant de phase d'un moteur asynchrone alimenté par un onduleur et soumis à une charge mécanique élevée de 6,6Nm. Le pic fondamental est clairement visible autour de 30Hz, correspondant à la fréquence de commande de l'onduleur. Comme dans les cas précédents, aucune bande latérale significative n'apparaît autour de cette fréquence, ce qui confirme l'absence de défauts de type rupture de barre dans le rotor. Cependant, on constate une amplification des composantes harmoniques, notamment vers 16Hz et 56Hz, ce qui est probablement dû à l'effet combiné d'une charge élevée et des commutations rapides de l'onduleur. L'augmentation de la charge peut intensifier les perturbations électromagnétiques dans le moteur, ce qui se traduit par une présence accrue d'harmoniques. Ces résultats valident le bon fonctionnement du moteur malgré la charge importante, et confirment l'utilité de l'analyse FFT pour détecter d'éventuelles anomalies ou surveiller les effets dynamiques de la charge.

### 3.12.2.4 Comparaison

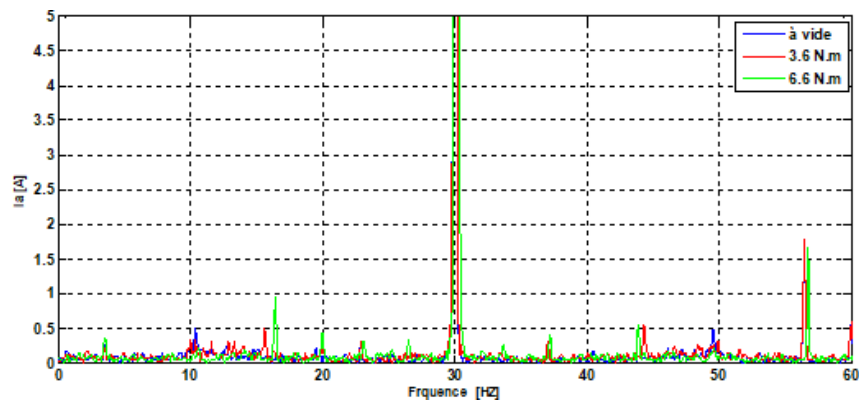


Fig 3.18: Spectres du courant statorique  $i_a$  du moteur sain sous alimenté par le Convertisseur avec une fréquence de 30Hz, la charge à vide,  $C_r=1.6 \text{ Nm}$ ,  $C_r= 6.6 \text{ Nm}$

#### • Interprétation

L'analyse des signaux sous l'effet de l'augmentation de la charge a révélé de légères hausses d'amplitude des vibrations, toutefois ces variations restent dans des limites acceptables et ne suggèrent aucun défaut mécanique apparent. De plus, l'analyse spectrale confirme le bon état du moteur, sans présence d'indications de rupture des barres du rotor, ce qui témoigne d'un fonctionnement normal et d'une bonne santé globale de la machine.

### 3.12.3 Pour une fréquence $f_s=40\text{Hz}$

#### 3.12.3.1 À vide

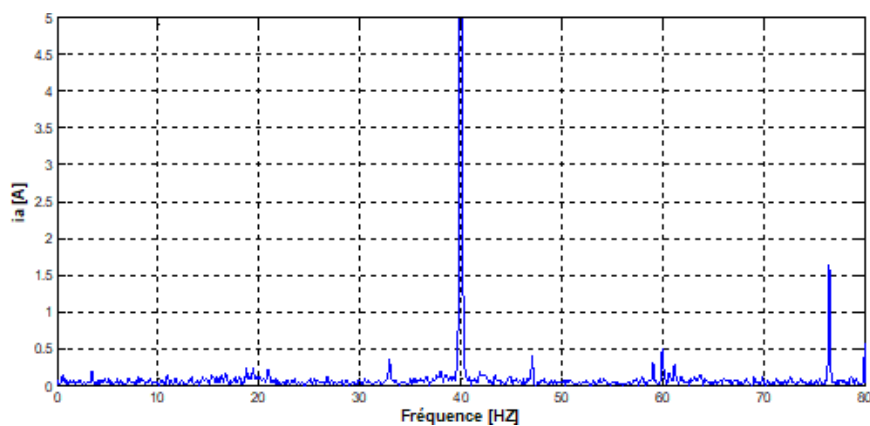


Fig 3.19: Spectres du courant statorique  $i_a$  du moteur sain sous alimenté par le Convertisseur avec une fréquence de 40Hz

- **Interprétation**

La figure représente l'analyse spectrale (FFT) du courant de phase d'un moteur asynchrone alimenté par un onduleur à une fréquence de 40Hz, en fonctionnement à vide (sans charge mécanique). Le spectre présente un pic fondamental bien défini à 40Hz, correspondant à la fréquence de sortie du variateur. Aucune bande latérale notable n'est visible autour de ce pic, ce qui confirme l'absence de défauts mécaniques tels que des barres cassées dans le rotor. Quelques composantes harmoniques secondaires sont visibles, notamment vers 76Hz, probablement générées par les effets de commutation du convertisseur. En l'absence de couple résistant, le courant est relativement faible et stable, et le spectre reste propre, ce qui reflète un fonctionnement sain du moteur. Ce type d'analyse est utile pour établir une signature de référence du moteur en bon état, à comparer avec des cas sous charge ou en présence de défauts.

### 3.12.3.2 Charge $C_r = 1.6Nm$

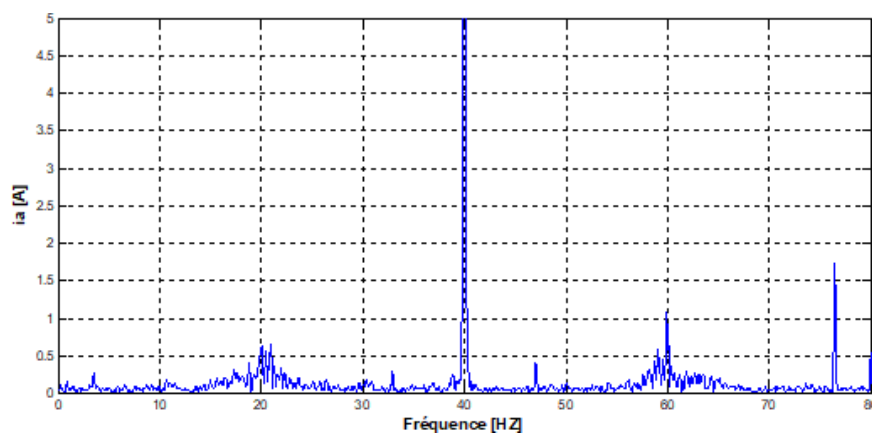


Fig 3.20: Spectres du courant statorique  $i_a$  du moteur sain sous alimenté par le Convertisseur avec une fréquence de 40Hz, la charge  $C_r=1.6Nm$

- **Interprétation**

La figure montre le spectre de fréquence (FFT) du courant de phase d'un moteur asynchrone alimenté par un onduleur à 40Hz, sous une charge mécanique de 1,6Nm. Le pic principal du spectre apparaît clairement à 40Hz, ce qui confirme la fréquence de commande de l'onduleur. Par rapport au fonctionnement à vide, on observe une augmentation de l'énergie dans certaines composantes harmoniques, notamment aux alentours de 20Hz, 60Hz et 76Hz. Ces composantes supplémentaires peuvent être dues à l'effet de la

charge sur la dynamique du moteur, ainsi qu'à l'interaction entre le champ tournant et les éléments non idéaux du système. L'absence de bandes latérales significatives autour de la fréquence fondamentale indique que le rotor ne présente pas de défauts structuraux, et que le moteur fonctionne de manière saine sous cette charge modérée. Ce type d'analyse permet d'évaluer avec précision l'effet de la charge sur le comportement électrique du moteur.

### 3.12.3.3 Charge $C_r = 3.6\text{Nm}$

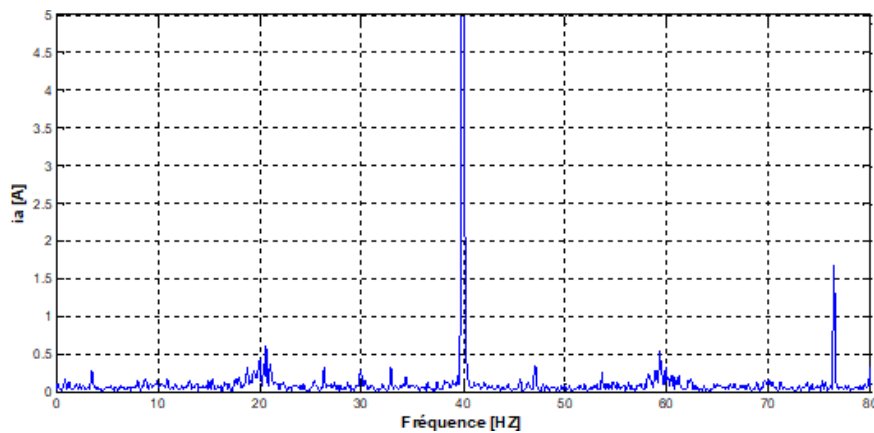


Fig 3.21: Spectres du courant statorique  $i_a$  du moteur sain sous alimenté par le Convertisseur avec une fréquence de 40Hz, la charge  $C_r=3.6\text{Nm}$

- **Interprétation**

La figure présente le spectre de fréquence (FFT) du courant de phase d'un moteur asynchrone alimenté par un onduleur à 40Hz, sous une charge mécanique de 3,6Nm. Le pic fondamental apparaît de manière nette à 40Hz, ce qui reflète la fréquence de commande imposée par l'onduleur. On note également l'apparition de composantes harmoniques secondaires, en particulier autour de 20Hz, 60Hz et 76Hz. Ces harmoniques peuvent être attribuées à l'augmentation de la charge qui intensifie les interactions électromagnétiques internes du moteur. Malgré cela, l'absence de bandes latérales caractéristiques de défauts rotorique indique que le moteur reste en bon état. Cette analyse démontre que, même sous une charge plus importante, le moteur fonctionne de façon stable, et que l'analyse FFT reste un outil fiable pour le suivi de son état de santé.

### 3.12.3.4 Comparaison

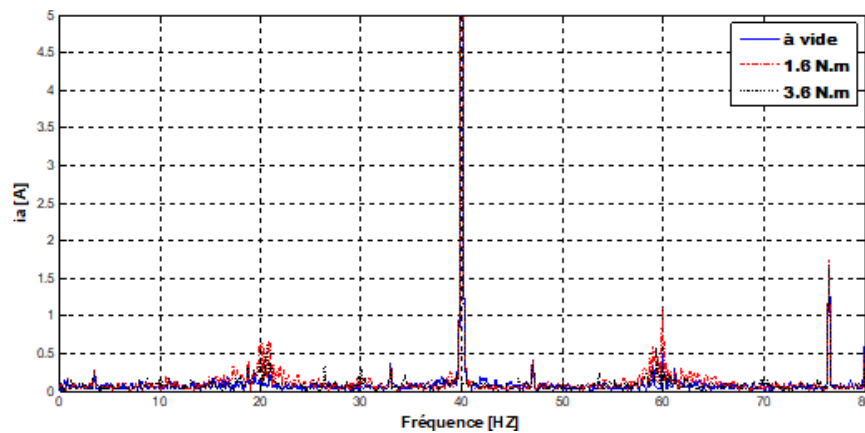


Fig 3.22: Spectres du courant statorique  $i_a$  du moteur sain sous alimenté par le Convertisseur avec une fréquence de 40Hz, la charge à vide,  $C_r=1.6\text{Nm}$ ,  $C_r= 3.6\text{N.m}$

- **Interprétation**

L'analyse des signaux sous l'effet de l'augmentation de la charge a révélé de légères hausses d'amplitude des vibrations, toutefois ces variations restent dans des limites acceptables et ne suggèrent aucun défaut mécanique apparent. De plus, l'analyse spectrale confirme le bon état du moteur, sans présence d'indications de rupture des barres du rotor, ce qui témoigne d'un fonctionnement normal et d'une bonne santé globale de la machine.

### 3.12.4 Pour une fréquence $f_s=50\text{Hz}$

#### 3.12.4.1 À vide

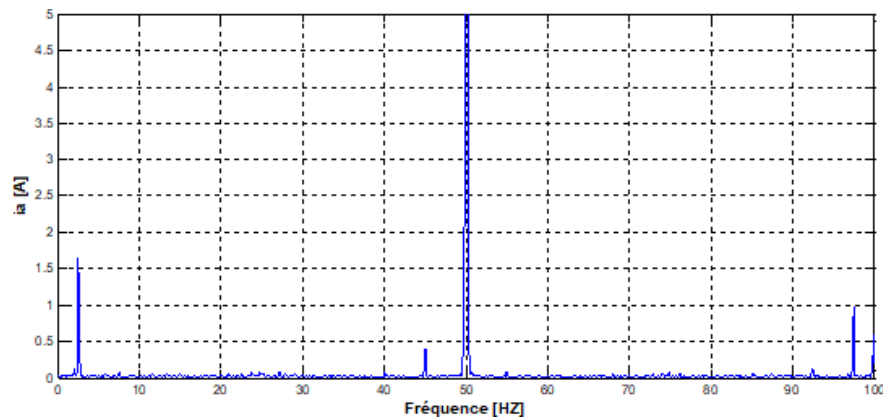


Fig 3.23: Spectres du courant statorique  $i_a$  du moteur sain sous alimenté par le Convertisseur avec une fréquence de 50Hz

#### • Interprétation

La figure montre le spectre de fréquence (FFT) du courant de phase d'un moteur asynchrone alimenté par un onduleur à une fréquence de 50Hz, en fonctionnement à vide (sans charge mécanique). Le pic principal très marqué à 50Hz correspond à la fréquence fondamentale imposée par l'onduleur. Aucune bande latérale significative n'est visible, ce qui confirme l'absence de défauts rotorique, notamment de type cassure de barre. On note également quelques pics harmoniques secondaires aux basses fréquences (vers 3Hz) et aux alentours de 96Hz, pouvant être liés aux effets de modulation du signal par l'onduleur. L'ensemble du spectre reste néanmoins stable et caractéristique d'un moteur en bon état de fonctionnement à vide. Cette analyse permet de définir une signature de référence utile pour les comparaisons ultérieures sous charge ou en cas de défaillance.



#### 3.12.4.2 Charge $C_r = 3.6\text{Nm}$

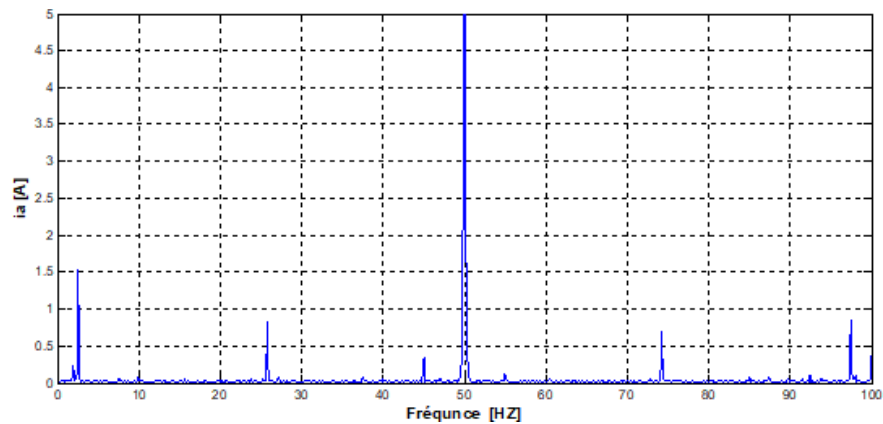


Fig 3.24: Spectres du courant statorique  $i_a$  du moteur sain sous alimenté par le Convertisseur avec une fréquence de 50Hz, la charge  $C_r=3.6\text{Nm}$

- **Interprétation**

On observe une composante dominante très marquée à 50Hz, correspondant à la fréquence de base imposée par le variateur. Cette composante traduit l'excitation principale du moteur.

Des composantes secondaires sont également visibles, principalement dues aux harmoniques introduites par le variateur de vitesse (effet de la modulation de largeur d'impulsion - PWM). Ces composantes sont attendues même en l'absence de défauts et reflètent les interactions normales entre l'électronique de puissance et la machine.

Aucune bande latérale significative associée à un défaut de type cassure de barres du rotor n'est observée dans ce spectre. Cela confirme que le moteur fonctionne correctement, sans anomalies électromécaniques détectables à travers le courant statorique.

Cette analyse montre que le spectre du courant statorique dans un moteur sain sous charge présente une structure régulière dominée par la fréquence fondamentale et les harmoniques induites par l'alimentation.

### 3.12.4.3 Charge $C_r = 6.6\text{Nm}$

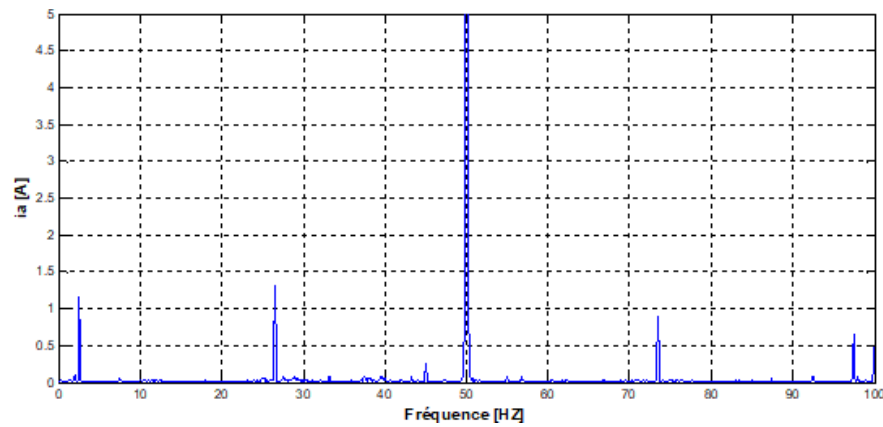


Fig 3.25: Spectres du courant statorique  $i_a$  du moteur sain sous alimenté par le Convertisseur avec une fréquence de 50Hz, la charge  $C_r=6.6\text{Nm}$

- **Interprétation**

On remarque une composante dominante bien marquée à 50Hz, qui correspond à la fréquence fondamentale imposée par le variateur de vitesse. Cette composante représente l'excitation principale du moteur.

D'autres composantes secondaires apparaissent également à différentes fréquences, notamment aux alentours de 25Hz et 75Hz. Ces pics sont principalement liés aux harmoniques introduites par le variateur (effets de la modulation PWM) ainsi qu'aux phénomènes électromagnétiques normaux dans le moteur.

Il est important de noter que malgré l'augmentation de la charge, aucune bande latérale significative indiquant un défaut rotorique (comme une cassure de barres) n'est visible dans ce spectre. Cela confirme que le moteur reste en bon état de fonctionnement, même sous contrainte mécanique plus élevée.

#### 3.12.4.4 Comparaison

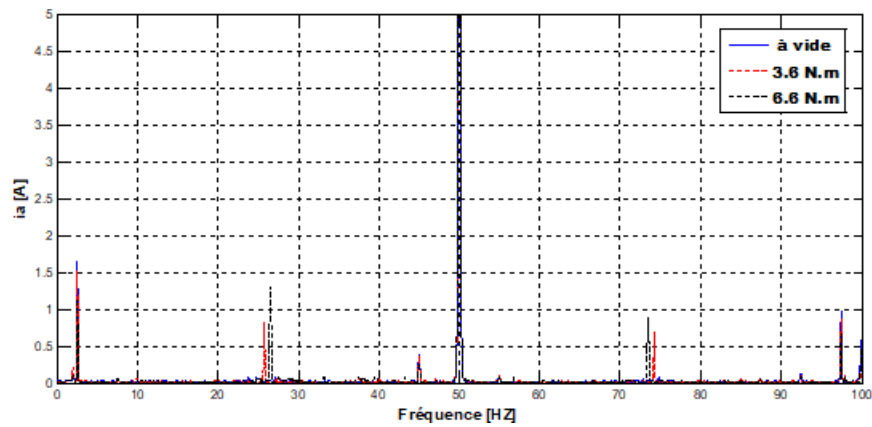


Fig 3.26: Spectres du courant statorique  $i_a$  du moteur sain sous alimenté par le Convertisseur avec une fréquence de 50Hz, la charge à vide,  $C_r=3.6\text{Nm}$ ,  $C_r= 6.6\text{Nm}$

- **Interprétation**

L'analyse des signaux sous l'effet de l'augmentation de la charge a révélé de légères hausses d'amplitude des vibrations, toutefois ces variations restent dans des limites acceptables et ne suggèrent aucun défaut mécanique apparent. De plus, l'analyse spectrale confirme le bon état du moteur, sans présence d'indications de rupture des barres du rotor, ce qui témoigne d'un fonctionnement normal et d'une bonne santé globale de la machine.

## 3.13 Les Résultats obtenus dans l'état avec une barre cassée

### 3.13.1 Pour une fréquence $f_s=30\text{Hz}$

#### 3.13.1.1 Charge $C_r = 3.6\text{Nm}$

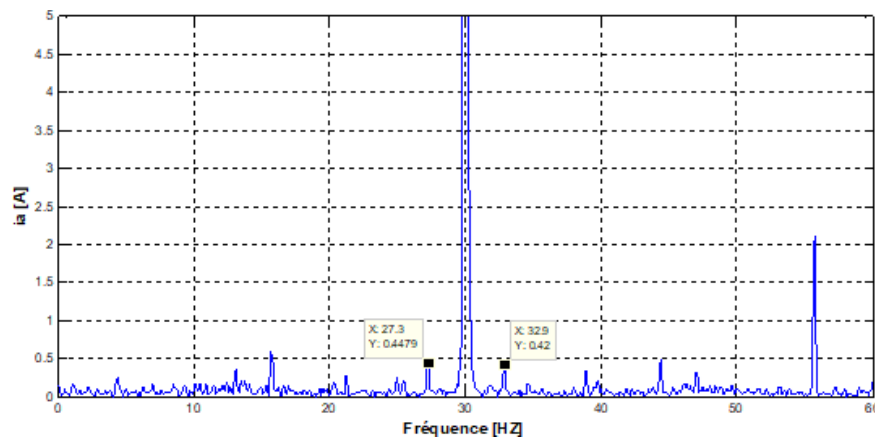


Fig 3.27: Spectres du courants statorique  $i_a$  du moteur avec une barre cassée alimenté par le convertisseur avec une fréquence de 30Hz, la charge  $C_r=3.6$  et  $g=4.8\%$

#### • Interprétation

Lorsqu'un moteur asynchrone triphasé est alimenté par un variateur de vitesse (onduleur) et soumis à une charge mécanique moyenne de 3,6Nm, l'analyse spectrale par la transformée de Fourier rapide (FFT) a démontré son efficacité dans la détection d'un défaut lié à la rupture d'une seule barre du rotor. Sous une fréquence fondamentale de 30Hz, des pics latéraux caractéristiques ont été observés à 27,3Hz et 32,9Hz, confirmant ainsi la capacité de cette méthode à diagnostiquer ce type de défaillance dans ces conditions de fonctionnement.

### 3.13.1.2 Charge $C_r = 6.6\text{Nm}$

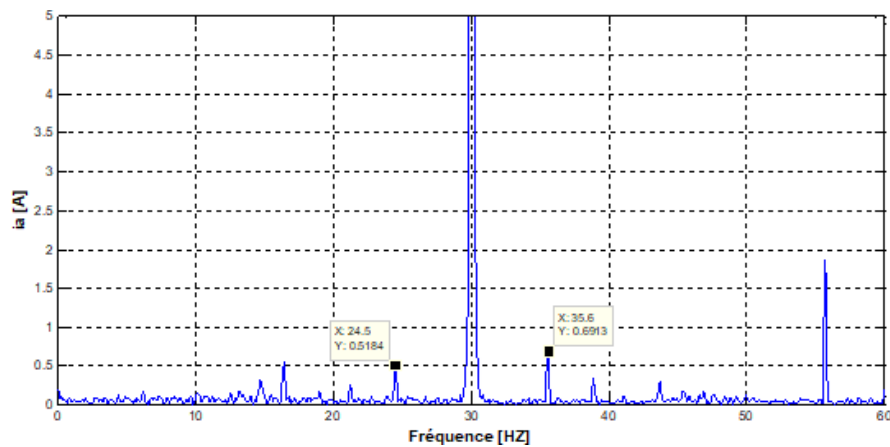


Fig 3.28: Spectres du courants statorique  $i_a$  du moteur avec une barre cassée alimenté par le convertisseur avec une fréquence de 30Hz, la charge  $C_r=6.6$  et  $g=9.3\%$

#### • Interprétation

À la même fréquence fondamentale de 30Hz, mais sous une charge mécanique plus élevée de  $6,6\text{Nm}$  " proche du couple nominal du moteur " les amplitudes des fréquences latérales deviennent plus prononcées, notamment à 24,4Hz et 35,6Hz. Cette observation confirme que, pour une rupture d'une seule barre du rotor, la méthode FFT conserve son efficacité dans la détection du défaut, aussi bien sous charge moyenne que sous une charge élevée.

### 3.13.2 Pour une fréquence $f_s=50\text{Hz}$

#### 3.13.2.1 Charge $C_r = 3.6\text{Nm}$

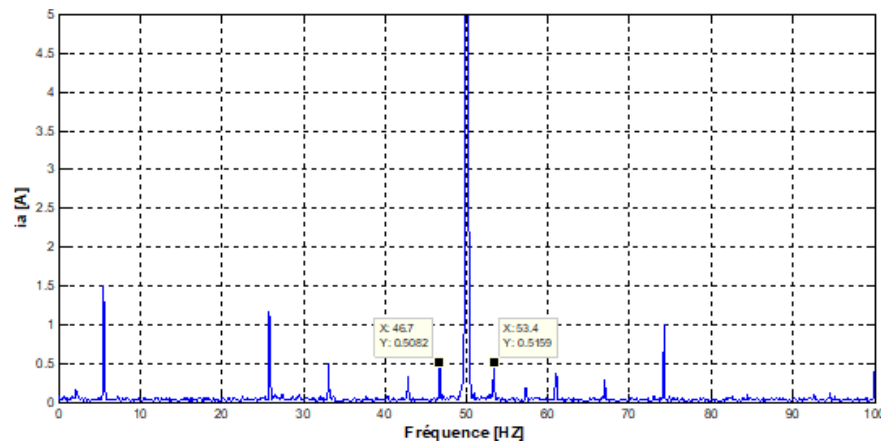


Fig 3.29: Spectres du courants statorique  $i_a$  du moteur avec une barre cassée alimenté par le convertisseur avec une fréquence de 50Hz, la charge  $C_r=3.6\text{Nm}$  et  $g=3.4\%$

#### • Interprétation

Lorsqu'un moteur asynchrone triphasé est alimenté par un variateur de vitesse (onduleur) et soumis à une charge mécanique moyenne de  $3,6\text{Nm}$ , la transformée de Fourier rapide (FFT) a démontré son efficacité dans la détection d'un défaut lié à la rupture d'une seule barre du rotor. Sous une fréquence fondamentale de  $50\text{Hz}$ , des pics latéraux significatifs ont été observés à  $46,7\text{Hz}$  et  $53,4\text{Hz}$ , ce qui confirme la capacité de cette méthode à diagnostiquer ce type de défaillance dans ces conditions de fonctionnement.

### 3.13.2.2 Charge $C_r = 6.6\text{Nm}$

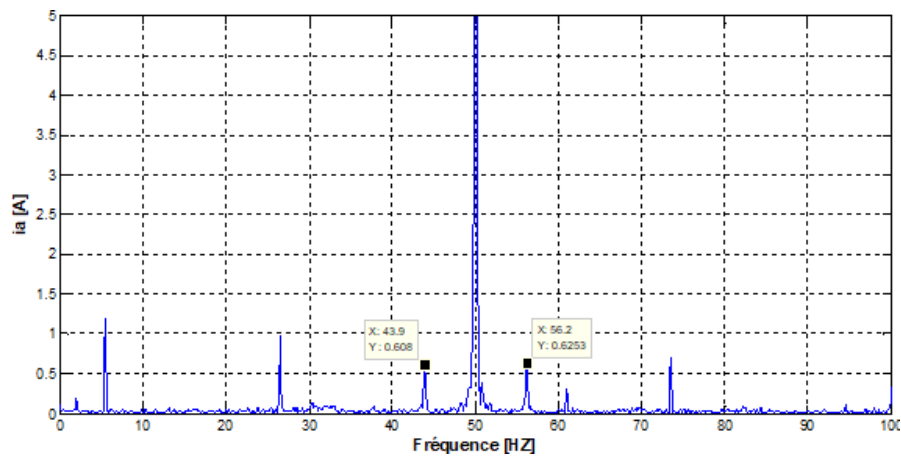


Fig 3.30: Spectres du courants statorique  $i_a$  du moteur avec une barre cassée alimenté par le convertisseur avec une fréquence de 50Hz, la charge  $C_r=6.6\text{Nm}$  et  $g=6.2\%$

- **Interprétation**

À la même fréquence fondamentale de 50Hz, mais sous une charge mécanique plus élevée de 6,6Nm " proche du couple nominal du moteur " les amplitudes des fréquences latérales deviennent plus marquées, notamment à 43,9Hz et 56,2Hz. Ces résultats confirment que, pour un défaut de rupture d'une seule barre du rotor, la méthode FFT reste efficace pour le diagnostic, aussi bien sous une charge moyenne que sous une charge élevée.

## 3.14 Comparaison entre l'état sain et l'état avec une barre cassée

### 3.14.1 Pour une fréquence $f_s=30\text{Hz}$

#### 3.14.1.1 Charge $C_r = 3.6\text{Nm}$

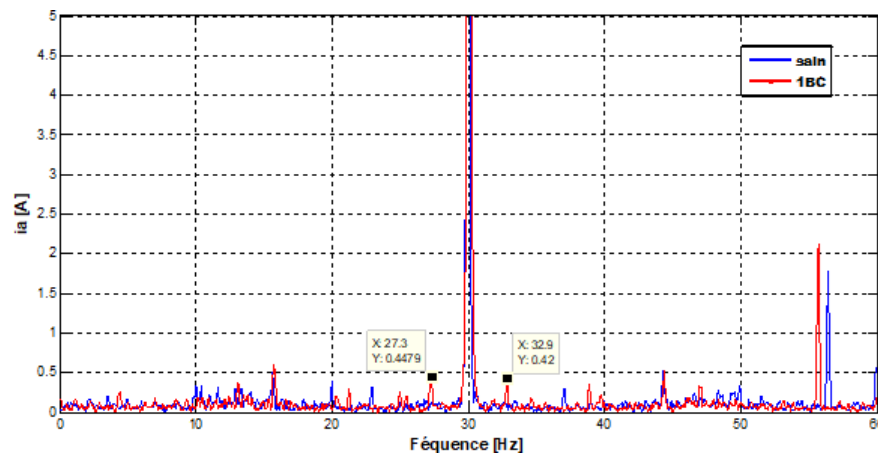


Fig 3.31: Spectres du courants statorique  $i_a$  du moteur avec une barre cassée alimenté par le convertisseur avec une fréquence de 30Hz, la charge  $C_r=3.6\text{Nm}$

#### • Interprétation

Lorsqu'un moteur asynchrone triphasé est alimenté par un variateur de vitesse (onduleur) et soumis à une charge mécanique moyenne de 3,6Nm, l'analyse spectrale basée sur la transformée de Fourier rapide (FFT) a démontré une efficacité notable dans la détection d'un défaut lié à la rupture d'une seule barre du rotor, sous une fréquence fondamentale de 30Hz. Des pics latéraux significatifs ont été observés à 27,3Hz et 32,9 Hz, en comparaison avec l'état sain dans les mêmes conditions de fonctionnement, ce qui confirme la pertinence de cette méthode pour le diagnostic de ce type de défaillance.



### 3.14.1.2 Charge $C_r = 6.6\text{Nm}$

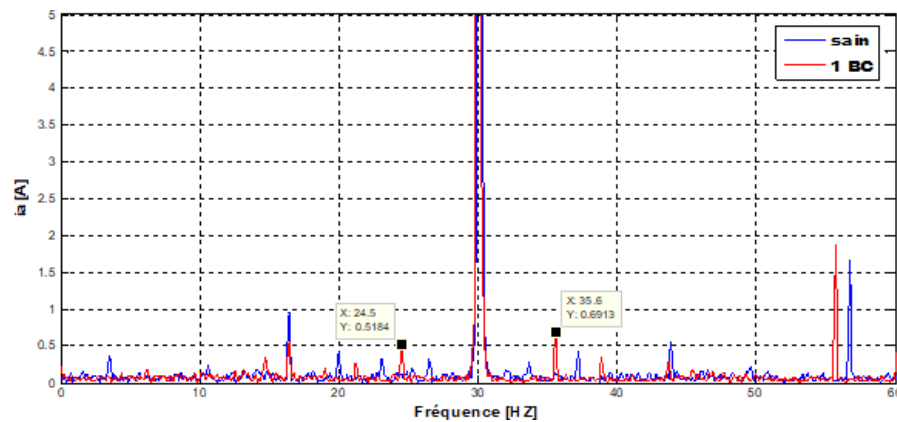


Fig 3.32: Spectres du courant statorique  $i_a$  du moteur avec une barre cassée alimenté par le convertisseur avec une fréquence de 30Hz, la charge  $C_r=6.6$  et  $g=9.3\%$

#### • Interprétation

Lorsqu'un moteur asynchrone triphasé est alimenté par un variateur de vitesse (onduleur) et soumis à une charge mécanique de  $6,6\text{Nm}$  " proche du couple nominal du moteur " l'analyse spectrale basée sur la transformée de Fourier rapide (FFT) a démontré une efficacité claire dans la détection d'une rupture d'une seule barre du rotor, sous une fréquence fondamentale de 30Hz. Des pics latéraux plus prononcés qu'en cas de charge moyenne ont été observés aux fréquences de 24,5Hz et 35,6Hz, en comparaison avec l'état sain dans les mêmes conditions de fonctionnement, ce qui confirme la pertinence de cette méthode pour le diagnostic de ce type de défaut en situation de charge élevée.

### 3.14.2 Pour une fréquence $f_s=50\text{Hz}$

#### 3.14.2.1 Charge $C_r = 3.6\text{Nm}$

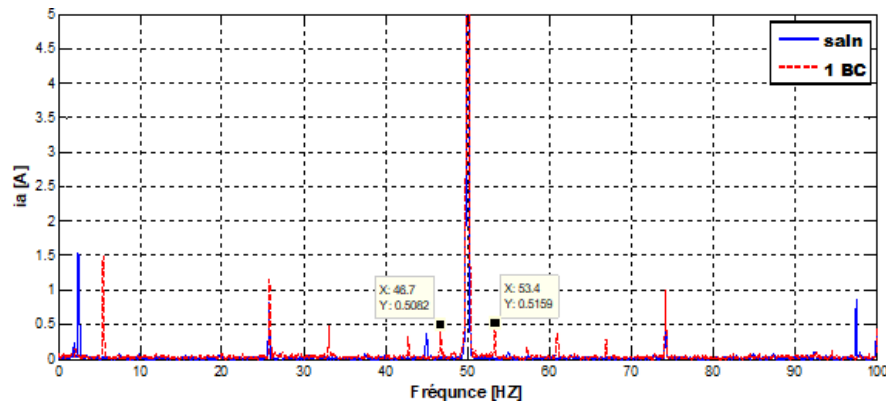


Fig 3.33: Spectres du courants statorique  $i_a$  du moteur avec une barre cassée alimenté par le convertisseur avec une fréquence de 50Hz, la charge  $C_r=3.6$  et  $g=3.4\%$

- **Interprétation**

Lorsqu'un moteur asynchrone triphasé est alimenté par un variateur de vitesse (onduleur) et soumis à une charge mécanique de  $3,6\text{Nm}$  " considérée comme moyenne par rapport au couple nominal du moteur " l'analyse spectrale basée sur la transformée de Fourier rapide (FFT) a montré une efficacité notable dans la détection d'une rupture d'une seule barre du rotor, sous une fréquence fondamentale de 50Hz. Des pics latéraux caractéristiques ont été observés à 46,7Hz et 53,4Hz, en comparaison avec l'état sain dans les mêmes conditions de fonctionnement, ce qui confirme la fiabilité de cette méthode pour le diagnostic de ce type de défaut en régime de charge moyenne.

### 3.14.2.2 Charge $C_r = 6.6\text{Nm}$

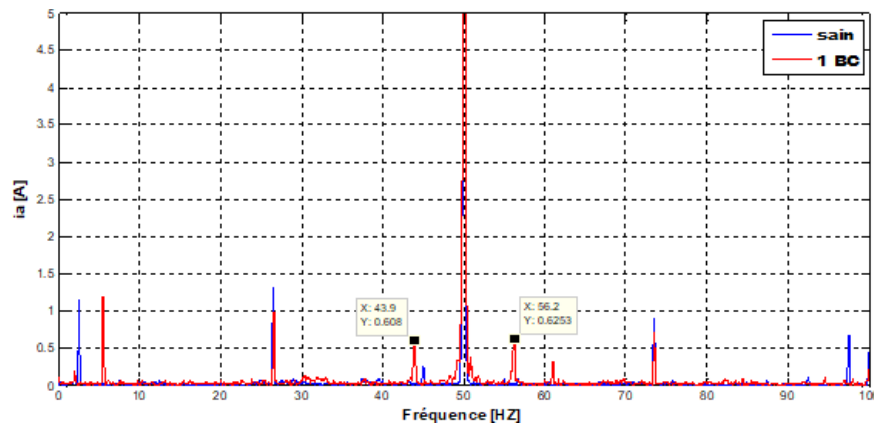


Fig 3.34: Spectres du courants statorique  $i_a$  du moteur avec une barre cassée alimenté par le convertisseur avec une fréquence de 50Hz, la charge  $C_r=6.6$  et  $g=6.2\%$

- **Interprétation**

Lorsqu'un moteur asynchrone triphasé est alimenté par un variateur de vitesse (onduleur) et soumis à une charge mécanique de  $6,6\text{Nm}$  " proche du couple nominal du moteur" l'analyse spectrale basée sur la transformée de Fourier rapide (FFT) a démontré une grande efficacité dans la détection d'une rupture d'une seule barre du rotor, sous une fréquence fondamentale de 50Hz. Des pics latéraux plus prononcés ont été observés à 43,9Hz et 56,2Hz, en comparaison avec l'état sain et dans les mêmes conditions de fonctionnement, ce qui renforce la fiabilité de cette méthode pour le diagnostic de ce type de défaillance en régime de charge élevée proche du couple nominal.

## 3.15 Les résultats obtenus dans l'état avec deux barres cassées

### 3.15.1 Pour une fréquence $f_s=30\text{Hz}$

#### 3.15.1.1 Charge $C_r = 1.6\text{Nm}$

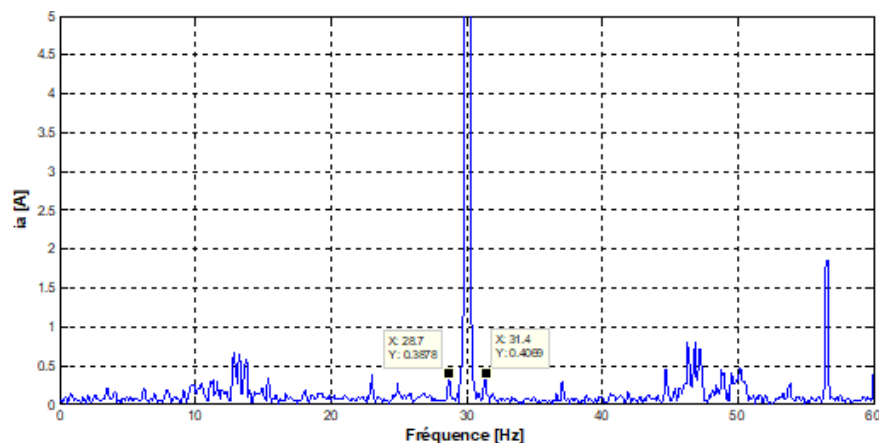


Fig 3.35: Spectres du courants statorique  $i_a$  du moteur avec deux barres cassées alimenté par le convertisseur avec une fréquence de 30Hz, la charge  $C_r=1.6\text{Nm}$

- **Interprétation**

En présence d'une rupture de deux barres du rotor d'un moteur asynchrone alimenté par un variateur de vitesse (onduleur), et pour une fréquence fondamentale de 30 Hz avec une faible charge mécanique de 1,6Nm, des pics latéraux caractéristiques apparaissent aux fréquences de 28,7Hz et 31,4Hz. Cela démontre la capacité de la transformée de Fourier rapide (FFT) à détecter ce type de défaut dans de telles conditions de fonctionnement.

### 3.15.1.2 Charge $C_r = 6.6\text{Nm}$

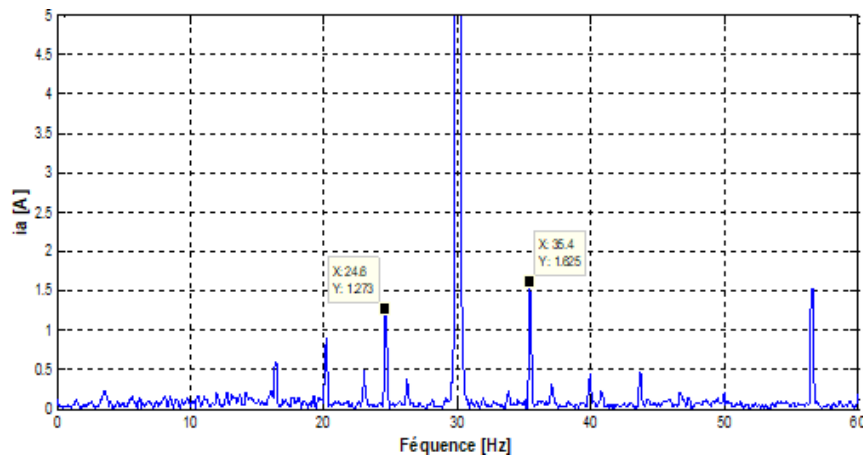


Fig 3.36: Spectres du courants statorique  $i_a$  du moteur avec deux barres cassées alimenté par le convertisseur avec une fréquence de 30Hz, la charge  $C_r=6.6\text{Nm}$

#### • Interprétation

En présence d'une rupture de deux barres du rotor d'un moteur asynchrone alimenté par un variateur de vitesse (onduleur), et pour une fréquence fondamentale de 30Hz avec une charge mécanique élevée de 6,6Nm, proche du couple nominal du moteur, les pics latéraux apparaissent de manière plus prononcée aux fréquences de 24,6Hz et 35,4Hz. Cela constitue une preuve claire de l'efficacité de la transformée de Fourier rapide (FFT) dans la détection de ce type de défauts dans des conditions de fonctionnement sévères.

### 3.15.2 Pour une fréquence $f_s=20\text{Hz}$

#### 3.15.2.1 Charge $Cr = 1.6\text{Nm}$

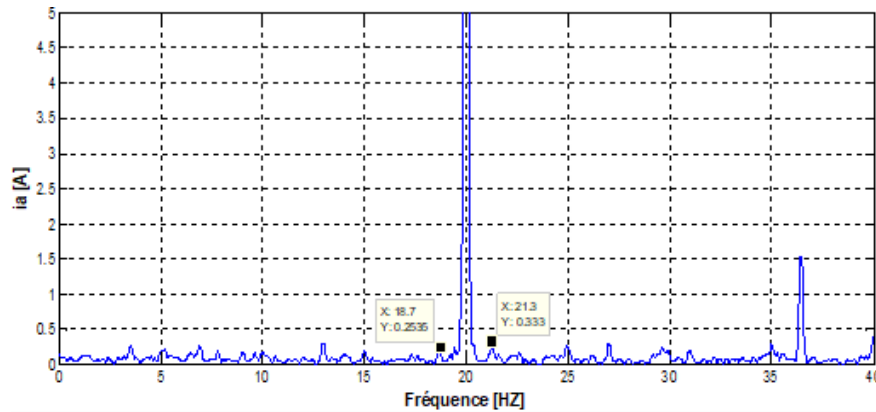


Fig 3.37: Spectres du courants statorique  $i_a$  du moteur avec deux barres cassées alimenté par le convertisseur avec une fréquence de 20Hz, la charge  $Cr=1.6$  et  $g=3.2\%$

#### • Interprétation

Parmi les raisons techniques qui rendent le diagnostic des défauts difficile à une fréquence de 20Hz, on note que les signaux de défaut présentent une amplitude relativement faible par rapport au signal fondamental, ce qui complique leur détection. De plus, ces signaux sont souvent sujets à une interférence avec les harmoniques générées par l'onduleur (VFD), ce qui complique davantage l'analyse spectrale et réduit la fiabilité du diagnostic.

#### 3.15.2.2 Charge $Cr = 6.6\text{Nm}$

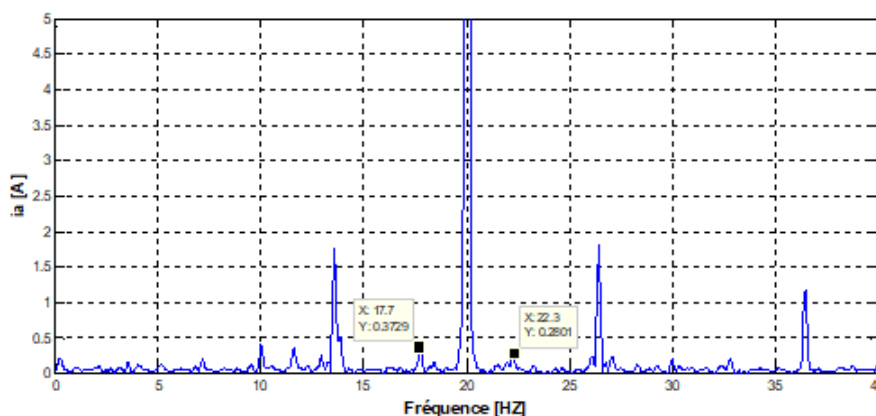


Fig 3.38: Spectres du courants statorique  $i_a$  du moteur avec deux barres cassées alimenté par le convertisseur avec une fréquence de 20Hz, la charge  $Cr=6.6$  et  $g=7.2\%$

- **Interprétation**

En présence d'une rupture de deux barres du rotor d'un moteur asynchrone alimenté par un variateur de vitesse (onduleur), et pour une fréquence fondamentale basse de 20 Hz avec une charge mécanique élevée de 6,6Nm, proche du couple nominal du moteur, les pics latéraux calculés précédemment pour identifier le défaut deviennent difficiles à distinguer. Cela est dû à un chevauchement important entre les composantes latérales générées par le défaut et celles induites par le variateur, ce qui réduit l'efficacité de la transformée de Fourier rapide (FFT) dans ces conditions de fonctionnement.

## 3.16 Comparaison entre l'état sain et l'état avec deux barre cassée

### 3.16.1 Pour une fréquence $f_s=40\text{Hz}$

#### 3.16.1.1 Charge $C_r = 1.6\text{Nm}$

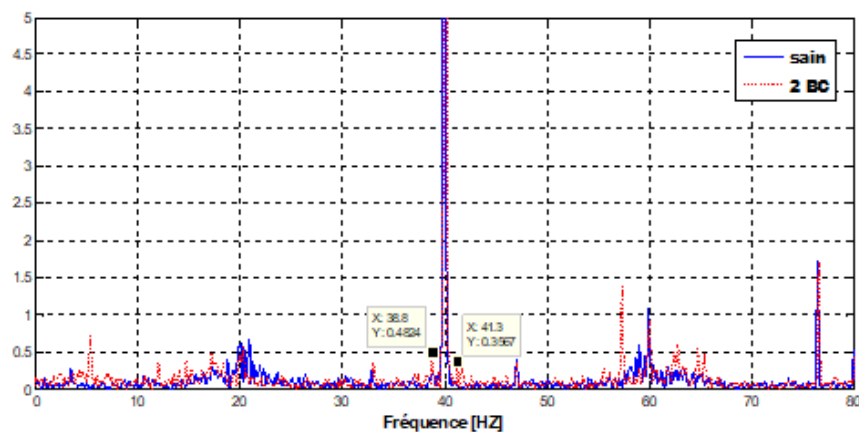


Fig 3.39: Spectres du courants statorique  $i_a$  du moteur avec deux barres cassées alimenté par le convertisseur avec une fréquence de 40Hz, la charge  $C_r=1.6$  et  $g=1.6\%$

- **Interprétation**

Les fréquences latérales à 38,8Hz et 41,3Hz indiquent une panne possible des barres du rotor. Cependant, leur identification reste difficile en raison de : la faible charge mécanique appliquée (1,6Nm), la fréquence fondamentale basse (40Hz), qui rend les composantes latérales proches de la fréquence principale, ce qui complique leur distinction via l'analyse

FFT. Pour améliorer la détection du défaut, il est recommandé d'augmenter légèrement la charge mécanique afin d'améliorer le rapport signal/bruit (SNR) et de favoriser l'apparition des composantes caractéristiques du défaut.

### 3.16.1.2 Charge $C_r = 6.6\text{Nm}$

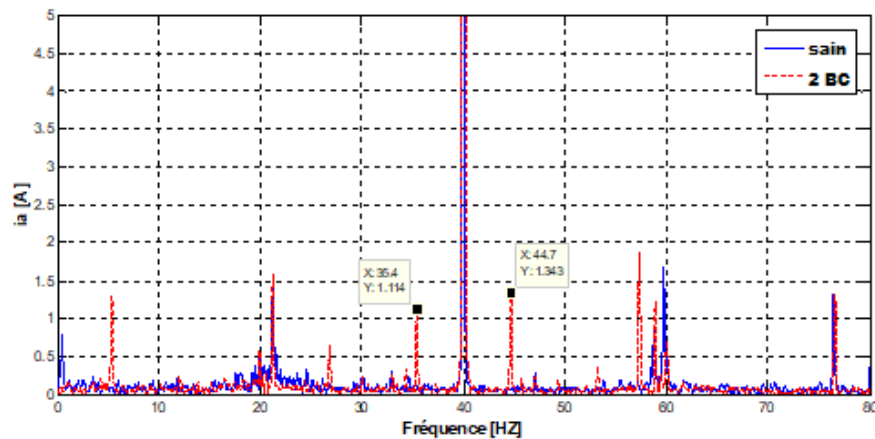


Fig 3.40: Spectres du courants statorique  $i_a$  du moteur avec deux barres cassées alimenté par le convertisseur avec une fréquence de 40Hz, la charge  $C_r=6.6$  et  $g=5.8\%$

#### • Interprétation

La présence de fréquences latérales aux alentours de 35,4Hz et 44,7Hz constitue un indicateur fort d'un défaut de rupture de barres dans le rotor. Ce type de défaillance entraîne une augmentation du glissement, une diminution de la vitesse de rotation, ainsi qu'une élévation du courant et des vibrations. Il est donc impératif d'entreprendre des actions de maintenance correctives sans délai afin d'éviter des dommages irréversibles au moteur. L'analyse spectrale par FFT s'est révélée efficace pour mettre en évidence ce type de défaut de manière claire et fiable.



### 3.16.2 Pour une fréquence $f_s=20\text{Hz}$

#### 3.16.2.1 Charge $C_r = 1.6\text{Nm}$

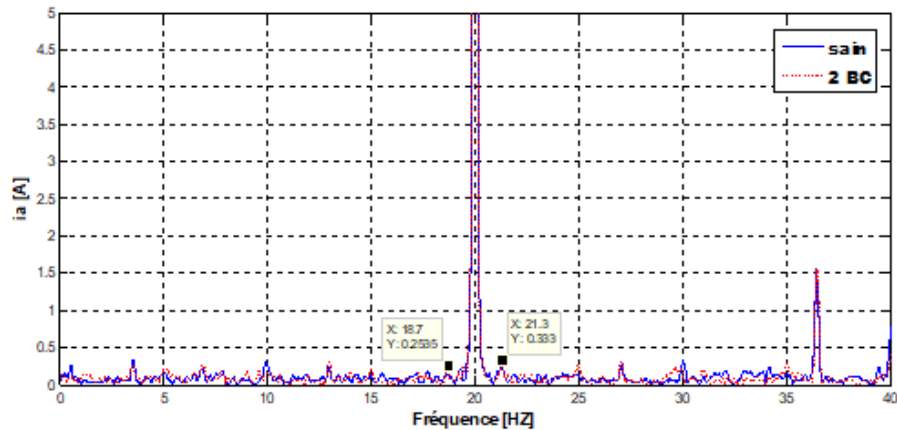


Fig 3.41: Spectres du courants statorique  $i_a$  du moteur avec deux barres cassées alimenté par le convertisseur avec une fréquence de 20Hz, la charge  $C_r=1.6$  et  $g=3.2\%$

- **Interprétation**

Même en présence d'une rupture de deux barres du rotor, l'analyse spectrale par transformée de Fourier rapide (FFT) rencontre de grandes difficultés à détecter le défaut à basse fréquence fondamentale (20Hz) et sous une charge mécanique de 1,6Nm. Cette limitation est principalement due au chevauchement des fréquences latérales générées par le défaut avec celles induites par l'onduleur, rendant la distinction des composantes caractéristiques du défaut difficile.

### 3.16.2.2 Charge $C_r = 6.6\text{Nm}$

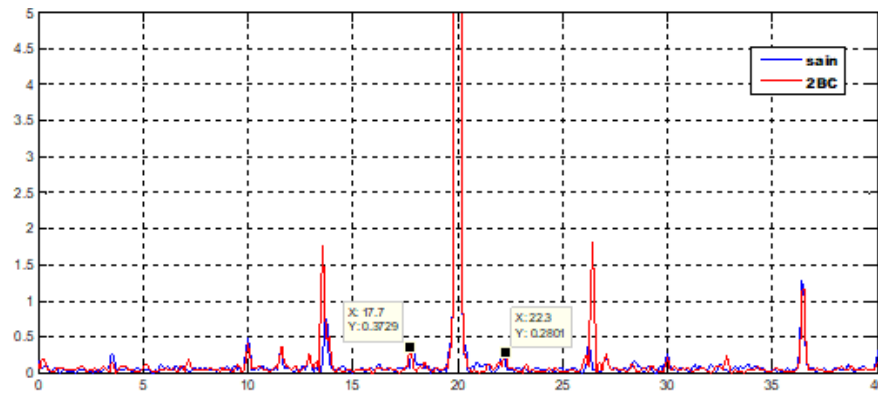


Fig 3.42: Spectres du courants statorique  $i_a$  du moteur avec deux barres cassées alimenté par le convertisseur avec une fréquence de 20Hz, la charge  $C_r=6.6\text{Nm}$

#### • Interprétation

En présence d'une rupture de deux barres du rotor, l'analyse spectrale basée sur la transformée de Fourier rapide (FFT) rencontre des difficultés notables pour détecter le défaut lorsque la fréquence fondamentale est faible (20Hz) et que le moteur est soumis à une charge mécanique élevée, proche de son couple nominal (6,6Nm). Cette limitation est principalement due au chevauchement entre les fréquences latérales caractéristiques du défaut et les harmoniques générées par l'onduleur, ce qui complique la distinction entre les composantes spectrales liées à la défaillance et celles induites par le système d'alimentation.

### **3.17 Conclusion**

La transformée de Fourier rapide (FFT) a démontré une grande efficacité dans le diagnostic des ruptures de barres du rotor dans les moteurs asynchrones, même dans des conditions de fonctionnement complexes. Cette méthode permet une détection précise des défauts, y compris lorsque le moteur est alimenté par un variateur de vitesse (VFD). Son efficacité se manifeste particulièrement dans la plage de fréquences comprise entre 30 et 50 Hz, où les composantes spectrales caractéristiques des défauts apparaissent clairement. Cependant, à basse fréquence (par exemple 20Hz), la FFT montre des limites dans la détection des défauts, en raison du chevauchement entre les composantes latérales générées par le variateur et les signaux caractéristiques des anomalies, ce qui complique l'analyse. Cette technique reste néanmoins performante sous des charges mécaniques moyennes à élevées, que ce soit en présence d'une seule barre rompue ou de plusieurs barres défectueuses. Ces résultats confirment l'importance de la FFT en tant qu'outil fiable de surveillance de l'état des moteurs utilisés en environnement industriel, contribuant ainsi à l'optimisation de la maintenance prédictive et à la réduction des arrêts imprévus.

# *Conclusion Générale*

Les travaux présentés dans ce mémoire portent sur le diagnostic des défauts de cassure de barres rotoriques dans un moteur asynchrone triphasé alimenté par un variateur de vitesse, en utilisant la Transformée de Fourier Rapide (TFR).

Dans le premier chapitre, nous avons abordé les généralités sur la machine asynchrone, en détaillant ses constituants, ses avantages et ses inconvénients. Ensuite, nous avons étudié les types de défauts possibles, leurs causes, ainsi que les principales méthodes de détection.

Le deuxième chapitre a été consacré à l'étude du variateur de vitesse. Nous y avons présenté ses composants, notamment le convertisseur statique, expliqué la modulation de largeur d'impulsion (MLI), et décrit les différentes stratégies de commande.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté les résultats expérimentaux relatifs au diagnostic de défauts de rupture d'une ou deux barres du rotor dans des moteurs asynchrones alimentés en  $V/f$  constant. Ce diagnostic repose sur l'analyse du spectre du courant statorique à l'aide de la TFR. Les résultats montrent que la gravité du défaut augmente avec la charge, et possiblement avec la vitesse.

# *Bibliographie*

- [01] T.Boumegoura, Recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone, et synthèse d'observateurs en vue du diagnostic, Thèse de doctorat, école doctorale électronique, électrotechnique, automatique de Lyon, Mars 2001.
  
- [02] G. Bossio, C. De Angelo, J. Bossio, C. Pezzani and G. Garcia, "Separating Broken Rotor Bars and Load Oscillations on IM Fault Diagnosis Through the Instantaneous Active and Reactive Currents", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 56, no. 11, pp. 4571-4580, 2009.
  
- [03] K.Yahia, Contribution au Diagnostic de la Machine Asynchrone Triphasée par une Approche Modèle, Thèse de Doctorat, Université de Biskra, 2013.
  
- [04] H. Razik, "Contenu spectral du courant absorbé par la machine asynchrone en cas de défaillance, un état de l'art", La revue 3EI, n°29, pp.48-52, juin 2002.
  
- [05] G.Didier, Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances, Thèse de Doctorat, U.Nancy, France, 2004.
  
- [06] ZAHIR Ait Ouali «Application des FPGA à la commande d'un moteur asynchrone», mémoire magister, Université Mouloud mammeri de Tizi-ouzou.
  
- [07] BOUSSEKSOU Radouane «Modélisation analytique des machines Asynchrone application au diagnostic», mémoire magister, Université Mentouri-Constantine.

- [08] Kerszenbaum L. and Landy C. F., "The existence of large interbar currents in the three phase squirrel cage motors with rotor-bar and end-ring faults" IEEE Transactions on Power Apparatus Systems, Vol. 103(7), pp.1854-1862, 1984.
  
- [09] Thorsen O. V. and Dalva M., "A survey of fault on induction motors in offshore oil industry, petrochemical industry, gas terminals, and oil refineries" IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.31(5), pp. 1186-1196, September 1995.
  
- [10] Ondel O., «Diagnostic par reconnaissance des formes : Application à un ensemble convertisseur – machine asynchrone» Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lyon, France, 2006
  
- [11] MEDOUED AMMAR., « SURVEILLANCE ET DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DES MACHINES ELECTRIQUES : APPLICATIONS AUX MOTEURS ASYNCHRONES» Thèse de Doctorat, Université du 20 Août 1955, Skikda, 2012
  
- [12] N. Halem, *Modélisation des machines asynchrones triphasées à cage en vue du diagnostic par la méthode des éléments finis*, thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2015.
  
- [13] Babaa Fatima, Contribution à la modélisation et à la commande de la machine asynchrone : "Application au diagnostic des défauts statoriques", Thèse de Doctorat, Université Constantine 1, 2014.
  
- [14] Bessous Noureddine, "Contribution au Diagnostic des Défauts dans les Machines Asynchrones : Comparaison entre l'Analyse Vibratoire et l'Analyse du Courant d'Alimentation", Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2017.

- [15] Chermat Badreddine, "Diagnostic des défauts de MAS par les méthodes paramétriques de traitement du signal", Diplôme de Master, Université Mohamed Khider – Biskra, 2012.
- [16] B. Smail « Contribution à la Détection et au Diagnostic des Défauts dans un Système Machine à Induction-Convertisseur » » thèse de doctorat, Université Batna 2 2016.
- [17] S. Bazine, « Conception et implémentation d'un Méta-modèle de machines asynchrones en défaut », Thèse de doctorat, Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle, Université de Poitiers Tunis, 2009
- [18] Jean-Claude Trigeassou, « Diagnostic des machines électriques », livres, Lavoisier paris, 2011.
- [19] O. Ondel, « Diagnostic par reconnaissance des formes: Application a un ensemble convertisseur – machine asynchrone », Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, France, 2006.
- [20] M. Sahraoui, « Etude Comparative des Méthodes de Diagnostic des Machines Asynchrones », Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra 2010.
- [21] EL M. Ouadie et B. D. Mohammed «Variateur de vitesse » Master mécatronique, Université abdelmalek essaadi faculté des sciences Tétouan 2013.
- [22] G. François « Modulation naturelle généralisée des convertisseurs matriciels pour la variation de vitesse » Thèse de doctorat. université lille nord-de-France 2010.

- [23] B. Charaf Eddine et T. Abdel Kader , « Étude et simulation d'un variateur de vitesse commande un moteur à courant continu » mémoire master, Université Kasdi Merbah Ouargla 2016.
- [24] *Les variateurs de vitesse*, [en ligne]. Disponible sur : [www.energieplus.com](http://www.energieplus.com) (consulté le 05/05/2018).
- [25] *Variateur de vitesse*, Génie électrique formation, [en ligne]. Disponible sur : <http://for-ge.blogspot.com/> (consulté le 19/05/2018).
- [26] G. Merlin, Madicon, D. Sauare, *Les techniques de commande du moteur asynchrone*, *Le magazine Schneider de l'enseignement technologique et professionnel - Intersections*, juin 1998.
- [27] A. Teggat, *Étude comparative entre la commande vectorielle à flux orienté et la commande directe du couple de la machine asynchrone*, mémoire de Master, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2016.
- [28] C. Roland, *Diagnostic des défauts des machines asynchrones : reconnaissance des formes*, thèse de doctorat, Universités CEGELY, Lyon, 2003.
- [29] O. Ondel, *Diagnostic par reconnaissance des formes : application à un ensemble convertisseur – machine asynchrone*, thèse de doctorat, École Centrale de Lyon, France, 2006.
- [30] *Présentation des avaries. Machines électriques tournantes*, *Cahier des Préventions*, CP2, Allianz, 1988.