

Ministère d'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique d'Alger



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



*Département de Génie Electrique
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique*

PROJET DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme

D'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique

Thème

***DIAGNOSTIC DE DEFAUTS DE LA MACHINE
ASYNCHRONE PAR TRAITEMENT DES SIGNAUX***

Proposé et dirigé par :

Pr.O.TOUHAMI

Réalisé par :

OULDAMAR Nasreddine

LADJREB Ayoub

Promotion : juin 2010

ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تشخيص الأعطاب الكهربائية للمحرك اللازامني ثلاثي الطور ذو القفص السنجابي، و المتمثلة في انكسار القضبان و جزء من حلقة الدارة القصيرة، وهذا باستعمال طريقتين مختلفتين، الأولى تحليلية تعتمد على برنامج إنشاء المحرك اللازامني المعد في مختبر البحث في الالكتروتقني للمدرسة الوطنية المتعددة التقنيات، والثانية تعتمد على التحليل الطيفي للتيار الممتص (الساكن) من طرف المحرك باستعمال الطرق اللاثابتية.

الكلمات المفتاحية المحرك اللازامني، التشخيص، انكسار القضبان، جزء من حلقة الدارة القصيرة، تحليل طيف التيار، ولش، بريدجرام، ملتيتبير، الطرق الغير ثابتية

Résumé

L'objectif de cette étude est de diagnostiquer les défauts électriques d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil, les défauts étudiés sont les cassures des barres et les portions d'anneau de court-circuit, en utilisant deux méthodes différentes, la première est analytique basée sur un programme de construction de la machine asynchrone élaboré au laboratoire de recherche en électrotechnique de l'école nationale polytechnique, et la deuxième méthode basée sur l'analyse spectral du courant absorbé (statorique) par le moteur en utilisant des méthodes non-paramétrique.

Mots clefs Machine asynchrone, Diagnostic, Cassure de barres, Cassure de portion d'anneau de court-circuit, Welch, Périodogramme, Multitaper, méthodes non-paramétrique

Abstract

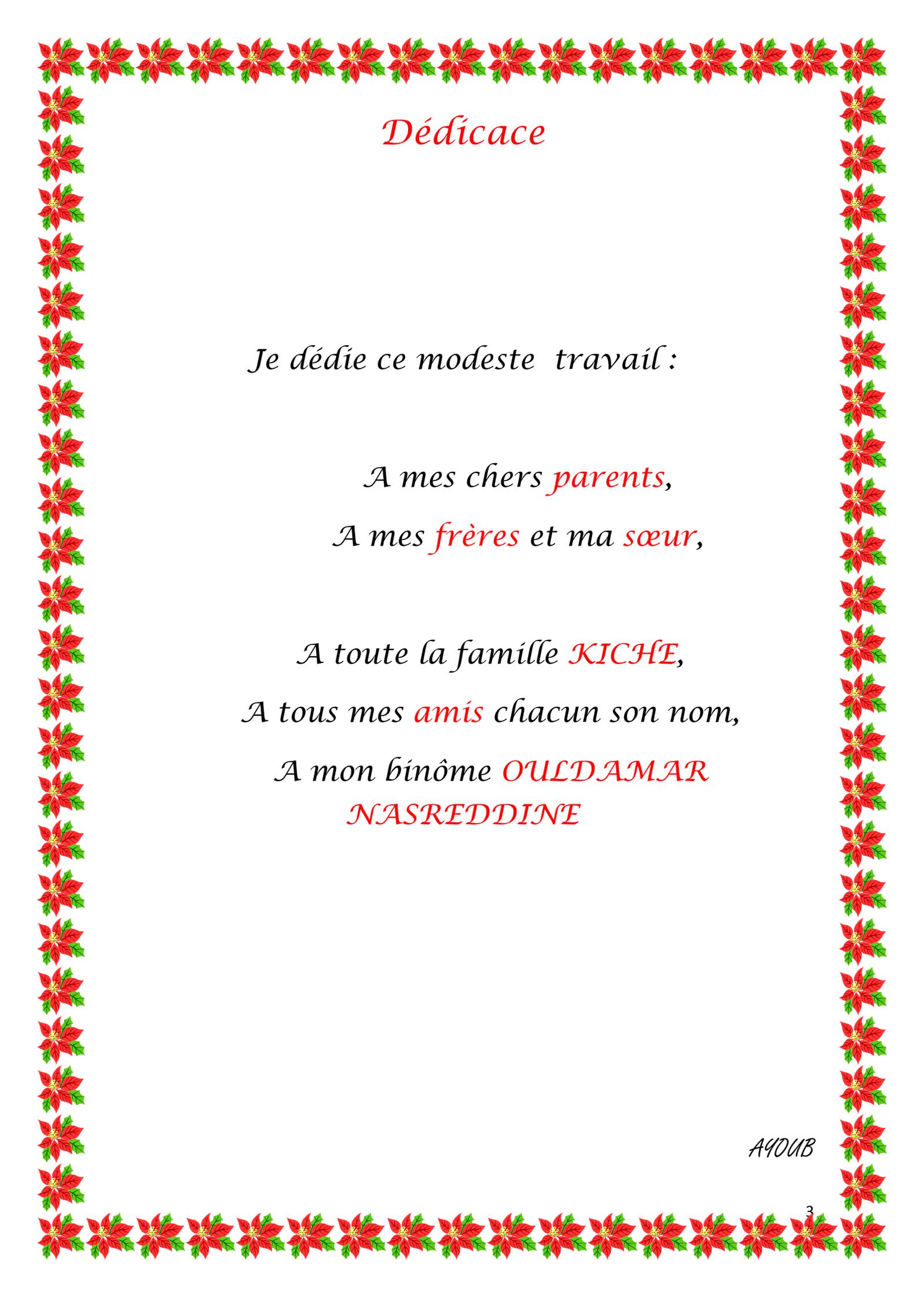
The objective of this study is to diagnosis the defects of squirrel-cage rotor three phases induction motor, as the breaks of the bars and portions of short circuit end-ring, while using two different methods, the first is analytic based on a program of construction of the asynchronous machine elaborated in laboratory of research in Electrotechnics of the polytechnic national school, and the second method based on the frequencies analysis of the current absorbed by the motor while using the non-parametric methods.

Keywords Induction motor, Diagnosis, Broken bars, End-ring segment broken, Welch, periodogram, Multitaper, non-parametric methods.

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail:
A ma très chère mère, le joyau de ma vie
A mon très cher père qui est toujours mon soutien et ma force
Que Dieu me les garde
A mes chères sœurs
A mes chers frères
A toute ma famille
A mes chers amis YOUSSEF, HABIB et MOHAMED
A mon binôme AYOUB
A tous mes amis de L'ENP*

Nasreddine



Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

*A mes chers **parents**,*

*A mes **frères** et ma **sœur**,*

*A toute la famille **KICHE**,*

*A tous mes **amis** chacun son nom,*

*A mon binôme **OULDAMAR**
NASREDDINE*

A40UB

Liste des figures

Figure (I.1): Répartition détaillée des défauts (EPRI) [6].....	7
Figure (I.2): les performances dynamiques de la machine asynchrone.....	9
Figure (I.3): schéma électrique équivalent d'un rotor à cage [9].....	10
Figure (I.4): Schéma équivalent en Γ et par phase de la machine asynchrone [7].....	12
Figure (I.5): Schéma électrique équivalent d'un rotor avec une barre cassée [9].....	13
Figure (I.6): Résistance R en fonction de Z_2 et de glissement.....	14
Figure (I.7) : Résistance rotorique autour de glissement nominal.....	15
Figure (I.8): réactance X en fonction de Z_2 et de glissement.....	15
Figure (I.9): Distribution de champ magnétique. [11,].....	16
Figure (I.10): Courant statorique I_1 en fonction de Z_2 et P_2	17
Figure (I.11): I_2' en fonction de Z_2 et de P_2	17
Figure (I.12): rendement*30 de la machine en fonction de Z_2 et de P_2	18
Figure (I.13): Facteur de puissance*30 en fonction de Z_2 et de P_2	19
Figure (I.14) : le glissement*100 en fonction de Z_2 et de P_2	20
Figure (II.1): Banc d'essai.....	21
Figure (II.2): Banc d'essai -schéma de principe-[14].....	22
Figure (II.3): Différents rotor des machines utilisés.....	23
Figure (II.4): Variateur de vitesse.....	23
Figure (II.5): La machine asynchrone et les charges [LRE].....	24
Figure (II.6): Allure de la tension d'alimentation.....	25
Figure (II.7): Allures des courants statoriques a) machine saine, b) une barre cassée, c) deux barres cassées, d) portion d'anneau de court circuit cassé.....	26
Figure (II.8): Evolution de la vitesse au démarrage.....	27
Figure (II.9): Allure de la tension pour une alimentation onduleur.....	28
Figure (II.10) : Allures des courants statoriques, a) machine saine, b) une barre cassée, c) deux barres cassées, d) portion d'anneau de court circuit cassé.....	28
Figure (III.1) : Types de signaux.....	30
Figure (IV.1): Spectre du courant statorique (résultat expérimental), machine saine.....	38
Figure (IV.2): Spectre du courant statorique (résultat expérimental) Deux barres cassées.....	38
Figure (IV.3): Spectre de courant statorique, 70% de charge.....	39
Figure (IV.4): L'amplitude en (dB) des pics par rapport à la machine saine.....	40

Figure (IV.5): L'amplitude en (dB) des pics par rapport à la machine saine.....	41
Figure (IV.6): Spectre de courant statorique pour une alimentation onduleur.....	42
Figure (IV.7): L'amplitude en (dB) des pics par rapport à la machine saine.....	42
Figure (IV.8): L'amplitude en (dB) des pics par rapport à la machine saine.....	44
Figure (IV.9): Spectre de courant par le périodogramme pour une alimentation réseau.....	45
Figure (IV.10): L'amplitude en (dB) des pics gauche par rapport à la machine saine.....	46
Figure (IV.11): L'amplitude en (dB) des pics droite par rapport à la machine saine.....	47
Figure (IV.12): Spectres des courant statorique utilisant la méthode MULTITAPER.....	48
Figure (IV.13): L'amplitude en (dB) des pics gauche par rapport à la machine saine.....	49
Figure (IV.14): L'amplitude en (dB) des pics droite par rapport à la machine saine.....	49
Figure (IV.15): L'amplitude en (dB) du premier pic gauche par rapport à la machine saine par les trois méthodes.....	49

Liste des tableaux

Tableau (I.1) : Répartition des défauts (IEEE, EPRI) [6]	6
Tableau (I.2): Répartition des défauts.....	7
Tableau (I.3): Plaque signalétique de la machine asynchrone.....	8
Tableau (II.1): Plaque signalétique de la machine à courant continu.....	24
Tableau (IV.1): Rapport d'amplitude des pics avec la machine saine.....	40
Tableau (IV.2): Rapport d'amplitude des pics avec la machine saine.....	42
Tableau (IV.3): Rapport d'amplitude des pics avec la machine saine.....	45
Tableau (IV.4): Rapport d'amplitude des pics avec la machine saine.....	48
Tableau (IV.5): L'amplitude du premier pic à gauche par rapport à la machine saine en utilisant les trois méthodes.....	49

SOMMAIRE

Remerciement	i
Dédicaces	ii
Résumé.....	iv
Liste des figures	v
Liste des tableaux.....	vii
Introduction générale	1

Chapitre I

Diagnostic des défauts de la machine asynchrone par la méthode analytique

I.1 Aperçu sur le diagnostic de défauts des machines électriques	3
I.1.1 Défauts des machines asynchrones.....	3
I.1.1.1 Défauts d'ordre mécanique	3
I.1.1.2 Défauts d'ordre électrique	4
I.1.2 Méthodes de détection et de localisation	4
I.1.2.1 Aspect modélisation	4
I.1.1.2 Estimation des paramètres physiques	5
I.1.1.3 Estimation d'état.....	5
I.1.1.4 Traitement de signaux.....	6
I.1.3 quelques statistiques sur les défauts de la machine asynchrone.....	6
I.2 Comportement de la machine asynchrone en présence des barres cassées	8
I.2.1 Présentation de la machine	8
I.2.1.1 Plaque signalétique	8
I.2.1.2 Performances dynamiques	8
I.2.2 Modèle du rotor de la machine asynchrone	9
I.2.2.1 rotor sain	9
I.2.2.1.1 Circuit électrique du rotor à cage sain	9
I.2.2.1.2 résistance rotorique équivalente.....	10
I.2.2.1.3 Résistance rotorique ramené au stator	11
I.2.2.1.4 Réactance électrique équivalente.....	11
I.2.2.1.5 Réactance rotorique ramené au stator	11
I.2.2.1.6 Circuit électrique équivalent par phase.....	11
I.2.2.1.7 calcul d'impédance.....	12
I.2.2.2 Rotor avec des barres cassées	13
I.2.2.2.1 Circuit électrique équivalent d'un rotor défaillant	13
I.2.2.2.2 Courbes des résistances	14
I.2.2.2.3 Courbes des réactances	15
I.2.3 influence des barres cassées sur la machine	16
I.2.3.1 Déformation du champ dans le circuit magnétique	16
I.2.3.2 Influence sur le courant statorique et rotorique	18
I.2.3.3 Influence sur le rendement de la machine	19
I.2.3.4 Influence sur le facteur de puissance	19

I.2.3.5 Influence sur le glissement	19
Conclusion	20

Chapitre II

Etude expérimentale de la machine asynchrone

Introduction	21
II.1 Présentation du matériel	21
II.1.1 Bonc d'essai	21
II.1.2 L'alimentation	22
II.1.3 Les machines asynchrones	22
II.1.4 Le variateur de vitesse	23
II.1.5 La charge entraînée.....	23
II.1.6 Les capteurs utilisés.....	24
II.1.7 La carte d'acquisition	24
II.2 Machine asynchrone alimenté par le réseau.....	25
II.2.1 Tension d'alimentation	25
II.2.2 Courant statorique	26
II.2.3 Vitesse de rotation	26
II.3 Machine asynchrone alimenté par un variateur de vitesse	27
II.3.1 Tension d'alimentation	28
II.3.2 courant statorique	28
Conclusion	29

Chapitre III

Rappelles sur le traitement du signal

Introduction	30
III.1 Types de signaux.....	30
III.1.1 Signaux déterministes	31
III.1.2 Signaux aliatoires	31
III.2 Transformée de Fourier.....	32
III.3 Théorème d'échantonnage	32
III.4 Transformée de Fourier discret	32
III.5 Méthodes non-paramétriques (Estimation spectrale).....	33
III.5.1 Péripdogramme	33
III.5.2 Périodogramme moyenné.....	34
III.5.3 Méthode de Welch	34
III.5.4 Méthode du miltitaper	35
III.6 Utilisation des fenetres	35
Conclusion	36
Introduction	21

CHAPITRE VI

Diagnostic de défauts de la machine asynchrone par traitement des signaux

Introduction	37
VI.1 L'analyse fréquentielle des courants statorique.....	37
VI.2 Application de la méthode de Welch au diagnostic	38
VI.2.1 Machine alimenté directement au réseau	39
VI.2.1.1 Spectre de courant	39
VI.2.1.2 L'amplitude des pics caractéristiques	39
VI.2.1.3 Interprétations et remarques	41
VI.2.2 Machine alimenté par le variateur de vitesse	41
VI.2.2.1 Spectre de courant	41
VI.2.2.2 L'amplitude des pics caractéristiques	42
VI.2.2.3 Interprétations et remarques	43
VI.3 Application du Périodogramme au diagnostic des défauts	44
VI.3.1 Spectre de courant	44
VI.3.2 L'amplitude des pics caractéristiques	45
VI.4 Utilisation du Multitaper	47
VI.4.1 spectre de courant.....	47
VI.4.2 L'amplitude des pics caractéristiques	48
VI.5 Comparaison et choix de la méthode	49
Conclusion	50
Conclusion générale	51
Recherche bibliographique.....	52
Annexe A	53
Annexe B.....	60
Annexe C.....	65

Introduction générale

Le moteur asynchrone est de beaucoup le moteur le plus utilisé dans toutes les applications industrielles ou domestiques de l'électricité, du fait de sa facilité de construction et d'installation, de son bon rendement et son faible coût d'achat et d'entretien, de sa robustesse mécanique ou encore sa quasi-absence d'entretien [1] [2].

La détection des défauts, si possible précoces, dans les entraînements électriques représente un enjeu scientifique du fait de la complexité et de la variété des problèmes posent ainsi qu'un enjeu industriel en raison de l'intérêt économique d'une stratégie efficace de maintenance prédictive [3].

Le travail proposé traite du diagnostic de défauts des machines asynchrones triphasées à cage d'écurie. La croissance de ce type de machine électrique, est telle que nous la trouvons maintenant dans tous les domaines industriels et en particulier dans les secteurs de pointe comme l'aéronautique, le nucléaire, la chimie ou encore les transports ferroviaires. A titre d'exemple, aux Etats-Unis, 70 millions de moteurs asynchrones sont fabriqués chaque année pour une population d'environ 300 millions de personnes. Toute proportion gardée, il est clair que ces moteurs nous conduisent à porter une attention de plus en plus sérieuse quant-à leur fonctionnement et leur disponibilité [2].

En effet, l'apparition d'un défaut conduit le plus souvent à un arrêt irrémédiable de la machine asynchrone entraînant, en conséquence, un coût de réparation non négligeable pour l'entreprise (cas des machines de fortes puissances), sans oublier la perte de production occasionnée [8].

Dans le premier chapitre, nous présentons un bref aperçu sur le diagnostic des machines asynchrones à cage d'écurie ainsi que les méthodes utilisées, puis nous abordons une étude analytique de machine asynchrone existe au laboratoire de recherche en électrotechnique de l'école nationale polytechnique en utilisant un programme de construction de la machine asynchrone. Avec ce programme nous traçons les performances dynamiques des différentes machines (saine, une barre cassée, deux barres cassées, jusqu'à 9 barres cassées).

Au second chapitre, le banc d'essai ainsi que les différents signaux relevés sont présentés, soit la machine est alimentée par le réseau industriel, soit par un variateur de vitesse.

Le troisième chapitre est un bref rappel sur les différents outils utilisés en traitement de signal pour l'étude expérimentale de la machine asynchrone, dans notre cas nous utilisons les méthodes non-paramétriques.

Le quatrième chapitre est consacré à l'application des méthodes non-paramétriques au diagnostic des défauts de la machine asynchrone, tel que les résultats sont présentés et discutés.

Nous terminons par une conclusion générale sur les objectifs assignés.

I. Diagnostic des défauts rotorique de la machine asynchrone par la méthode analytique

I.1 Aperçu sur le diagnostic de défauts des machines électriques

Le diagnostic et la détection des défauts mobilisent à ce jour beaucoup de chercheurs du monde, engendrant la mise en place, de plusieurs groupes de travail, sur la surveillance et le diagnostic. Multiples défaillances peuvent apparaître dans la machine asynchrone. Elles peuvent être prévisibles ou intempestives, mécaniques, électriques, magnétiques ou aussi hybrides. Leurs causes sont très variées [16]. L'étude des défauts des machines asynchrones a un double objectif :

- Comprendre leur genèse de manière à prévoir leur gravité et leur développement.
- Analyser leur impact sur le comportement de la machine et en déduire les signatures permettant, à posteriori, de remonter jusqu'à la cause de la défaillance.

D'autres termes le diagnostic des défauts de la machine asynchrone est très important pour assurer, une maintenance immédiate, précise, sûre, et assure aussi une délivrance préventive surtout dans l'échelle industrielle [14].

I.1.1 Défauts des machines asynchrones

I.1.1.1 Défaillances d'ordre mécanique

Les défaillances d'ordre mécaniques sont, en général, les plus rencontrées parmi tous les défauts que compte la machine asynchrone.

Ces défauts peuvent apparaître au niveau des roulements à billes, des flasques ou encore de l'arbre moteur. Certains de ces défauts sans pour autant en donner les détails. Nous pouvons trouver dans la littérature des ouvrages très complets qui traitent de ces divers problèmes.

- Défaillances des roulements.
- Défaillances du flasque.
- Défaillances de l'arbre.

I.1.2 Défaillances d'ordre électrique

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

- Défaillances des circuits électriques statoriques.
- Défaillances des circuits électriques rotoriques.

I.2 Méthodes de détection et de localisation

Pour effectuer le diagnostic d'une installation, les opérateurs de maintenance analysent un certain nombre de symptômes tels que le bruit, la température, les vibrations, etc., en s'appuyant sur leur expérience, ces symptômes ne sont que la manifestation flagrante d'une modification des caractéristiques temporelles et fréquentielles d'un certain nombre de grandeurs mesurables.

I.2.1 Aspect modélisation

La modélisation et la simulation des machines constituent une étape primordiale en matière de diagnostic. Elles permettent la compréhension du fonctionnement defectueux, la vérification sur le prototype virtuel de l'efficacité des algorithmes de détection de défauts et elles apportent également la possibilité de construire des bases des données sur les manifestations électriques et magnétiques de ces défauts.

Parmi les approches de modélisations existantes, nous en privilégions trois qui représentent chacune un niveau de complexité différent :

- approches analytiques,
- méthodes des schémas magnétiques,
- méthodes des éléments finies.

Ces trois méthodes ont chacune leur place sur la double échelle complexité/précision des approches de simulation. La méthode analytique est la plus simple à mettre en œuvre, vient ensuite celle des schémas magnétiques, enfin celle des

éléments finis, c'est cette dernière qui nécessite des moyens et des temps de calculs les plus importants.

I.2.2 Estimation des paramètres physiques

La détection des défaillances par estimation des paramètres physique est basée sur deux approches:

La première repose sur le suivi des paramètres électriques caractérisant le modèle. Il s'agit de détecter un écart entre l'évolution des paramètres au cours d'un fonctionnement sain et celle suivie par le système en présence de défauts.

La deuxième approche est consistée à analyser les résidus générés à partir d'un modèle proche du système à surveiller. Les résidus sont théoriquement nuls en fonctionnement normal et différents de zéro lorsqu'une défaillance survient, pour ressortir ses résidus on utilise les méthodes suivantes: gradient, Newton-Raphson, Levenbert-Marquardt [17] [22].

I.2.3 Estimation d'état

La détection de défauts par estimation d'état a surtout été étudiée avec le modèle de park. Les techniques de détection de défauts les plus répandues en automatique reposent sur la génération de résidus à partir d'un modèle de fonctionnement sain. Différentes approches, que l'on peut classer sous le terme générique d'estimation d'état, ont été étudiées et évaluées pour plusieurs méthodes.

Banc d'observateurs à entrées inconnues avec découplage non linéaire, sur la base du modèle de park, Observateur d'état à modes glissants, Génération de résidus par projection des équations du modèle de park dans l'espace de parité.

I.2.4 Traitement de signaux

Le traitement de signal, l'analyse spectrale plus particulièrement, est utilisé pour détecter des défaillances dans les machines, essentiellement les ruptures de barre, la dégradation des roulements, l'excentricité, les courts circuits dans les bobinages, Ces nombreux phénomènes se traduisent par l'apparition de fréquences directement liées à la vitesse de rotation.

L'analyse spectrale est certainement la méthode la plus naturelle pour le diagnostic des barres cassées.

La surveillance du courant stator MSCA (Motor Current Signature Analysis) est la méthode la plus utilisée, à cause de sa simplicité et la facilité de l'acquisition du courant stator contrairement à plusieurs autres méthodes [5] [18].

I.3 Quelques statistiques sur les défauts de la machine asynchrone

Différentes études statistiques ont été effectuées afin de déterminer la répartition des pannes dans les différentes parties des machines, les résultats des études les plus significatives [6], sont donnés dans le **Tableau (I.1)** :

Défauts	IEEE	EPRI
Roulement	44%	41%
Stator	26%	36%
Rotor	8%	9%
Autres	22%	14%

Tableau (I.1) : Répartition des défauts (IEEE, EPRI) [6] [24] [25].

Selon l'étude effectuée par l'EPRI (Electric Power Research Institute) sur des machines utilisées pour différentes applications dans de multiples domaines industriels, la **Figure (I.1)**, donne la répartition détaillée des différents défauts.

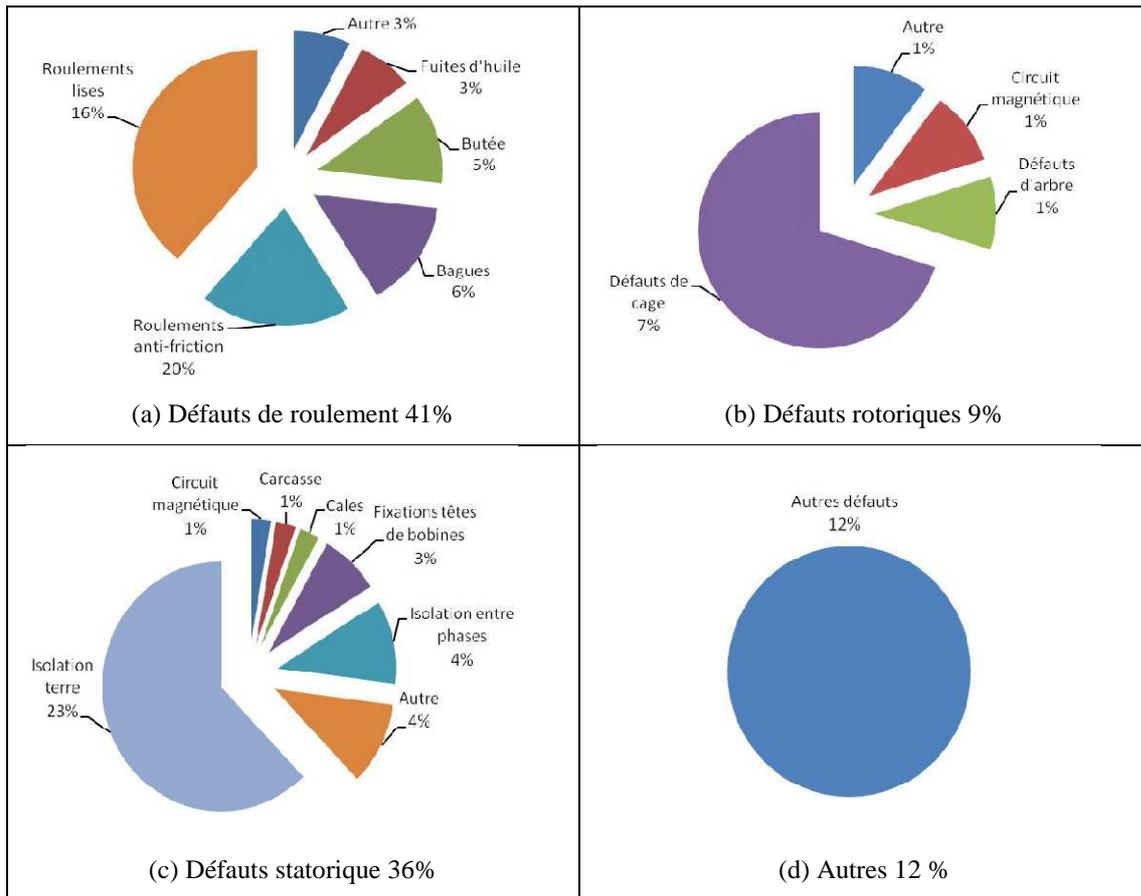


Figure (I.1): Répartition détaillée des défauts (EPRI) [6]

Nous avons fait une étude statistique lors d'un stage pratique effectué au sein d'un atelier de bobinage, pour des machines de puissance inférieure à 100kW, et nous avons relevé les résultats suivants :

Stator	40%
Roulement	35%
Rotor	5%
Autres	20%

Tableau (I.2): Répartition des défauts.

I.2 Comportement de la machine asynchrone en présence des barres cassées

La cassure des barres est l'un des défauts les plus fréquents au rotor des machines asynchrones, et puisque ces défauts n'apparaissent généralement que dans les machines à forte puissance, un système d'entretien devient indispensable dans ce cas.

A l'aide d'un programme de construction de machine asynchrone écrit en MATLAB[21], nous présentons dans ce sous chapitre l'influence de défaut des barres cassées sur les paramètres de la machine.

I.2.1 Présentation de la machine

I.2.1.1 Plaque signalétique

Nous exécutons le programme, nous prenons la plaque signalétique la même que celle de la machine existante au laboratoire de recherche en électrotechnique de l'école national polytechnique, présentée au **Tableau (I.3)**.

Puissance nominale	4 [kW]
Tension nominal	220/380 [V]
Courant nominal	8.83/15.3 [A]
Vitesse nominale	1435 [tr/min]
Facteur de puissance	0.83
Nombre de paire de pôles	2
Nombre d'encoches statorique	36
Nombres de barres rotorique	28

Tableau (I.3): Plaque signalétique de la machine asynchrone

I.2.1.2 Performances dynamiques

Utilisant le programme de construction de la machine asynchrone on trace les performances dynamiques de la machine:

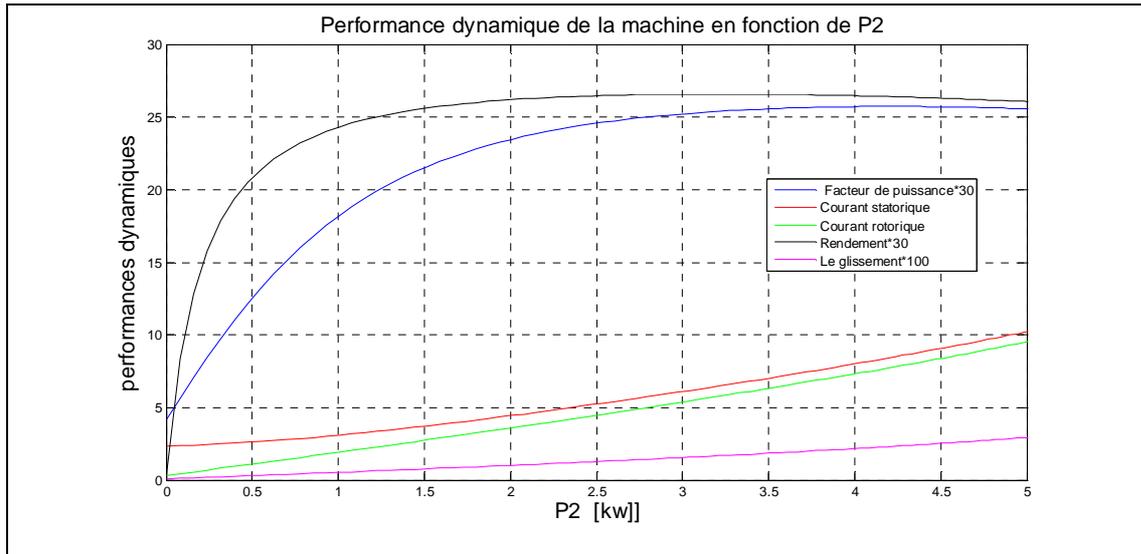


Figure (I.2): les performances dynamiques de la machine asynchrone

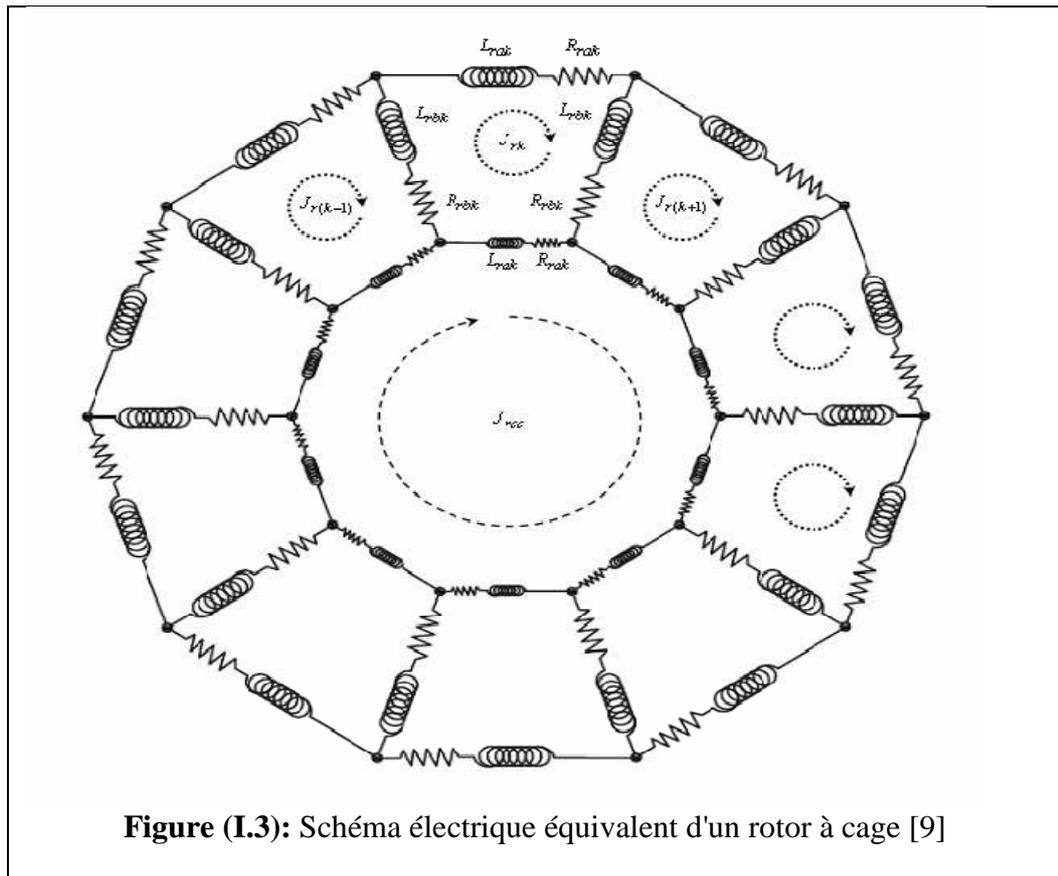
On remarque que ces performances sont meilleures autour de point de fonctionnement nominal de la machine, et on constate que la plaque signalétique est vérifiée avec les résultats du programme.

I.2.2 Modèle du rotor de la machine asynchrone

I.2.2.1 Rotor sain

I.2.2.1.1 Circuit électrique du rotor à cage sain

La cage d'écuriel de la machine asynchrone se compose de Z_2 encoches rotoriques qui peuvent être soit ouvertes soit fermées sur l'entrefer. Cette cage forme (Z_2+1) circuits électriques rotoriques indépendants. En effet, si nous considérons deux barres rotoriques adjacentes ainsi que les segments d'anneau de court-circuit les reliant, nous obtenons une boucle rotorique fermée qui peut être étudiée comme circuit électrique. Chaque barre rotorique est modélisée par une inductance en série avec une résistance, tout comme chaque segment de court-circuit [8].



I.2.2.1.2 Résistance rotorique équivalente

La résistance rotorique est donnée par la formule suivante [7]:

$$R_r = r_b + \frac{r_{ann}}{2(\sin(\frac{\pi \cdot P}{Z_2}))^2} \quad (I.1)$$

- Avec r_b c'est la résistance d'une barre rotorique et r_b est égale [7]:

$$r_b = \frac{\rho_{AL} l_\delta}{S_b} \quad (I.2)$$

ρ_{AL} : Résistivité d'aluminium, tel que $\rho_{AL} = 4.87 \cdot 10^{-8} [\Omega \cdot m]$

S_b : la section de la barre

l_δ : la longueur de la barre

- Et r_{ann} c'est la résistance d'une portion d'anneau de court-circuit, elle est donnée par la formule (I.3) [7].

$$R_{ann} = \pi \cdot \rho_{AL} \left(\frac{D_{ann}}{Z_2 \cdot S_{ann}} \right) \quad (I.3)$$

I.2.2.1.3 Résistance rotorique ramenée au stator

La résistance du rotor doit être exprimée en termes d'enroulement du stator avant que nous puissions l'utiliser dans le circuit équivalent du moteur. À l'arrêt, le moteur agit comme un transformateur. La résistance du rotor est ramenée à la tension primaire (vue des bornes du stator) est donc égale à toute la résistance du rotor multiplier le rapport de transformation. [10]

$$r_2' = r_2 \cdot K_{red} \quad (I.4)$$

$$\text{avec } k_{red} = \frac{4 \cdot m (N_1 \cdot K_{bob1})^2}{Z_2} \quad (I.5)$$

m: nombre de phases.

K_{bob1} : facteur de bobinage

I.2.2.1.4 Réactance rotorique équivalente

Cette réactance de fuite est donnée par l'expression suivante [7]:

$$X_r = 7,9 \cdot f \cdot l_\delta \cdot (\lambda_{z2} + \lambda_{diff2} + \lambda_{pf2}) \cdot 10^{-6} \quad (I.6)$$

λ_{z2} : Perméance d'encoche rotorique

λ_{diff2} : Perméance différentielle

λ_{pf2} : Perméance de l'anneau

I.2.2.1.5 Réactance rotorique ramené au stator

La réactance rotorique ramenée au stator est :

$$X_2' = X_2 \cdot K_{red} \quad (I.7)$$

I.2.2.1.6 Circuit électrique équivalent par phase

Pour calculer tous les performances dynamiques de la machine on utilise le schéma équivalent en Γ

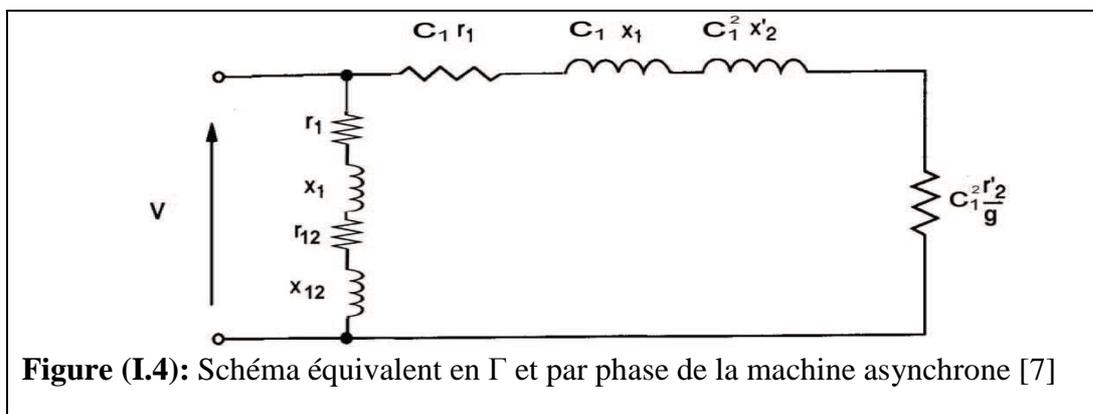


Figure (I.4): Schéma équivalent en Γ et par phase de la machine asynchrone [7]

Avec C_1 est le facteur de correction, son expression est [7]:

$$C_1 = 1 + \frac{Z_{e1}}{Z_{e12}} \quad (\text{I.8})$$

$$Z_{e1} = r_1 + j \cdot X_1 \quad (\text{I.9})$$

$$Z_{e12} = r_{12} + j \cdot X_{12} \quad (\text{I.10})$$

$$\Rightarrow C_1 = \|C_1\| [\cos(\gamma_1) + j \sin(\gamma_1)]$$

Et γ_1 c'est l'angle d'inclinaison de la droite du diagramme du cercle.

I.2.2.1.7 Calcul d'impédance

Du circuit électrique de la **Figure (I.4)**

$$Z = R + j \cdot X \quad (\text{I.11})$$

$$Z = (C_1 \cdot r_1 + \frac{C_1^2 r_2'}{g}) + j(C_1 \cdot X_1 + C_1^2 \cdot X_2') \quad (\text{I.12})$$

Remplaçant C_1

$$\begin{aligned} Z &= \|C_1\| r_1 [\cos(\gamma_1) + j \sin(\gamma_1)] + \|C_1\| X_1 [\cos(\gamma_1) + j \sin(\gamma_1)] + \|C_1\|^2 X_2' [\cos(2\gamma_1) + \\ & j \sin(2\gamma_1)] + \|C_1\|^2 \frac{r_2'}{g} [\cos(2\gamma_1) + j \sin(2\gamma_1)] \\ &= \|C_1\| r_1 \cos(\gamma_1) - \|C_1\| X_1 \sin(\gamma_1) - 2 \|C_1\|^2 X_2' \cos(\gamma_1) \sin(\gamma_1) + \frac{r_2'}{g} \|C_1\|^2 \cos(\gamma_1) \\ &+ j [\|C_1\| r_1 \sin(\gamma_1) + \|C_1\| X_1 \cos(\gamma_1) + \|C_1\|^2 X_2' \cos(2\gamma_1) + \frac{r_2'}{g} \|C_1\|^2 \sin(\gamma_1)] \end{aligned}$$

Donc l'expression final est sous forme

$$R = a + \frac{a' r_2'}{g} \quad (\text{I.13})$$

$$X = b + \frac{b' r_2'}{g} \quad (\text{I.14})$$

$$\text{Avec } a = \|C_1\| r_1 \cos(\gamma_1) - \|C_1\| X_1 \sin(\gamma_1) - 2 \|C_1\|^2 X_2' \cos(\gamma_1) \sin(\gamma_1) \quad (\text{I.15})$$

$$a' = \|C_1\|^2 \cos(\gamma_1) \quad (\text{I.16})$$

$$b = \|C_1\| r_1 \sin(\gamma_1) + \|C_1\| X_1 \cos(\gamma_1) + \|C_1\|^2 X_2' \cos(2\gamma_1) \quad (\text{I.17})$$

$$b' = \|C_1\|^2 \sin(\gamma_1) \quad (\text{I.18})$$

I.2.2.2 Rotor avec des barres cassées

I.2.2.2.1 Circuit rotorique équivalent d'un rotor défaillant

La cassure d'une barre au rotor élimine une maille et au même temps forme une nouvelle maille non identique aux autres, comme il est illustré dans la **Figure (I.5)**. Et la même pour une machine avec N barres cassées, tel que N dans ce travail est comprise entre 1 et 9.

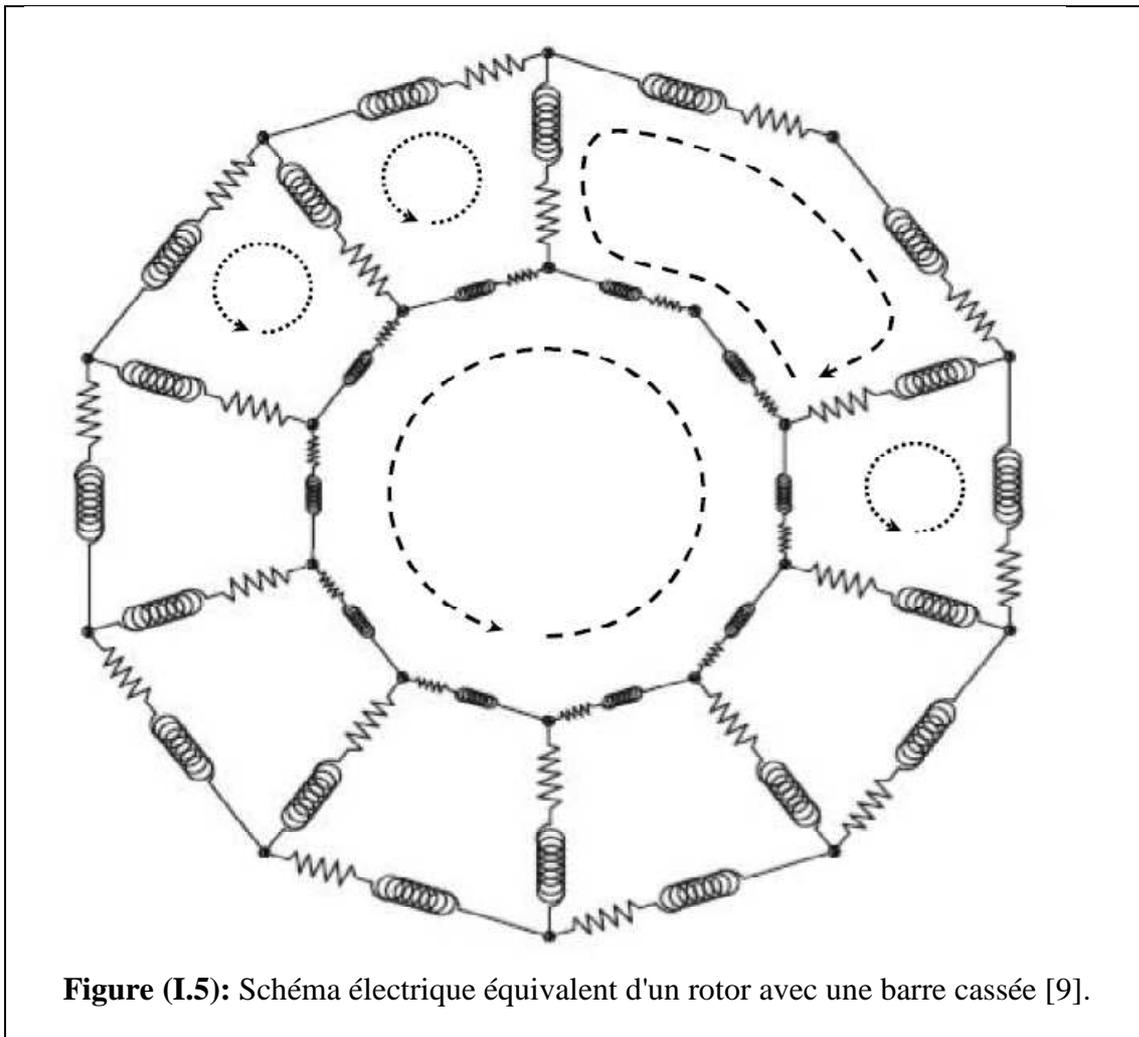


Figure (I.5): Schéma électrique équivalent d'un rotor avec une barre cassée [9].

Et donc la résistance et la réactance équivalente d'un rotor avec N barres cassées sont respectivement:

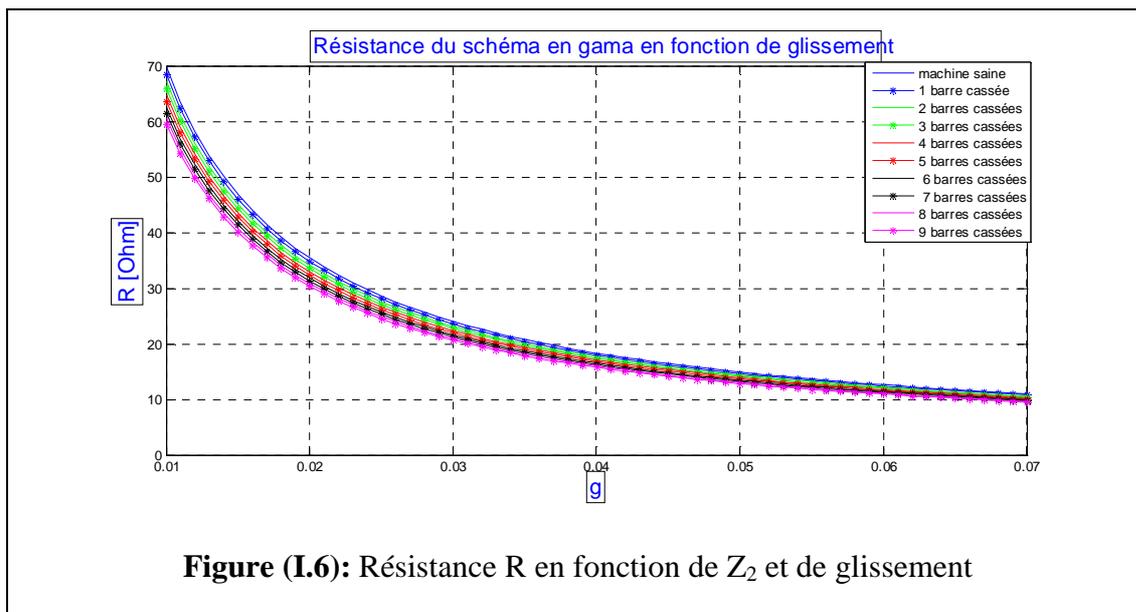
$$R_r = r_b + \frac{r_{ann}}{2 \left(\sin \left(\frac{\pi P}{Z_2 - N} \right) \right)^2} \quad (I.19)$$

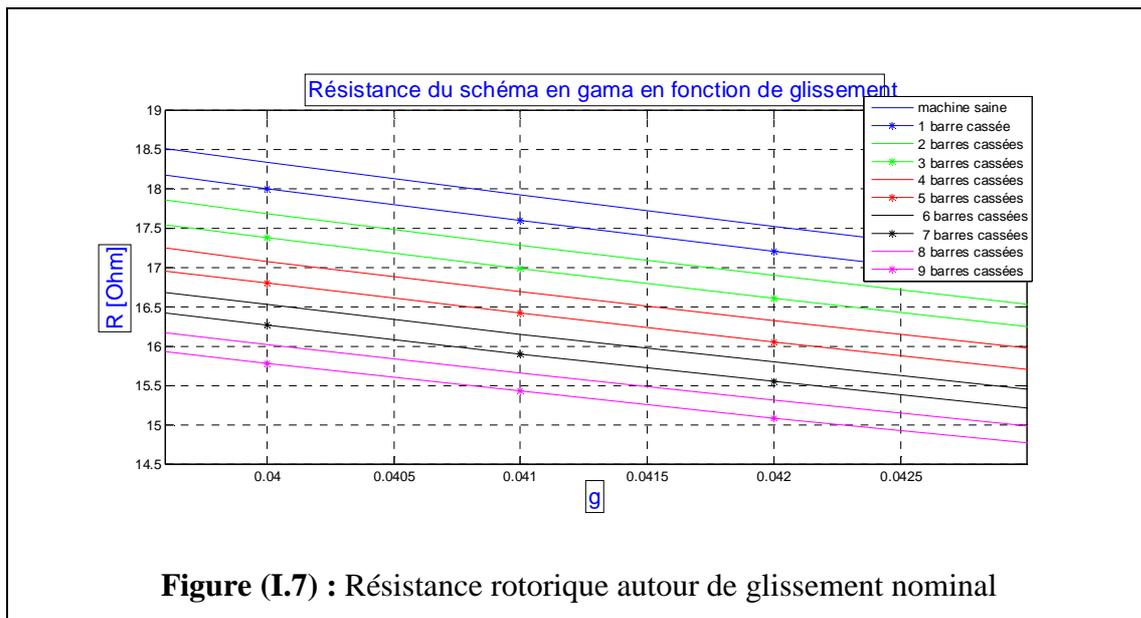
$$X_r = r_b + \frac{X_{ann}}{2 \left(\sin \left(\frac{\pi P}{Z_2 - N} \right) \right)^2} \quad (I.20)$$

N: le nombre de barres cassées.

I.2.2.2.2 Courbes des résistances

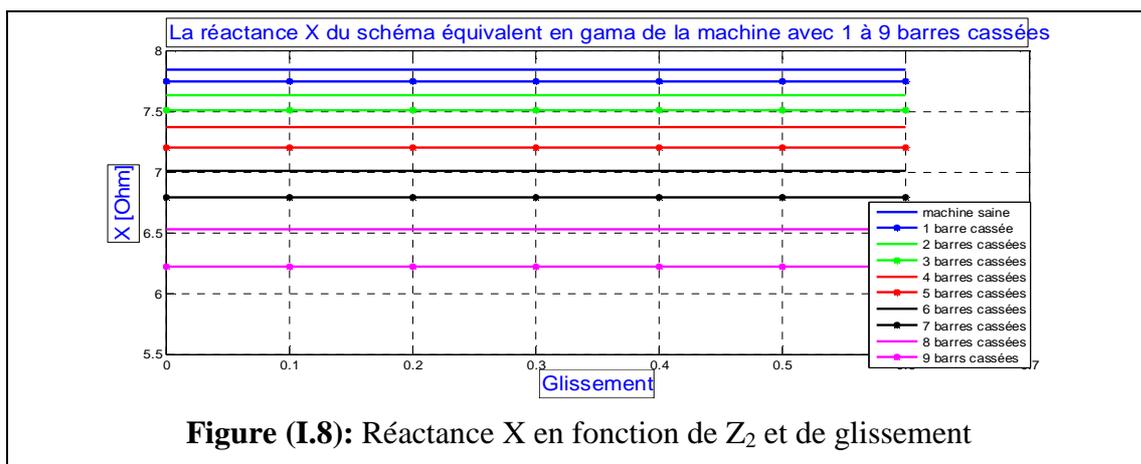
D'après l'équation (I.19), il est clair que si la machine perd une barre rotorique, sa résistance équivalente va diminuer. Et à l'aide du programme de construction de machine asynchrone, nous traçons les courbes de la résistance pour chaque barre cassée en fonction du glissement.





I.2.2.3 Courbes des réactances:

Le même pour les réactances, analytiquement, si le nombre des barres au rotor diminue la réactance rotorique diminue, d'après l'équation (I.20), mais tellement la constante b' est négligeable, la réactance rotorique ne varie pas en fonction du glissement, comme il est illustré dans la **Figure (I.8)**.



On remarque que la réactance reste constante quand le glissement augmente, cela est dû à l'angle γ_1 qui a une relation avec la puissance du moteur, il est nul pour des

moteurs à faible puissance, alors la réactance équivalente ne dépend que des deux réactances de fuite x_1 et x_2' qui sont à leurs tours fonction du nombre de barres cassées.

I.2.3 Influence des barres cassées sur la machine

A l'aide du programme de construction de la machine asynchrone écrit en MATLAB, nous allons étudier l'impact d'un défaut de barre sur l'évolution des différentes grandeurs de la machine asynchrone.

2.3.1 Déformation du champ dans le circuit magnétique

Quand les barres du moteur sont cassées, le courant de ces barres va distribuer au barres adjacentes, donc ces barres vont subir des courants relativement élevés, qui peuvent saturer le stator et les dents rotorique qui sont prés des barres ajacentes, ce qui induit une distrubution asymétrique du flux aimenté [11]. La **Figure (I.9)** montre la distrubution symetrique du flux dans la machine saine, et asymétrique dans la machine difectuese (barres cassées).

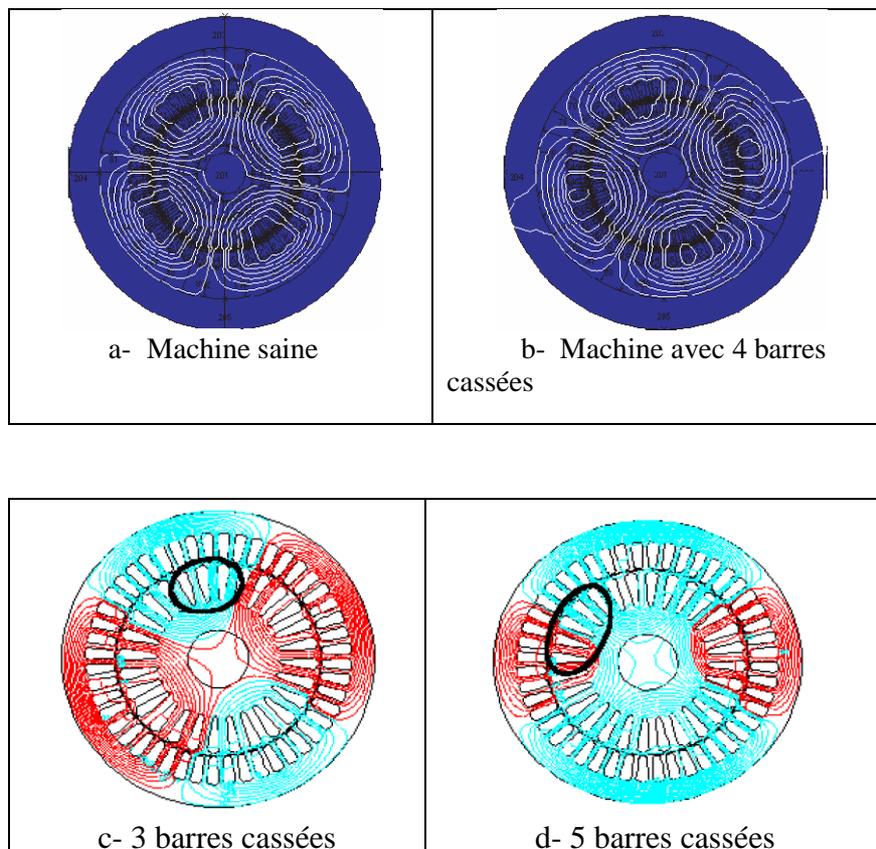


Figure (I.9): Distribution de champ magnétique. [11,4]

I.2.3.2 Influence sur les courants statorique et rotorique

Comme nous avons indiqué précédemment le courant de la barre cassée va distribuer aux barres adjacentes, ce qui induit une augmentation des courants dans ces barres saine, et avec le temps ces barres vont détériorer sous l'effet thermique à cause de cette surintensité. Les **Figures (I.10)** et **(I.11)**, présentent l'évolution des courants statorique et rotorique en fonction du glissement pour une machine asynchrone saine, et pour une machine de 1 à 9 barres rotorique cassées.

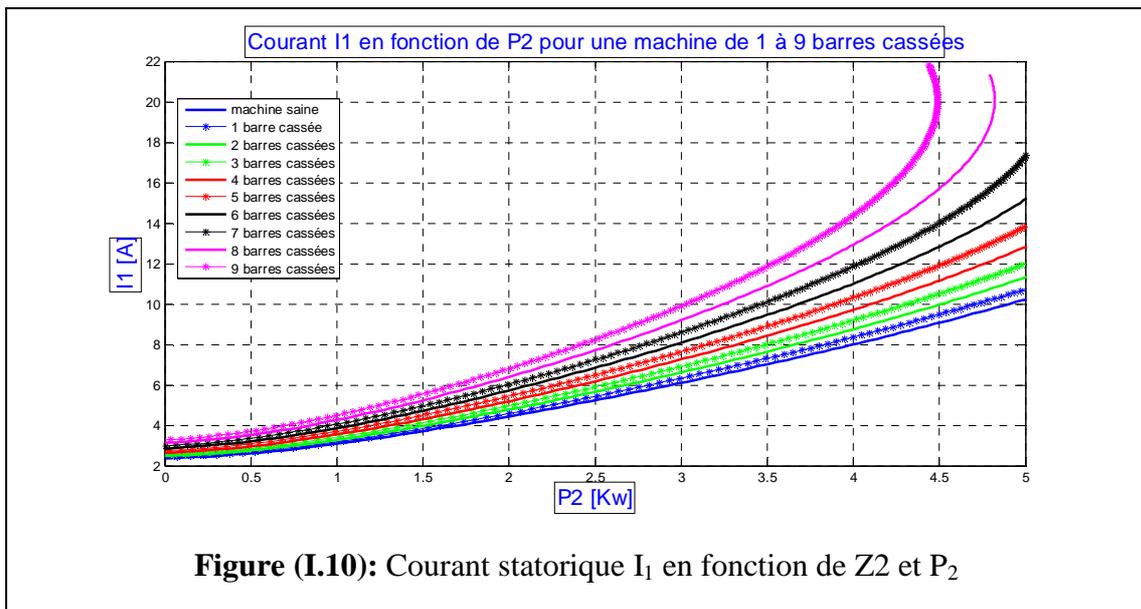


Figure (I.10): Courant statorique I_1 en fonction de Z_2 et P_2

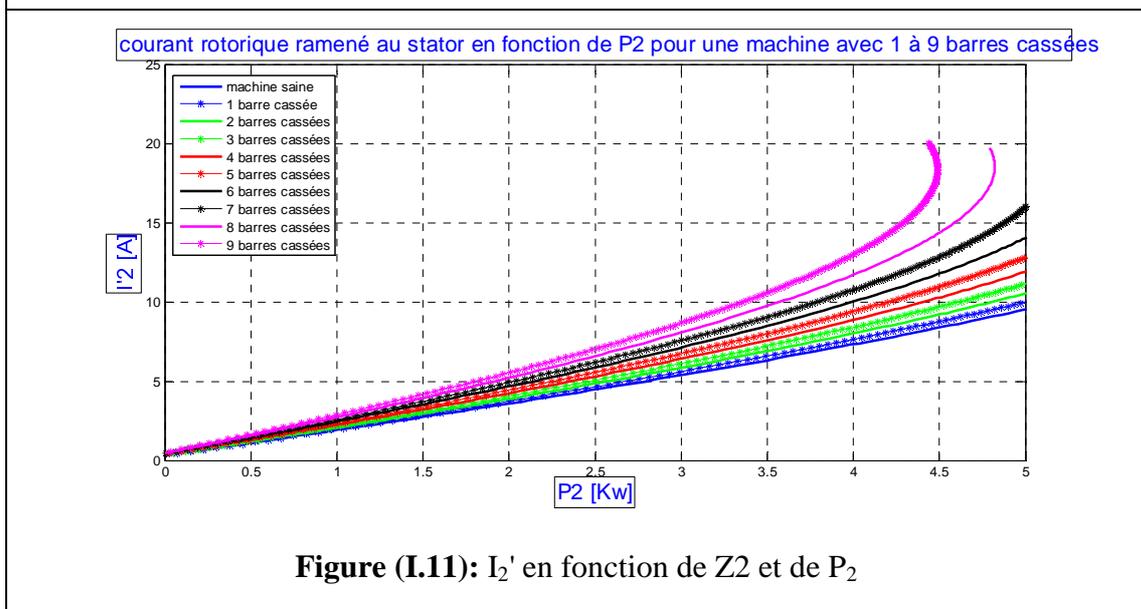


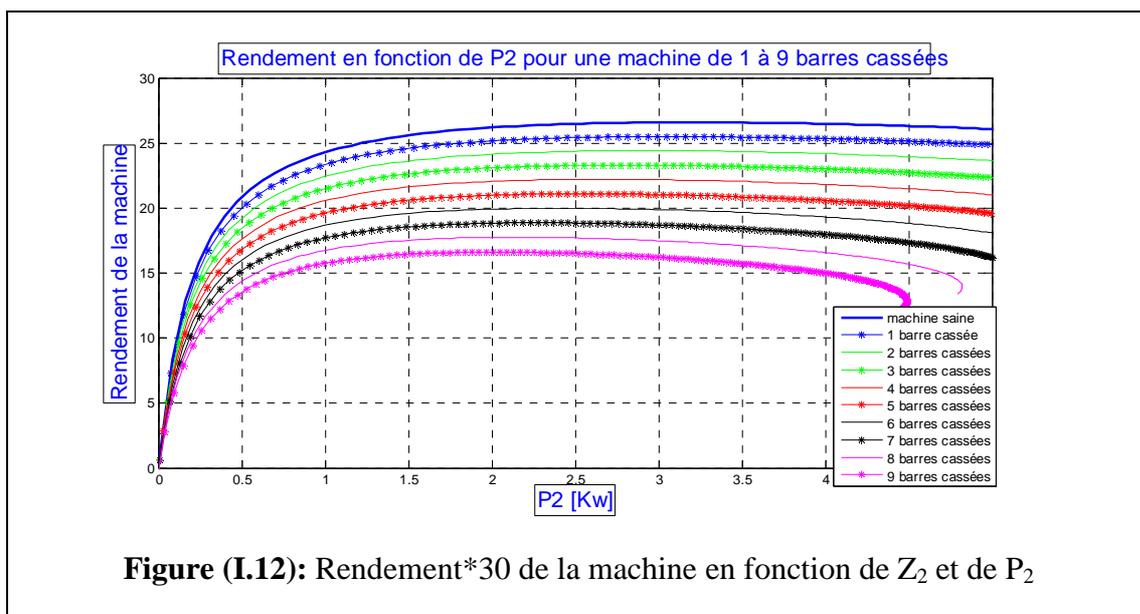
Figure (I.11): I_2' en fonction de Z_2 et de P_2

On remarque que les deux courants ont la même allure, juste que le courant absorbé par la machine est supérieur au courant rotorique ramené au stator, et ça dû au courant du branche magnétisante.

Et on remarque aussi que le courant I_2' augmente quand le nombre de barres cassées augmente car la résistance R diminue. Cette augmentation devient remarquable ou importante à partir de deux barres cassées. La **Figure (I.10)** montre que par exemple au point de fonctionnement nominal, le courant absorbé par la machine saine est de 8 A, et pour la machine avec 6 barres cassées est de 11 A, cet écart est relativement important, qui peut causer la cassure des autres barres.

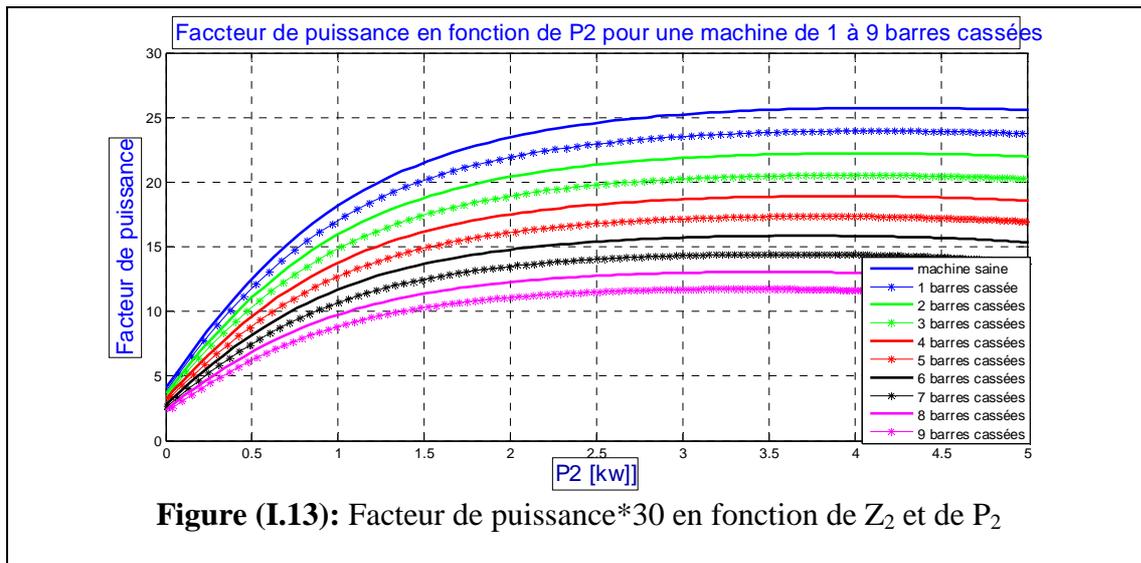
I.2.3.3 Influence sur le rendement de la machine

Le rendement part de zéro à vide et croît avec la puissance utile suivant une caractéristique ayant à peu près la même allure pour toutes les machines tournantes. Il doit avoir une valeur voisine de son maximum pour le fonctionnement nominal. Il est d'autant meilleur que l'on n'impose pas au rotor d'être résistant et que les conditions d'utilisation du moteur permettent un mode de refroidissement plus efficace. Et l'effet des barres cassées devient remarquable à partir de deux barres cassées. La **Figure (I.12)** montre que le rendement est de 90% pour la machine saine, et de 67% pour la machine avec 6 barres cassées.



I.2.3.4 Influence sur le facteur de puissance

On sait bien que le facteur de puissance et le rendement ne sont relativement pas loin, tel que si $\cos\phi$ est faible le rendement aussi va être faible, et le contraire juste, si le $\cos\phi$ est bon alors que le rendement est bon. La **Figure (I.13)** montre que $\cos\phi$ augmente avec l'augmentation de la puissance dans l'intervalle P_2 $[0, P_{2n}]$, et diminue dans l'intervalle P_2 supérieur à P_{2n} . et aussi $\cos\phi$ diminue avec l'augmentation des barres cassées, cette diminutions devient importante à partir de 2barres cassées.



La **Figure (I.13)** montre que par exemple que le facteur de puissance est de 86% pour la machine saine, et de 63% pour la machine avec 4 barres cassées, et pour 9 barres cassées il est de 40%.

I.2.3.5 Influence sur le glissement

Le glissement d'une machine asynchrone est en fonction de nombre de pôles et la vitesse rotorique, tel que:

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s} \quad (I.21)$$

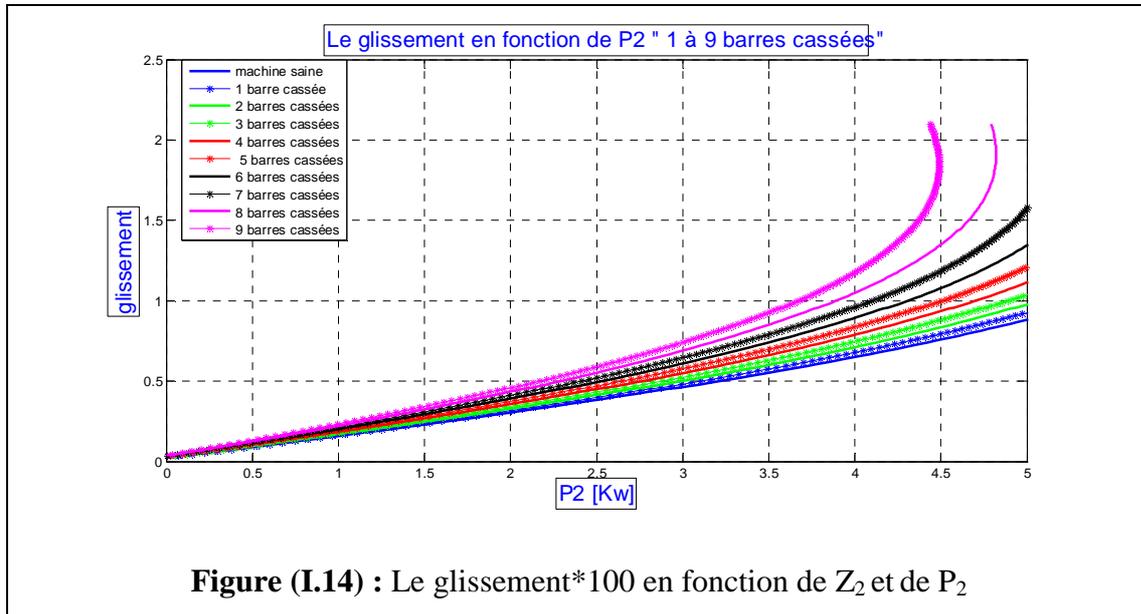
Ω_s c'est la vitesse du champ tournant, $\Omega_s = \frac{2\pi f_s}{p}$

f_s c'est la fréquence des courants statorique.

p : nombre de paires de pôles.

Et la vitesse rotorique dépende de la charge entraînée, ou bien du courant absorbé, et nous avons indiqué précédemment que le courant absorbé augmente avec l'augmentation des barres cassées, ce qui implique une diminution de la vitesse rotorique

ensuite l'augmentation du glissement. **La Figure (I.14)** montre que le glissement augmente quand les barres cassées augmentent.



Conclusion

L'utilisation des relations déduites du schéma équivalent en Γ , permet de tracer les différentes caractéristiques d'un moteur asynchrone en fonction de la charge qui varie entre $P_2=0W$ (fonctionnement à vide) et $1.2 \cdot P_{2n}$ et en fonction des barres rotorique cassées.

L'étude analytique de défaut nous à permis d'analyser et d'expliquer l'influence des cassures de barres sur les performances dynamiques du moteur. Cette étude paraît d'être efficace pour l'utilisation dans le domaine du diagnostic de défauts rotorique, car elle montre clairement la variation des différentes caractéristiques en fonction du défaut.

II. Etude expérimentale de la machine asynchrone

Introduction

Par avant la machine asynchrone était réservée aux entraînements électriques à vitesse constante à cause de la difficulté de sa commande, cette difficulté est disparue avec le développement dans le domaine de l'électronique de puissance, et parmi les convertisseurs qui permet une commande efficace pour la machine asynchrone à cage d'écuréuil, le variateur de vitesse, qui devient l'un des composants essentiel dans les installations électriques industrielles.

Dans ce chapitre nous présentons une étude comparative entre des machines asynchrone (saine et défectueuses), alimentées une fois directement par le réseau et puis par un variateur de vitesse.

II.1 Présentation du matériel

II.1.1 Banc d'essai

Laboratoire de recherche en électrotechnique de l'école nationale polytechnique est équipé d'un banc d'essai pour le diagnostic des défauts des machines électriques qui est présenté dans la **Figure (II.1)**.



Figure (II.1): Banc d'essai.

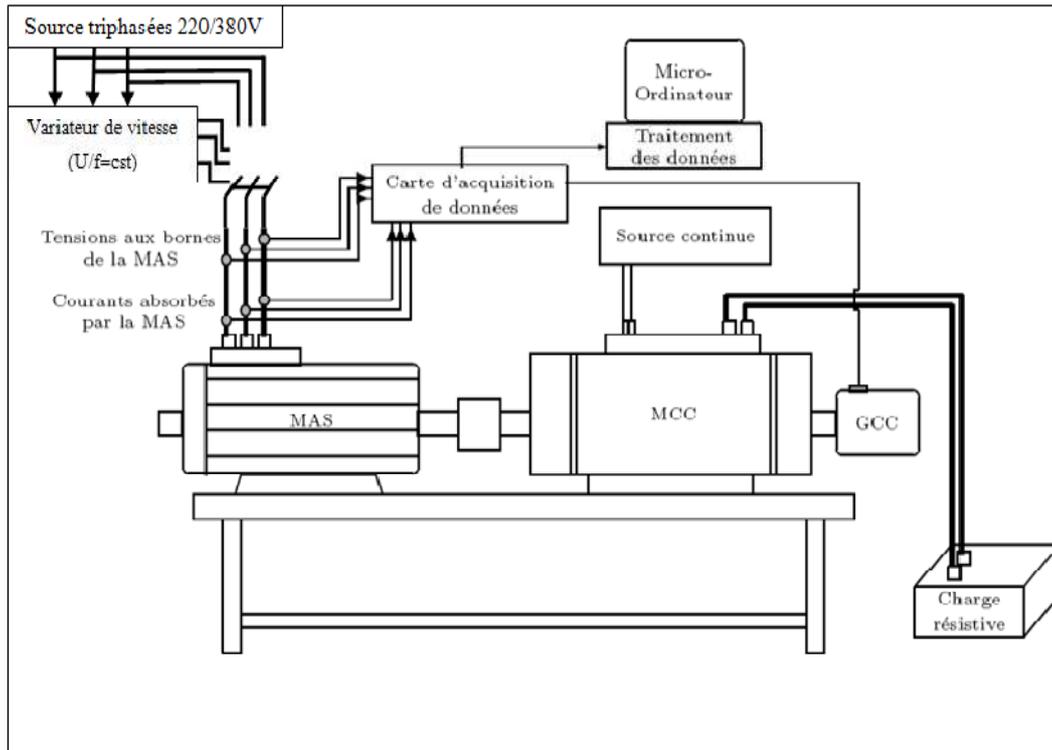


Figure (II.2): Banc d'essai -schéma de principe- [14]

II.1.2 L'alimentation

La source d'alimentation est triphasée équilibrée 127/220 V, avec cette source on alimente soit les machines, soit le variateur de vitesse dans le cas d'une alimentation onduleur.

II.1.3 Les machines asynchrones

Pour avoir étudié tous les défauts rotorique d'ordre électrique de la machine asynchrone à cage d'écuréuil, le laboratoire est équipé de quatre machines dont les caractéristiques sont identiques et sont données dans le **Tableau (I.4)**:

- Machine saine, est considérée comme une machine de référence.
- Machine avec une barre rotorique cassée.
- Machine avec deux barres rotorique cassées.
- Machine avec une portion d'anneau de court circuit enlevé.



Figure (II.3): Différents rotor des machines utilisés.

II.1.4 Le variateur de vitesse

Le variateur de vitesse utilisé est un variateur qui fonctionne à U/f constant et qui permet de varier la fréquence des courants d'alimentation entre 0 à 50 Hz.



Figure (II.4): Variateur de vitesse.

II.1.5 La charge entraînée

La charge mécanique entraînée par la machine asynchrone est une génératrice à courant continu (excitation séparée), sa plaque signalétique est donnée dans le **Tableau (II.1)** et cette génératrice alimente des charges électriques résistives.

Puissance nominale	2.4 kW
Tension nominale	220 V
Courant d'induit nominal	10,9 A
Vitesse nominale	1410 tr/min
Courant d'excitation	3 A

Tableau (II.1): Plaque signalétique de la machine à courant continu.



Figure (II.5): La machine asynchrone et la charge.

Vu que la puissance nominale de la machine à courant continu n'est que de 2.4 kW, la charge maximale de la machine asynchrone est d'environ 70% de sa charge nominale.

Une génératrice tachymétrique montée directement sur l'arbre de la machine à courant continu est utilisée pour le relevé de la vitesse.

II.1.6 Les capteurs utilisés

Il s'agit de trois capteurs à effet HALL, un capteur de courant, un de tension et l'autre de vitesse, ces capteurs ont une sensibilité qui permet de capter des signaux avec des fréquences qui peuvent aller jusqu'à 200 KHz.

Ces trois capteurs permettent de relever la signature des courants statorique, tensions statorique et la vitesse de rotation pour les quatre machines.

II.1.7 La carte d'acquisition

Une carte d'acquisition IOTEQ/DAQ séries 1005 ayant une fréquence d'échantillonnage de 200kHz, 16 entrées analogiques, 16 entrées digitales et toutes les entrées peuvent être utilisées comme des sorties, la carte est montée dans un ordinateur et connectée à la carte de conditionnement par câble série pour le transfert des données, en plus la carte a une compatibilité avec plusieurs logiciels comme MATLAB et LABVIEW...etc.

Pour notre cas nous avons utilisé le logiciel qui équipe la carte appelée DAQVIEW, ce dernier réalise toutes les tâches nécessaires telles que :

- Variation de la fréquence d'échantillonnage,

- Variation du nombre de points à relever,
- Enregistrement des données sous un fichier de formats (MAT, ASCII, DAT,)
- Visualisation des signaux en temps réel,
- Relever plusieurs signaux en même temps,
- Analyse fréquentielle,

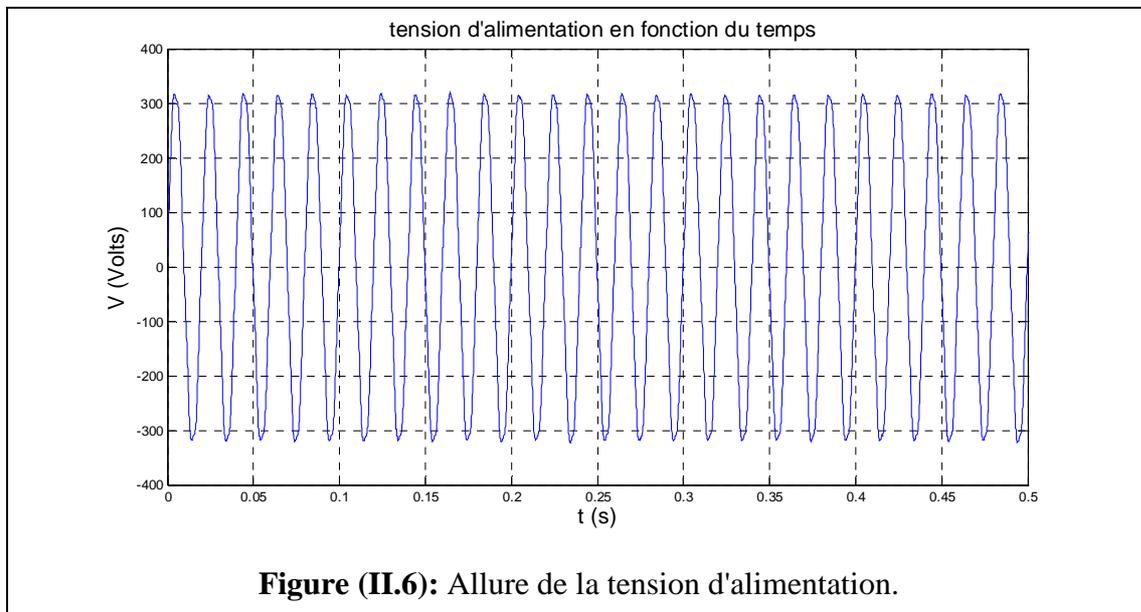
Pour une meilleure résolution en fréquence et pour éviter l'interférence entre les harmoniques, il faut choisir:

- Une fréquence d'échantillonnage de 10000Hz.
- 10s d'enregistrement qui donne un vecteur de 100000 éléments enregistrés

II.2 Machine asynchrone alimentée par le réseau

II.2.1 Tension d'alimentation

Le capteur de tension donne la forme de tension de la **Figure (II.6)** pour une alimentation réseau.



On remarque que la tension du réseau a une forme sinusoïdale propre, qui ne contient pas des déformations, et ne dépend pas de la machine, défectueuse ou non.

II.2.2 Courant statorique

Les défauts de cassures des barres, ou des portions d'anneau de court circuit engendrent des ondulations dans le courant statorique, comme on peut le voir sur la **Figure (II.7)**, où on constate que l'ondulation du courant de la machine avec deux barres cassées est plus importante que celle d'une barre ou portion d'anneau de court-circuit cassée qui sont quasiment identiques.

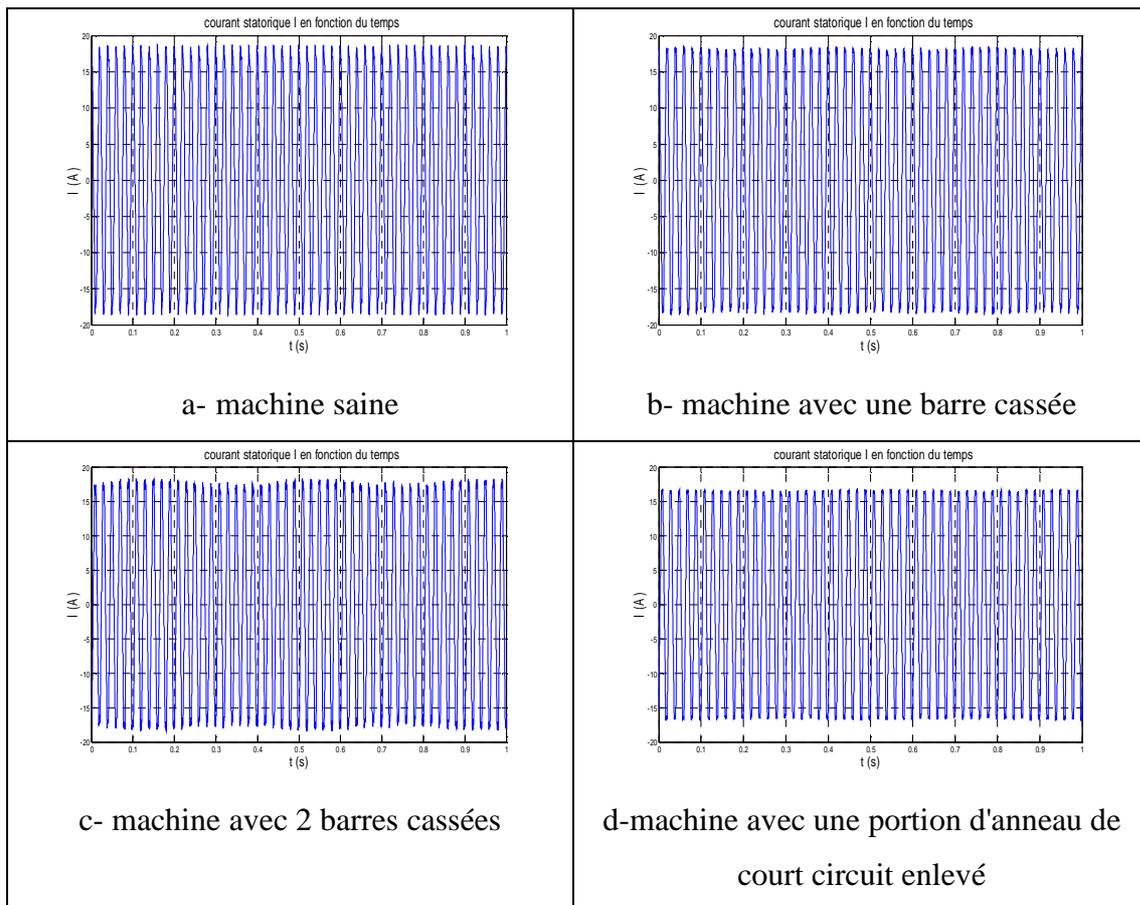


Figure (II.7): Allures des courants statoriques a) machine saine, b) une barre cassée, c) deux barres cassées, d) portion d'anneau de court circuit cassé.

II.2.3 Vitesse de rotation

Les cassures des barres et portion d'anneau de court-circuit ont pour effet l'augmentation du régime transitoire de la vitesse. Et plus le nombre de barres cassées est élevé, la constante de temps mécanique est grande [15].

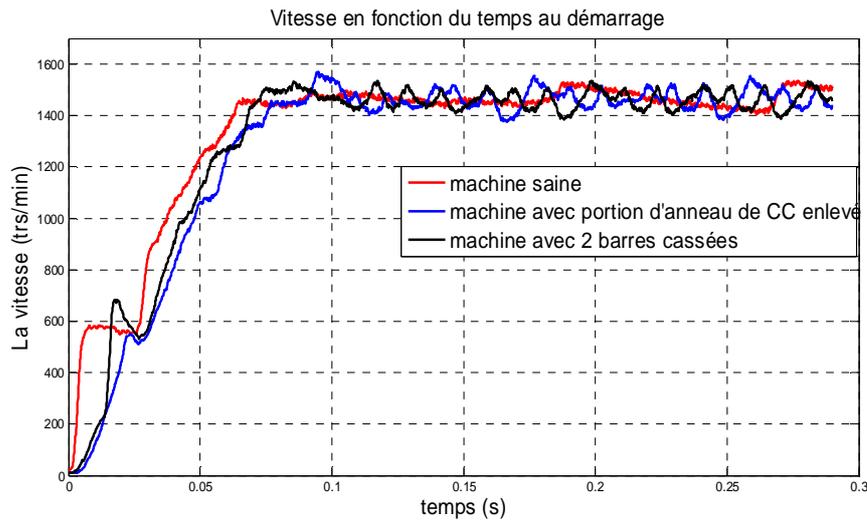


Figure (II.8): Evolution de la vitesse au démarrage.

On remarque que la présence d'un défaut (soit rupture des barres ou l'anneau de court circuit) fait apparaître des ondulations de la vitesse en régime permanent de la machine, et a aussi pour effet d'augmenter la constante de temps, ce qui implique un régime transitoire lent.

II.3 Machine asynchrone alimentée par un variateur de vitesse

Un variateur de vitesse est un ensemble de deux convertisseurs, un redresseur et un onduleur, ce dernier est alimenté par le redresseur, et presque toujours un onduleur fonctionnant à fréquence variable.

Dans les entraînements à vitesse variable d'un moteur asynchrone, le convertisseur fournit à la machine des tensions ou des courants de fréquences variable riches en harmoniques. La machine a un fonctionnement et des caractéristiques qui diffèrent notablement de ceux qu'elle a lorsqu'elle est alimentée par les tensions de fréquence fixe pratiquement sinusoïdales du réseau industriel [13].

Les harmoniques qu'il produit dans le courant redressé et dans courants en ligne ont des fréquences qui ne sont ni des multiples ni des sous-multiples entiers de la fréquence du réseau [13]. Pour celui-ci, on les appelle les interharmoniques.

II.3.1 Tension d'alimentation

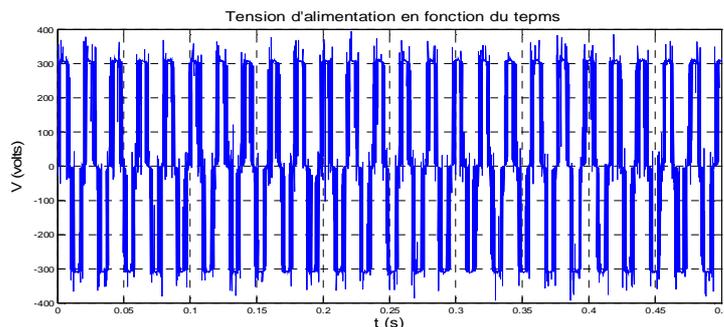


Figure (II.9): Allure de la tension pour une alimentation onduleur.

II.3.2 Courant statorique

Les ondulations du courant statorique deviennent plus importantes dans le cas où la machine est alimentée par un onduleur, comme il est illustré dans la **Figure (II.10)**, tel qu'on voit que ce type d'alimentation engendre aussi des ondulations du courant statorique de la machine saine.

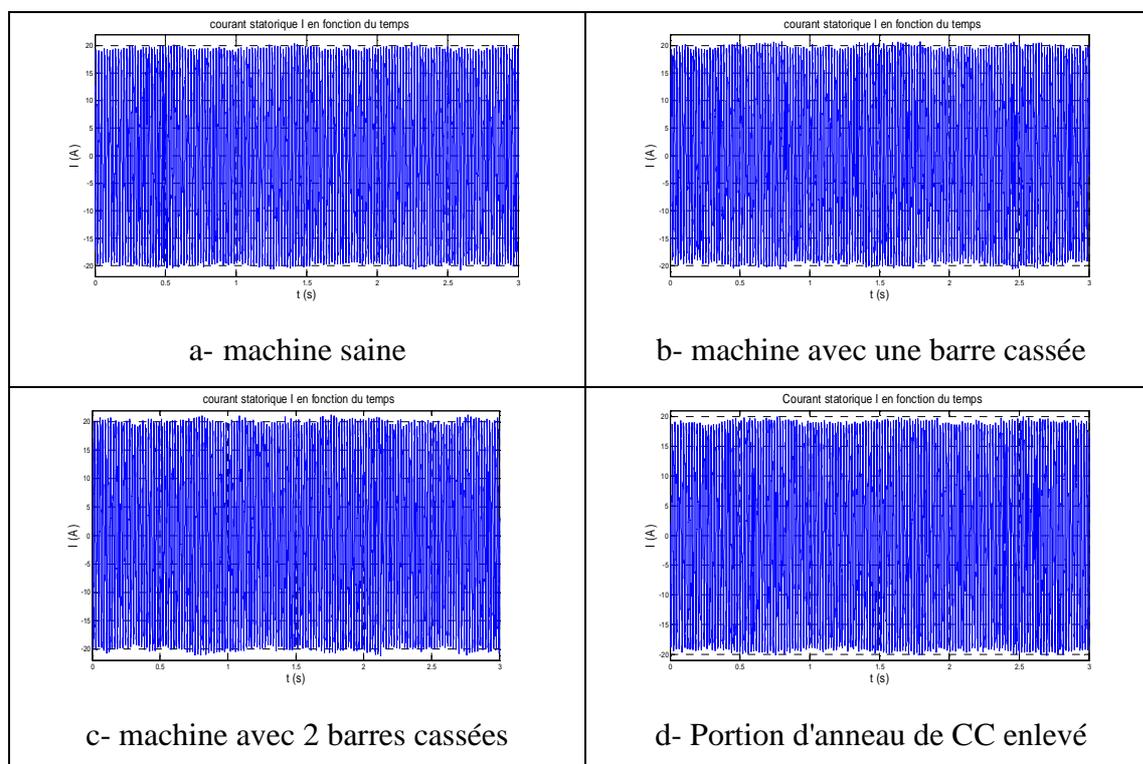


Figure (II.10) : Allures des courants statoriques, a) machine saine, b) une barre cassée, c) deux barres cassées, d) portion d'anneau de court circuit cassé.

Conclusion

Le fonctionnement de notre moteur asynchrone devient altéré à partir de la rupture de deux barres adjacentes, ce défaut connaît un effet cumulatif lors de rupture de barres. Les barres saines adjacentes au défaut sont plus sollicitées et vieillissent prématurément. Toutefois, ce défaut peut aussi générer des ruptures de portions d'anneau de court circuit.

L'objectif de ce chapitre est de faire apparaître les oscillations sur les courants et la vitesse de rotation, causées par la rupture des barres et l'anneau de court circuit. Nous avons étudié aussi l'effet de l'alimentation de la machine asynchrone par un onduleur (variateur de vitesse) sur le courant, la tension.

III. Rappels sur le traitement de signal

Introduction

Dans le but d'appliquer la méthode d'analyse spectrale du courant statorique pour le diagnostic de différents défauts de la machine asynchrone nous présentons dans ce chapitre les outils de traitement du signal.

On distingue deux types de signaux selon leurs origines qui peuvent être mécanique (Couple, vitesse, vibrations) ou bien électrique (Tensions, courants).

Ces signaux sont généralement périodiques et la méthode d'analyse de base est l'estimation de la densité spectrale de puissance basée sur la transformée de Fourier.

III.1 Types de signaux

La connaissance du type du signal et ces propriétés sont d'une grande importance pour le choix d'une méthode d'analyse appropriée. Différents types de signaux peuvent être rencontrés et sont généralement classés selon l'organigramme présenté sur la **Figure (III.1)**.

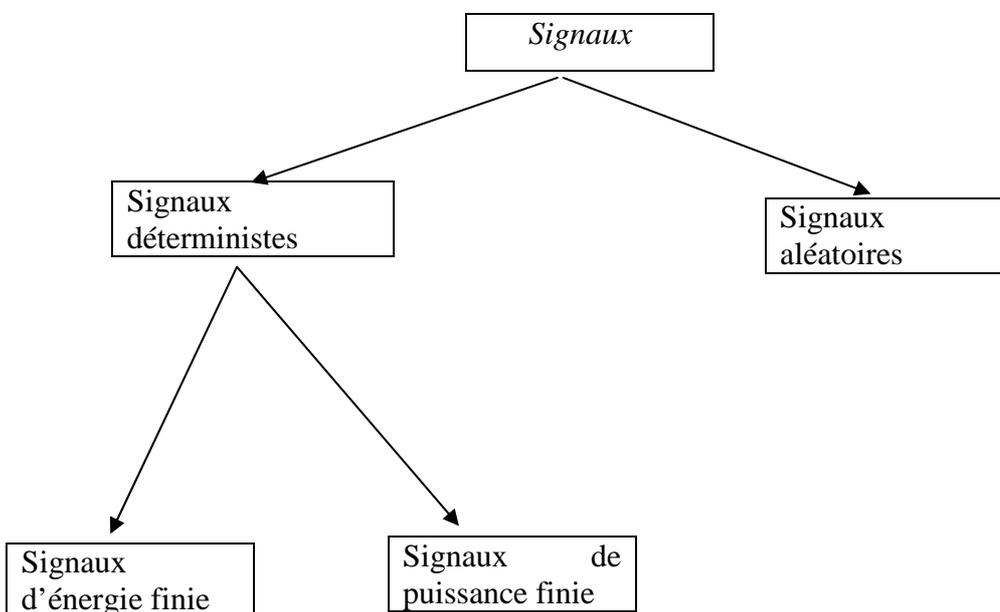


Figure (III.1) : Types de signaux

III.1.1 Signaux déterministes

Les signaux déterministes dont l'évolution en fonction du temps peut être parfaitement prédite par un modèle mathématique approprié [19] [20].

Ils peuvent généralement être classés selon que leur énergie soit finie ou bien que leur puissance le soit. Les signaux dits à énergie finie remplissent la Condition suivante :

- Dans le cas d'un signal continu :

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt < \infty \quad (3.1)$$

- Dans le cas d'un signal discret :

$$E = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} |x(k)|^2 < \infty \quad (3.2)$$

Les signaux à énergie finie ont généralement un caractère transitoire ou impulsion et vérifient souvent $|x(t)| \rightarrow 0$ pour $|t| \rightarrow \infty$

Dans le cas des signaux à puissance finie, la condition à remplir est :

- Dans le cas d'un signal continu :

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} |x(t)|^2 dt < \infty \quad (3.3)$$

- Dans le cas d'un signal discret :

$$P = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{k=-N}^N |x(k)|^2 < \infty \quad (3.4)$$

III.1.2 Signaux aléatoires

Les signaux aléatoires, dont le comportement temporel est imprévisible et pour la disruption desquels il faut se contenter d'observation statistique. [19].

Contrairement aux signaux déterministes, il est impossible de donner une description précise de l'évolution des signaux aléatoires ou stochastiques. Pour les décrire, il faut faire appel à la théorie des probabilités. Le signal numérique est alors défini comme une suite de variables aléatoires.

III.2 Transformée de Fourier

La transformée de Fourier d'un signal continu $x(t)$ est :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (3.5)$$

Où f désigne la fréquence en Hertz.

Pour les signaux d'énergie finie on a la formule de Parseval qui s'écrit :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{+\infty} |X(f)|^2 df \quad (3.6)$$

La fonction $|X(f)|^2$ est appelée spectre ou densité spectrale d'énergie. D'après la formule de Parseval, elle s'interprète en effet comme la répartition l'énergie le long de l'axe des fréquences [6].

III.3 Théorème d'échantillonnage

Pour la reconstruction d'un signal continu à partir d'échantillons, le théorème d'échantillonnage énonce qu'un signal réel à fréquence maximale f_s doit être échantillonné à une fréquence f_e supérieure à deux fois la fréquence f_s .

La fréquence minimale $2f_s$ permettant une reconstruction parfaite porte le nom de fréquence de Nyquist. Lorsque $f_e < 2f_s$, l'opération de reconstruction parfaite n'est plus possible. Les ((*motifs*)) interfèrent de façon irréversible : on dit qu'il y a repliement de spectre [6].

III.4 Transformée de Fourier discrète

La transformée de Fourier à temps discret joue pour les signaux numériques le rôle de la transformée de Fourier pour les signaux à temps continu. Trouver une représentation fréquentielle consiste à rechercher des périodicités dans un signal et à en mesurer les Contributions, D'une manière simplifiée, la transformée de Fourier discrète (DFT), mise en œuvre par l'emploi d'un algorithme de transformation de Fourier rapide (FFT), est un outil largement utilisé en mesure spectrale [6] [23].

La TFD de la suite finie $x(0), \dots, x(N-1)$ est la suite finie :

$$X(m) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) e^{-j2\pi mk/N} \quad m=0, 1, \dots, N-1 \quad (3.7)$$

Où elle est la fréquence normalisée discrète par rapport à la fréquence d'échantillonnage f_e . La fréquence f est obtenue par :

$$f = \frac{m}{N} f_e \quad (3.8)$$

La transformée de Fourier inverse (ITFD) est :

$$x(k) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} X(m) e^{j2\pi mk/N} \quad k=0, 1 \dots N-1 \quad (3.9)$$

Si le signal échantillonné est de longueur $N = 2^n$, la transformée de Fourier discrète peut être calculée à l'aide de l'algorithme de calcul nommé la transformée de Fourier rapide (FFT) qui permet un gain de temps de calcul :

$$\text{Gain} = \frac{N}{\log_2(N)} \quad (3.10)$$

III.5 Méthodes non-paramétrique (Estimation spectrale):

Les méthodes non-paramétriques sont ceux-là dans laquelle La densité spectrale de puissance (PSD) est estimée directement du signal lui-même. Tel que la méthode la plus simple est le Périodogramme. Une version améliorée du Périodogramme est la méthode de Welch, et la troisième méthode est une technique plus moderne appelée méthode du Multitaper [21].

III.5.1 Périodogramme

Le périodogramme est une méthode d'estimation de la densité spectrale de puissance d'un signal. La méthode directe de calcul du périodogramme utilise la transformée de Fourier rapide (FFT) du signal.

$$\hat{P}_{per}(f) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi fn} \right|^2 \quad (3.11)$$

Cette méthode permet de calculer rapidement la densité spectrale de puissance d'un signal échantillonné de durée finie, même s'il est périodique. Cet estimateur est biaisé et présente une variance non nulle [6].

III.5.2 Périodogramme moyenné

Pour améliorer les performances de l'estimateur précédent on calcule plusieurs périodogramme sur des signaux indépendants. La sinusoïde est la même pour les différents signaux mais le bruit est indépendant pour chaque réalisation. On calcule ensuite la moyenne des différents périodogramme. Cette méthode réduit la variance d'un facteur égal au nombre des périodogrammes calculés [6].

$$\hat{P}_{moy,per}(f) = \frac{1}{k} \sum_{m=0}^{k-1} \hat{P}_{per,m}(f) \quad (3.12)$$

III.5.3 La méthode de Welch

La méthode de Welch est un autre type d'estimateur qui exploite le périodogramme. Cependant, la différence réside dans le fait que les segments S peuvent se chevaucher dans un rapport allant généralement de 50% à 75%. Le calcul du périodogramme de chaque section s'effectue grâce à la relation mathématique suivante:

$$\hat{P}_{ps}^s(f) = \frac{1}{M} \left| \sum_{n=0}^{M-1} w(n) p_s(n + (s-1)C) e^{-2j\pi f n} \right|^2 \quad (3.13)$$

Avec $1 \leq s \leq S$, et C le nombre d'échantillons permettant le chevauchement avec $C \leq M$. L'estimateur de Welch se calcule ensuite avec la relation :

$$\hat{P}_{ps}^{wel}(f) = \frac{1}{S} \sum_{s=0}^{S-1} \hat{P}_{ps}^s(f) \quad (3.14)$$

En autorisant le recouvrement des séquences, nous pouvons augmenter le nombre de segments S pour une taille N donnée. Cette solution permet non seulement de réduire la variance de l'estimateur mais aussi d'augmenter la résolution en fréquence en choisissant un nombre d'échantillons M très grand.

Cette méthode est très utilisée actuellement et beaucoup d'auteurs ont montré son intérêt et son efficacité. Il existe d'autres estimateurs pour calculer la densité spectrale de puissance d'un signal. Nous pouvons citer par exemple le corrélogramme qui nécessite l'estimation de la séquence d'autocorrélation du signal à analyser avant le calcul de la densité spectrale de puissance [8].

III.5.4 Méthode du Multi Taper (Thomson, 1982)

Calcul de K estimations statistiquement *indépendantes* du périodogramme à partir de fenêtres bien choisies ($w_k(t)$, minimisant des "fuites" spectrales, Slepian 1978).

$$P_X^{(k)}(f) = \left| \sum_{n=1}^N w_k(n) X(n) e^{-j2\pi f n} \right|^2, \quad k=1 \dots K \quad (3.15)$$

L'estimation multi-fenêtre est une moyenne pondérée des K spectres:

$$\hat{P}_X(f) = \frac{\sum_{k=1}^K \lambda_k P_X^{(k)}(f)}{\sum_{k=1}^K \lambda_k} \quad (3.16)$$

L'estimateur ainsi obtenu possède une *haute* résolution et une *faible* variance.

III.6 Utilisation des fenêtres

L'estimation du spectre est améliorée en pré-multipliant les données par une fonction de fenêtrage $w(n)$. Par ailleurs, la résolution fréquentielle est inversement proportionnelle à la longueur d'enregistrement et dépend également du type de fonction de fenêtrage.

$$\tilde{x}(n) = w(n)x(n) \quad (3.17)$$

Les effets du fenêtrage sont pris en compte dans l'estimation comme suit :

$$\hat{P}_{per}(f) = \frac{1}{NU} \left| \sum_{n=0}^{N-1} \tilde{x}(n) e^{-j2\pi f n} \right|^2 \quad (3.18)$$

Où U est la correction du gain cohérente pour une fenêtre $w(n)$ avec :

$$U = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} w^2(n) \quad (3.19)$$

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un bref rappel sur le traitement de signal, nous avons présenté ensuite les divers outils de traitement du signal utilisés pour la détection d'un défaut électrique dans la machine asynchrone à cage d'écureuil (cassures des barres et portions d'anneaux de courts-circuits).

IV. Diagnostic de défauts de la machine asynchrone par traitement des signaux

Introduction:

Dans les chapitres précédents, nous avons présenté les différents défauts de la machine asynchrone, ainsi que les différentes méthodes pour les diagnostiquer.

Nous avons présenté également trois méthodes non paramétriques de traitement des signaux, méthode de WELCH, le PERIODOGRAMME et MULTITAPER (MTM), qu'on va essayer de les appliquer au diagnostic des défauts de la machine asynchrone, dans ce dernier chapitre.

IV.1 L'analyse fréquentielle des courant statorique:

L'analyse des courants statoriques dans le domaine fréquentiel reste la méthode la plus couramment utilisée car le spectre résultant contient une source de renseignement sur la majorité des défauts électriques et magnétiques pouvant apparaître au sein d'une machine asynchrone [12]. Nous savons que le suivi de l'amplitude des composantes caractéristiques de fréquence $(1 \pm 2kg)fs$ dans le spectre du courant permet de se renseigner sur l'état de la cage rotorique. A titre d'exemple, nous présentons sur les **Figures (IV.1)** et **(IV.2)** le spectre du courant statorique lorsque la machine fonctionne avec un rotor sain et un rotor défaillant (deux barres cassées). Nous apercevons une nette augmentation de l'amplitude de ces composantes, ce qui traduit la présence d'un défaut dans la cage d'écureuil.

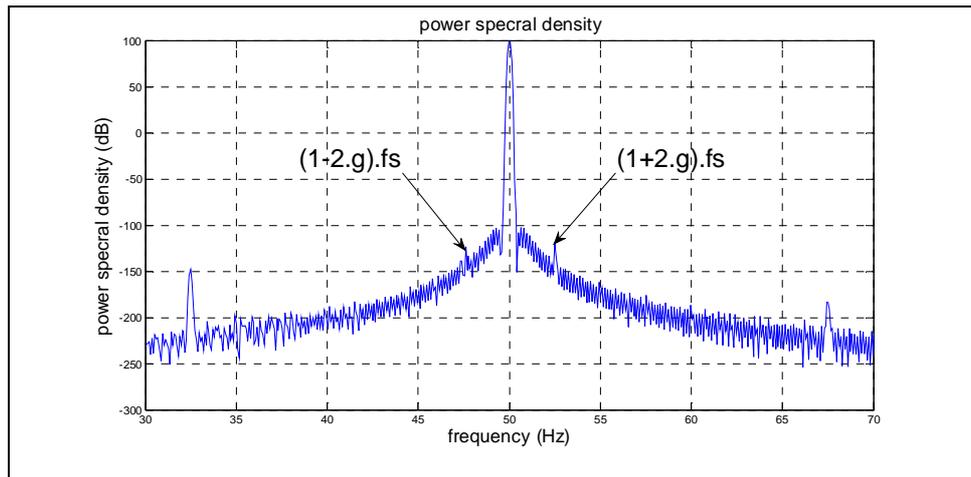


Figure (IV.1): Spectre du courant statorique (résultat expérimental), machine saine.

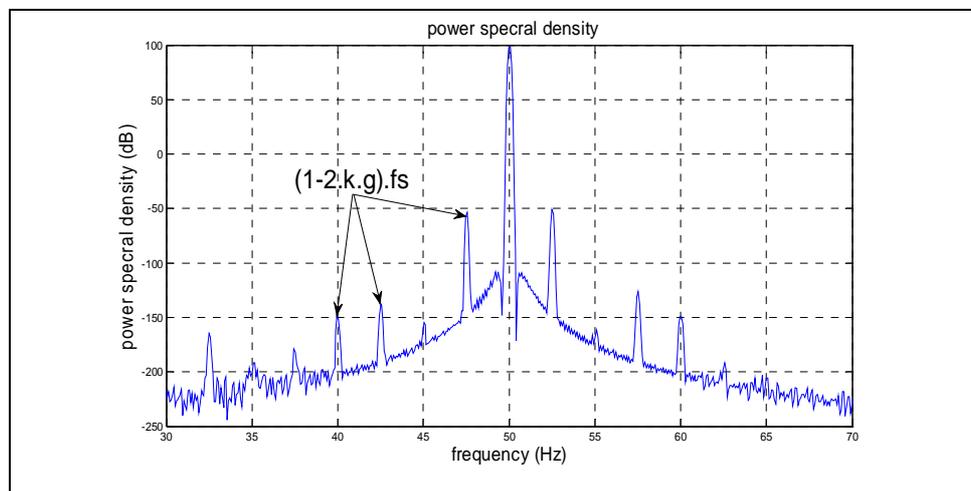


Figure (IV.2): Spectre du courant statorique (résultat expérimental) Deux barres cassées.

IV.2. Application de la méthode de WELCH au diagnostic

Dans ce paragraphe on utilise la méthode de Welch pour visualiser le spectre de courant statorique de la machine asynchrone alimentée directement par le réseau, et puis par un variateur de vitesse.

IV.2.1 Machine alimentée directement au réseau

IV.2.1.1 Spectre de courant

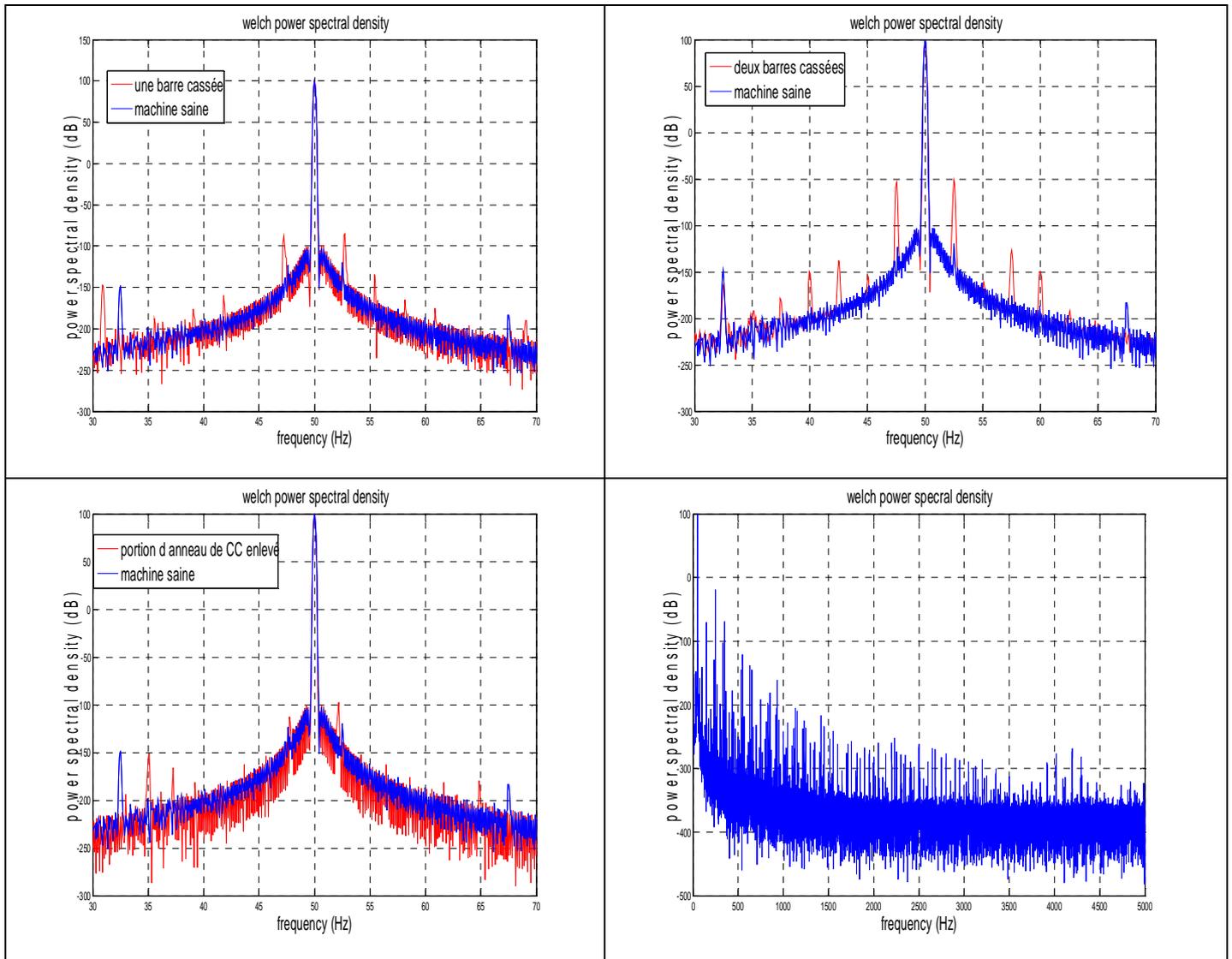


Figure (IV.3): Spectre de courant statorique, 70% de charge.

IV.2.1.2 L'amplitude des pics caractéristiques:

L'objectif de cette étude est de créer une base de données, qui facilite la comparaison entre les méthodes appliquées au diagnostic des défauts de la machine asynchrone, il s'agit de calculer la différence entre l'amplitude des fréquences caractéristiques de la machine saine et celles des machines défectueuses, et on répète ce travail pour chaque méthodes, les résultats sont mets dans un tableau.

machine	Les amplitudes (dB)					
	1 ^{er} pic	1 ^{er} pic	2 ^{er} pic	2 ^{er} pic	3 ^{er} pic	3 ^{er} pic
	Gauche 47.5Hz	Droite 52.5Hz	Gauche 42.5Hz	Droite 57.5Hz	Gauche 40Hz	Droite 60Hz
1 barre cassée	36	34	24	35	20	20
2 barres cassées	69	68	48	49	37	37
Portion d'anneau CC cassée	11	22	13	24	34	23

Tableau (IV.1): rapport d'amplitude des pics avec la machine saine.

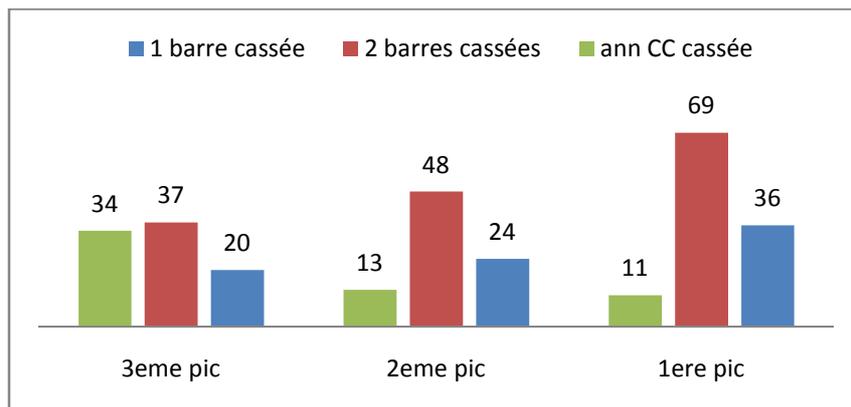


Figure (IV.4): L'amplitude en (dB) des pics par rapport à la machine saine.

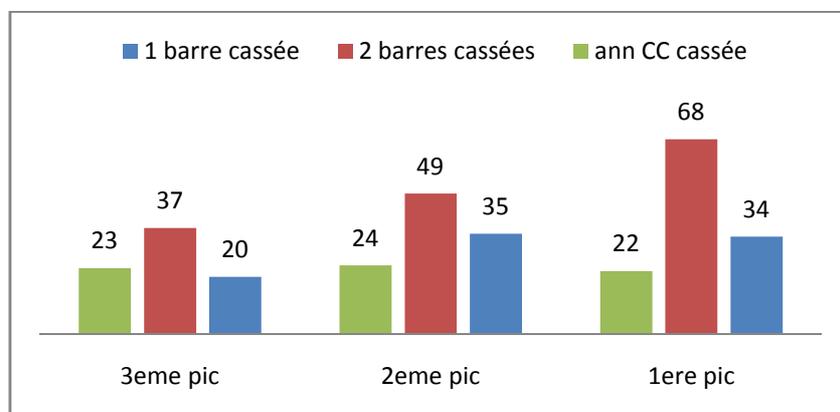


Figure (IV.5): L'amplitude en (dB) des pics par rapport à la machine saine.

IV.2.1.3 Interprétations et remarques

Pour le diagnostic de défauts électriques du rotor, on s'intéresse principalement aux premiers harmoniques à gauche et à droite du fondamental qui caractérisent ces défauts. On remarque que leurs amplitudes augmentent avec la sévérité de défaut, par exemple le cas de deux barres cassées est plus sévère que dans le cas d'une barre cassée ou d'une portion d'anneau de court-circuit détruite.

IV.2.2 Machine alimenté par le variateur de vitesse

IV.2.2.1 Le spectre de courant

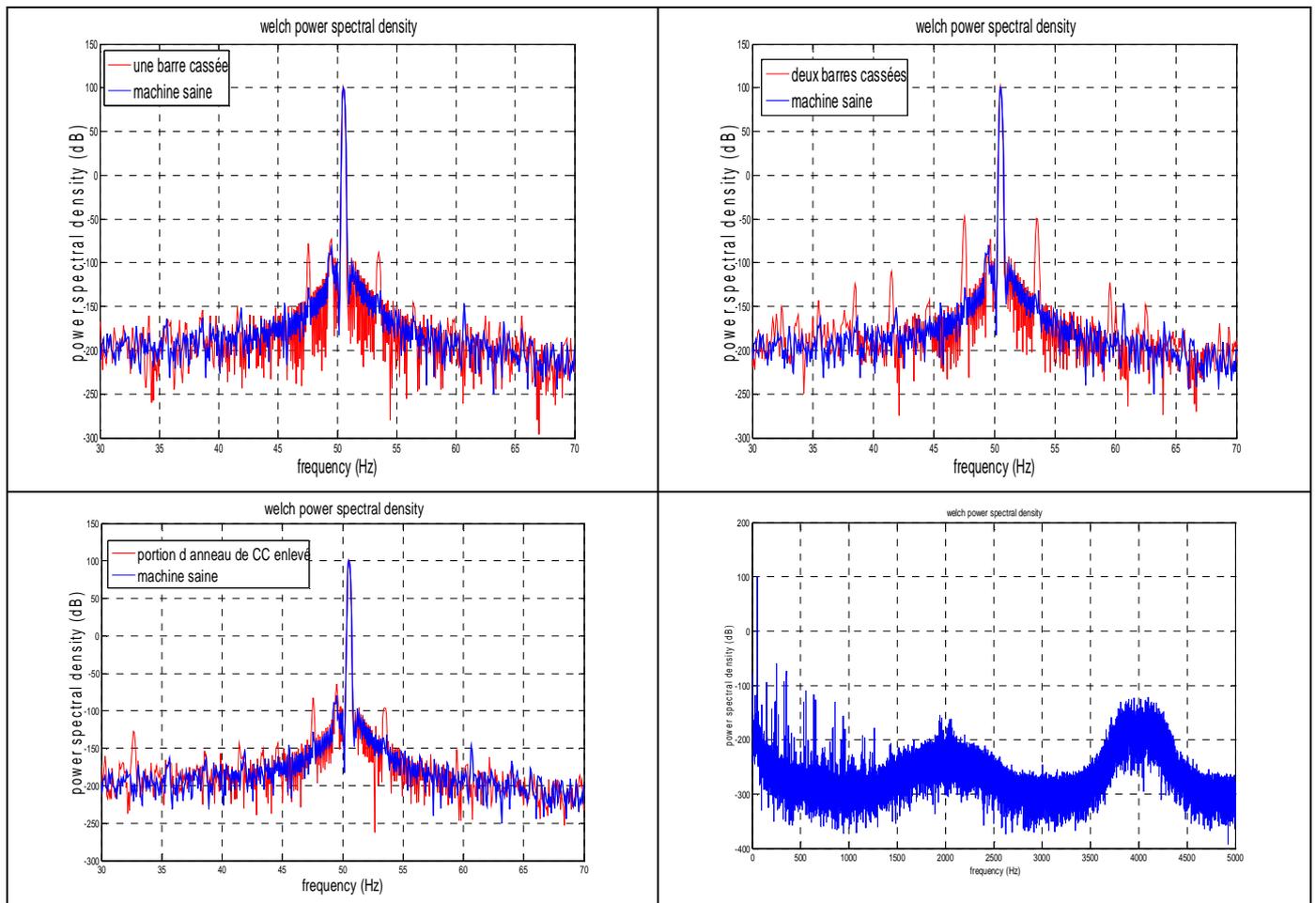


Figure (IV.6): Spectre de courant statorique pour une alimentation onduleur.

IV.2.2.2 L'amplitude des pics caractéristique

machine	Les amplitudes (dB)					
	1 ^{er} pic	1 ^{er} pic	2 ^{er} pic	2 ^{er} pic	3 ^{er} pic	3 ^{er} pic
	Gauche 47.5Hz	Droite 53.5Hz	Gauche 42Hz	Droite 59Hz	Gauche 38Hz	Droite 62Hz
1 barre cassée	50	45	16	16	10	15
2 barres cassées	81	82	42	58	40	31
Portion d'anneau CC cassée	45	36	9	32	10	17

Tableau (IV.2): rapport d'amplitude des pics avec la machine saine

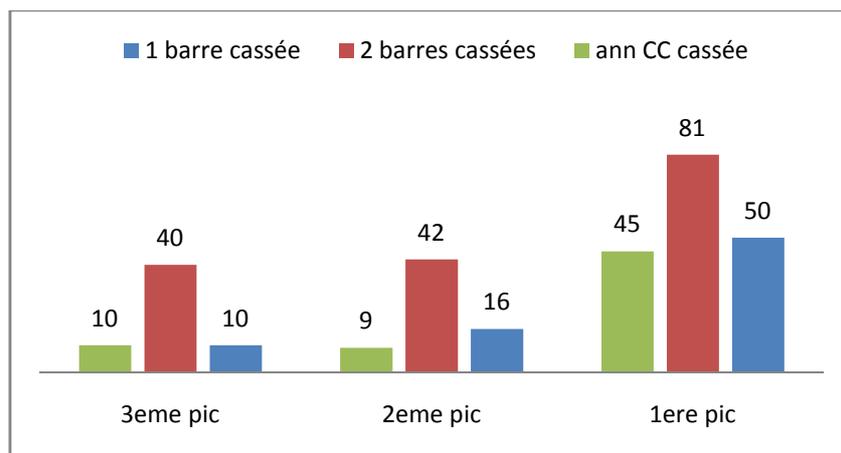


Figure (IV.7): L'amplitude en (dB) des pics par rapport à la machine saine.

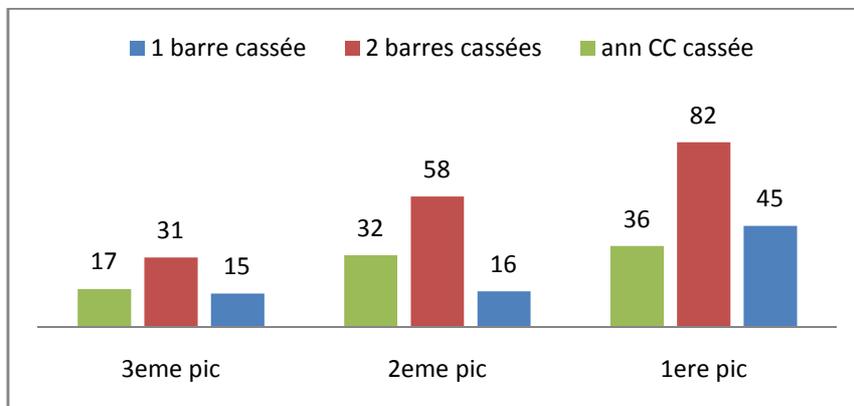


Figure (IV.8): L'amplitude en (dB) des pics par rapport à la machine saine.

IV.2.2.3 Interprétations et remarques:

On remarque qu'avec le variateur de vitesse la différence entre les amplitudes des pics caractéristiques augmente d'une façon remarquable, et ça dû aux interharmoniques engendrés par ce variateur, par exemple la différence entre les amplitudes (saine et deux barres cassées), il est de 69 dB dans le cas d'une alimentation réseau, et pour une alimentation onduleur, il est de 81 dB.

La déformation du signal de courant créée par le variateur de vitesse apparaît clairement dans le spectre de courant, tel que nous avons visualisé le spectre dans une large gamme de fréquence (0, 5000 Hz).

IV.3 Application du périodogramme au diagnostic des défauts :

Dans ce paragraphe on utilise le périodogramme pour visualiser le spectre de courant des différentes machines.

IV.3.1 Spectre de courant

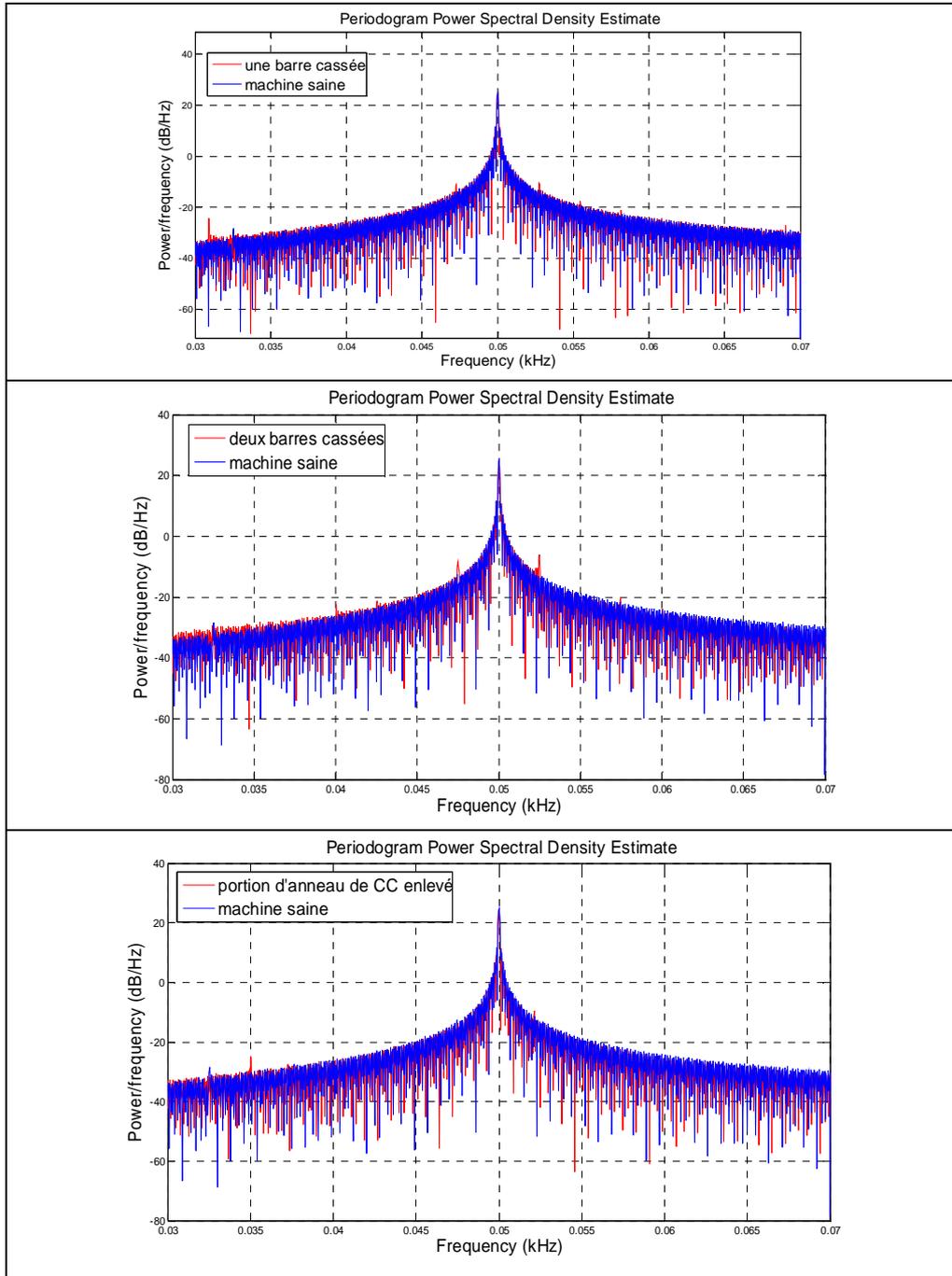


Figure (IV.9): Spectre de courant par le periodogramme pour une alimentation réseau.

La **Figure (IV.10)** montre les résultats de l'utilisation du périodogramme pour l'analyse spectrale des courants statorique des machines testées. On remarque que les pics n'apparaissent pas clairement, tel que on ne peut pas différencier un défaut de cassure d'une barre et un défaut de cassure d'une portion d'anneau de court-circuit, et ce n'est pas ça notre objectif.

IV.3.2 L'amplitude des pics caractéristiques:

machine	Les amplitudes (dB)					
	1 ^{er} pic Gauche 47.5Hz	1 ^{er} pic Droite 53.5Hz	2 ^{er} pic Gauche 42Hz	2 ^{er} pic Droite 59Hz	3 ^{er} pic Gauche 38Hz	3 ^{er} pic Droite 62Hz
	1 barre cassée	3.5	3	1	3	0.5
2 barres cassées	5	8	2.5	2	4	0.5
Portion d'anneau CC cassée	1.5	2.5	1	1	0	0

Tableau (IV.3): rapport d'amplitude des pics avec la machine saine

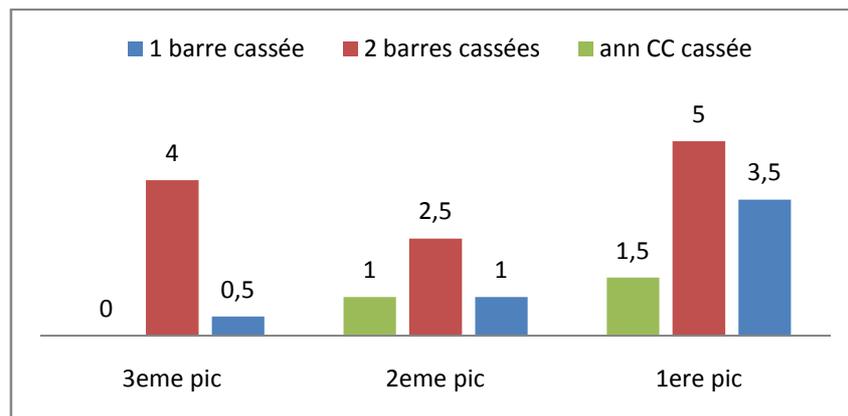


Figure (IV.10): L'amplitude en (dB) des pics gauche par rapport à la machine saine.

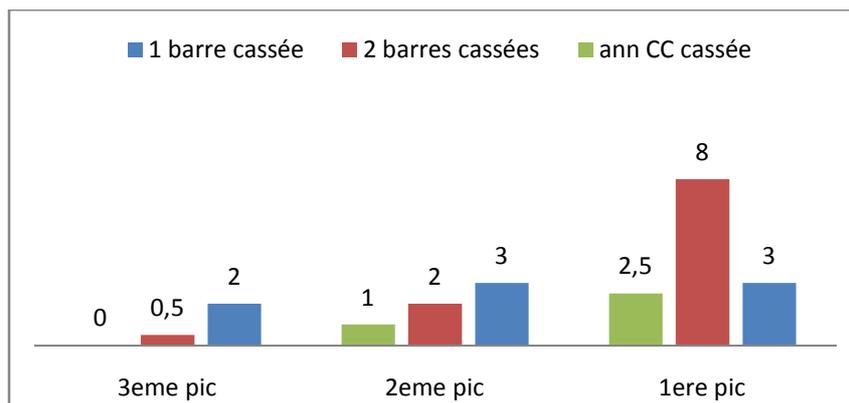


Figure (IV.11): L'amplitude en (dB) des pics droite par rapport à la machine saine.

IV.4 Utilisation du Multitaper:

IV.4.1 Spectres des courants

L'application de cette méthode aux signaux des courants donne les résultats suivants.

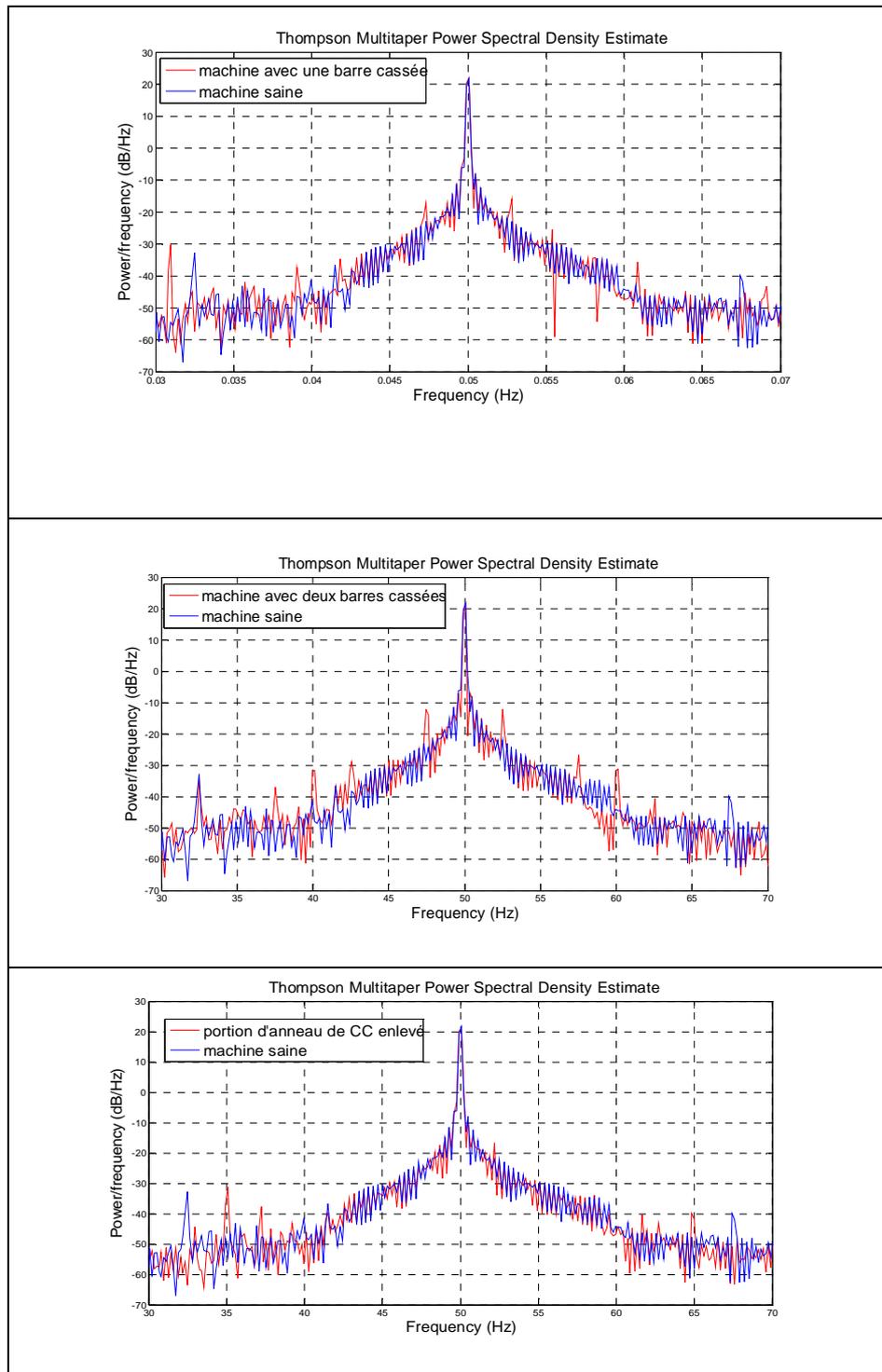


Figure (IV.12): Spectres des courant statorique utilisant la méthode MULTITAPER.

Les résultats obtenus par cette méthode sont relativement bons à celle du périodogramme, tel que les pics des fréquences caractéristiques apparaissent, d'une manière qu'on peut différencier les machines.

IV.4.2 L'amplitude des pics caractéristiques:

machine	Les amplitudes (dB)					
	1 ^{er} pic	1 ^{er} pic	2 ^{er} pic	2 ^{er} pic	3 ^{er} pic	3 ^{er} pic
	Gauche 47.5Hz	Droite 53.5Hz	Gauche 42Hz	Droite 59Hz	Gauche 38Hz	Droite 62Hz
1 barre cassée	5.5	7	4.5	2	8	7
2 barres cassées	11	10	9.5	9.5	10	13
Portion d'anneau CC cassée	2	5.5	1.5	2	0	0

Tableau (IV.4): Rapport d'amplitude des pics avec la machine saine.

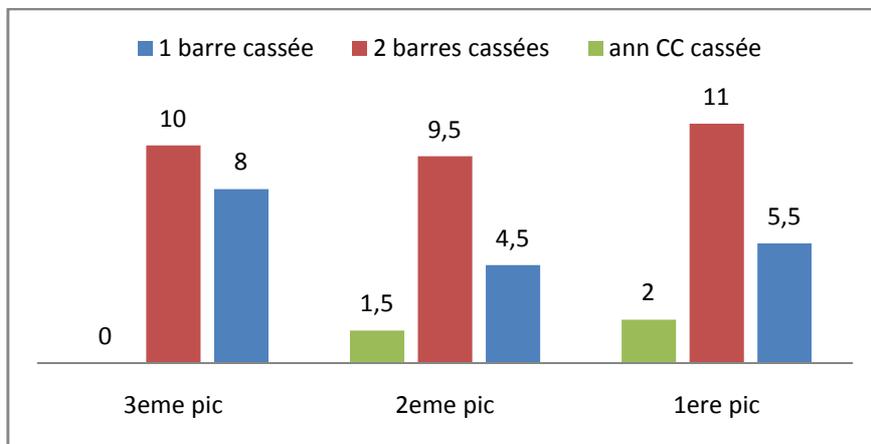


Figure (IV.13): L'amplitude en (dB) des pics gauche par rapport à la machine saine.

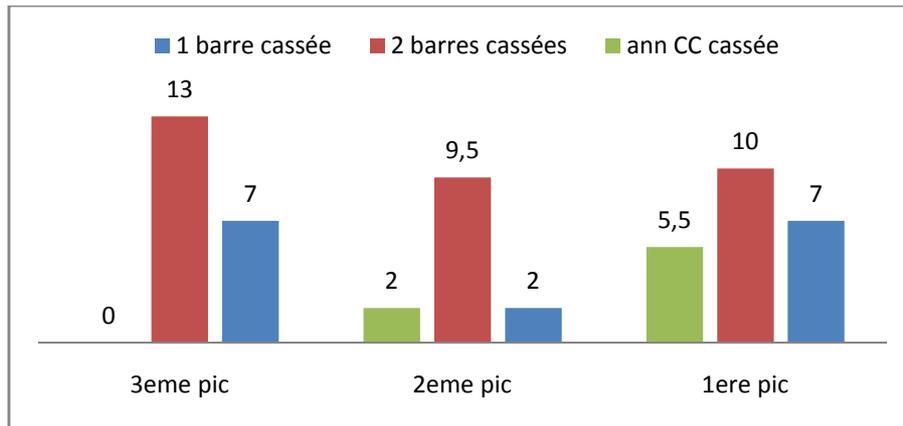


Figure (IV.14): L'amplitude en (dB) des pics droite par rapport à la machine saine.

IV.5 Comparaison et choix de la méthode:

A partir des Figures (IV.5, IV.11, IV.14), on trace un tableau en tenant compte des amplitudes des premiers pics à gauche, ce tableau nous permettra de comparer entre les résultats obtenus par les trois méthodes, pour voir la quelle est meilleure.

	Une barre cassée	Deux barres cassées	Portion d'anneau de CC cassé
WELCH	36	69	11
Periodogramme	3.5	5	1.5
MTM	5.5	11	2

Tableau (IV.5): l'amplitude du premier pic à gauche par rapport à la machine saine en utilisant les trois méthodes.

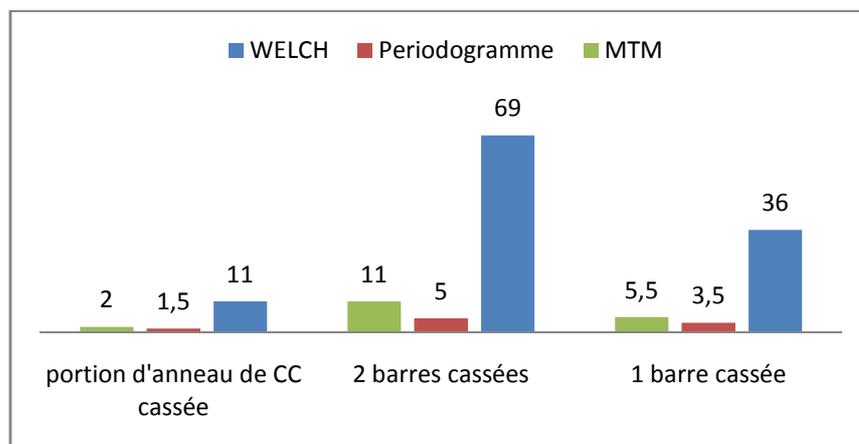


Figure (IV.15): L'amplitude en (dB) du premier pic gauche par rapport à la machine saine par les trois méthodes.

Il est clair que la méthode de Welch donne des bons résultats de diagnostic, ça n'implique pas que les deux autres méthodes sont suspendues, mais il est préférable d'utiliser la méthode de Welch pour une bonne lecture des défauts.

Conclusion:

Dans ce dernier chapitre, nous avons utilisé les méthodes non-paramétriques pour tracer le spectre de courant statorique de la machine asynchrone, ce spectre permet à la recherche des signatures des défauts rotorique, tel que les cassures des barres et les portions d'anneau de court circuit.

Nous avons montré que l'analyse spectrale du courant donne des informations efficaces sur l'état du moteur asynchrone. En effet lorsqu'une rupture d'une barre ou d'une portion d'anneau de court circuit rotorique apparaît au rotor de la machine asynchrone, les composantes caractéristiques dont les fréquences $(1 \pm 2g)$ fs augmentent en amplitude, ces fréquences dépendent du glissement, donc du niveau de charge de la machine. Et nous avons déduit que ces amplitudes apparaissent clairement avec l'utilisation de la méthode de Welch.

Conclusion générale

L'évolution croissante des machines asynchrones dans les secteurs industriels oblige certains utilisateurs à se prémunir contre l'apparition d'un défaut provoquant le plus souvent un arrêt intempestif de la machine, pour éviter un arrêt probable, il faut que la détection rapide et précoce de ces défauts soit nécessaire. Ce qui nous a obligé à traiter donc du diagnostic des défauts rotorique et plus particulièrement la rupture des barres et les portions d'anneau de court-circuit.

Le comportement de la machine asynchrone en présence des défaillances rotoriques a été traité. Nous avons utilisé le programme de construction de la machine asynchrone pour voir l'effet de la cassure des barres rotoriques sur les performances dynamiques de la machine.

Une étude expérimentale de la machine utilisée, a été effectuée, nous avons également présenté les différents signaux relevés pour les deux alimentations, réseau et variateur de vitesse.

Nous avons utilisé l'analyse spectrale des courants stators en utilisant les méthodes non paramétriques pour diagnostiquer la machine asynchrone, les défauts électriques étudiés ont fait apparaître les fréquences caractéristiques $(1 \pm 2.g) f_s$. Ces fréquences dépendent du glissement donc du niveau de charge de la machine et de la fréquence d'alimentation. Les essais effectués ont permis de constater qu'avec la méthode de périodogramme, le diagnostic des défauts est difficile, par contre, les deux autres méthodes welech et multitaper donnent de bons résultats.

Références bibliographiques

- [1] M.Dessoude "*Moteur asynchrone*" Technique de l'ingénieur -D3 490- 2008.
- [2] Z.Taibi et O.Rahmani "*Diagnostic de défauts électriques de la MAS à Rotor à Cage d'écureuil par les réseaux de neurones*" P.F.E 2009, Ecole National Polytechnique d'Alger.
- [3] I.Ben Ameer Bazine " *Identification en boucle fermée de la machine asynchrone: application à la détection de défaut*" Thèse de doctorat, Ecole National d'ingénieur de Tunis, 2008
- [4] T. Boumegoura "*Recherche de signature électromagnétique des défauts dans la machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue du diagnostic* ", these de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, mars 2001.
- [5] B.Boutikar et H.Mezerrag " *Dignostic de défauts électrique de la machine asynchrone à cage d'écureuil avec la méthode de séparation à vaste marge*" P.F.E 2009, E.N.P juin 2009.
- [6] A. Tahar "*Diagnostic de défauts électriques et mécaniques de la machine asynchrone a simple cage d'écureuil : Etude expérimentale*" P.F.E 2008, E.N.P Alger
- [7] O.Touhami "*Cours non éditer de construction des machines électriques*", Electrotechnique, ENP. Alger, 2010.
- [8] G.Didier "*Modalisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances*". Thèse de doctorat- université Henri Poincaré. Nancy-1, 2004.
- [9] M.Ouadah "*Modélisation et Diagnostic des Défauts des Machines Asynchrones à Cage D'écureuil par L'approche des Circuits Multiples Couplés Magnétiquement en Tenant Compte des Harmoniques D'espace*". Thèse de magister, école nationale polytechnique d'Alger, 2008
- [10] N.Harkati et L.Haoud "*Détermination des paramètres de la machine asynchrone avec prise en compte des effets thermique, pelliculaires et de saturation*" P.F.E école national polytechnique d'Alger 2009.
- [11] J. Faiz et B. M. Ebrahimi "*Mixed Fault diagnosis in trree-phase squirrel-cage induction motor using analysis of air-gap manetic field*", article, **PIER** 64, 239–255, 2006.

- [12] S.Mrabet et J.Houassine "*Diagnostic de défauts de la machine asynchrone à cage d'écurieil par la méthode de reconnaissance des formes*" P.F.E 2007, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger.
- [13] J.Bonal et G.Siguier "*Entrainements Electriques à Vitesse variable*", Edition Tec & Doc, 2000, Paris.
- [14] R.Salehi Arashloo et A.dalilan "*Induction Motor Broken Rotor Bar Fault Detection Using Discrete Wavelet Transform*", 24th International Power System Conference,2009-09-E-ELM-0115.
- [15] O.Touhami, M.Fadel "*Faults Diagnosis by Parameter Identification of the Squirrel Cage Induction Machine*", IEEE-IEMD,Autalya Turkey, 2007, pp.821-825
- [16] H. Razik, "*Notes de cours sur le diagnostic de défauts de la machine asynchrone*", GREEN Nancy, Université Henri Poincaré Nancy, Janvier 2003.
- [17] O.Ondel "*Diagnostic par reconnaissance de formes : application à un ensemble convertisseur-machine asynchrone*" thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, octobre 2006.
- [18] O.Touhami, L.Noureddine et R.Ibtiouen "*Spectral Analysis For The Rotor Defects Diagnosis Of An Induction Machine*", IEEE-WISP, Faro Portugal, 2005, pp.183-187
- [19] F.Coulon "*théorie et traitement des signaux*", volume 6, Edition GEORGI, 1984.
- [20] E.Beka "*Fondement du traitement de signale*", 2^{eme} Edition Revue et augmentée, 1989.
- [21] MATLAB Help "*guide d'utilisation de MATLAB*", R2007a.
- [22] V.P.BUI "*Diagnostic des machines électrique par l'analyse du champ magnétique de Fuite application à l'identification de défauts rotorique d'un alternateur à vide*" thèse de doctorat, INP, Grenoble, 2007
- [23]www.tektronix.com/scopes/analyse-spectrale-:analyse-du-spectre-d'un-signal.
- [24] Motor Reliability Working Group of IEEE. Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installation: Part I & II. *IEEE Transactions on Industry Applications*. Vol. 1A-21 :pp.853-872, Jul/Aug. 1995.
- [25] Cornell E.P., E.L. Owen, J.C. Appiarius, R.M. McCoy, P.F. Albrecht, and D.W. Houghtaling. Improved motors for utility applications. Final report. Technical Report EPRI-EL-2678-Vol.1, General Electric Co., Schenectady, NY (USA), October 1982.

Annexe A

Présentation de l'interface graphique

A.1 page principale

La page principale de l'interface est présentée dans la figure (A.1), elle est composée de sept menus, tel que "Home " permet le retour à la page principale.



Figure (A.1): La page principale de l'interface graphique.

Les 7 menus de l'interface sont " Home, plaque signalétique, stator, rotor, autres paramètres, méthode analytique et courbes de R et X".

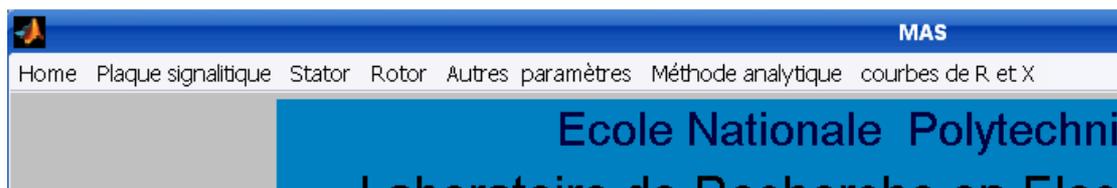


Figure (A.2): les différents menus de l'interface.

A.2 plaque signalétique

Permet d'afficher et de changer la plaque signalétique du moteur, il suffit juste de taper la nouvelle plaque signalétique et appuyer sur le Botton "VALIDER", le Botton reset permet d'initialiser la plaque signalétique.

Home | Plaque signalétique | Stator | Rotor | Autres paramètres | Méthode analytique | courbes de R et X

Afficher la plaque signalétique

Plaque signalétique

Puissance Nominale P (kW) =

Tension simple V_n (V) =

Rendement r_d =

Facteur de puissance f_p =

nombre de phases m =

paire de poles p =

Glissement Nominale g_n (%) =

Frequence f (Hz) =

Valider

Reset

Figure (A.3): Plaque signalétique de la machine.

A.3 stator:

Le menu "stator" contient deux autres menus (Géométrie de l'encoche statorique et Dimensionnement du stator)

A.3.1 Géométrie de l'encoche statorique:

Home | Plaque signalétique | Stator | Rotor | Autres paramètres | Méthode analytique | courbes de R et X

Afficher la plaque signalétique

Géométrie de l'encoche statorique

h_1 (m) =

h_4 (m) =

h_{j1} (m) =

b_{enc} (m) =

b_{z1} (m) =

Valider

Reset

Figure (A.4): Géométrie de l'encoche statorique.

A.3.2 Dimensionnement du stator:

Figure (A.5): Dimensionnement du stator

A.4 rotor:

Le menu "rotor" contient deux autres menus (Géométrie de l'encoche rotorique et Dimensionnement du rotor)

A.4.1 Géométrie de l'encoche rotorique:

Figure (A.6): Géométrie de l'encoche rotorique.

A.4.2 Dimensionnement du rotor:

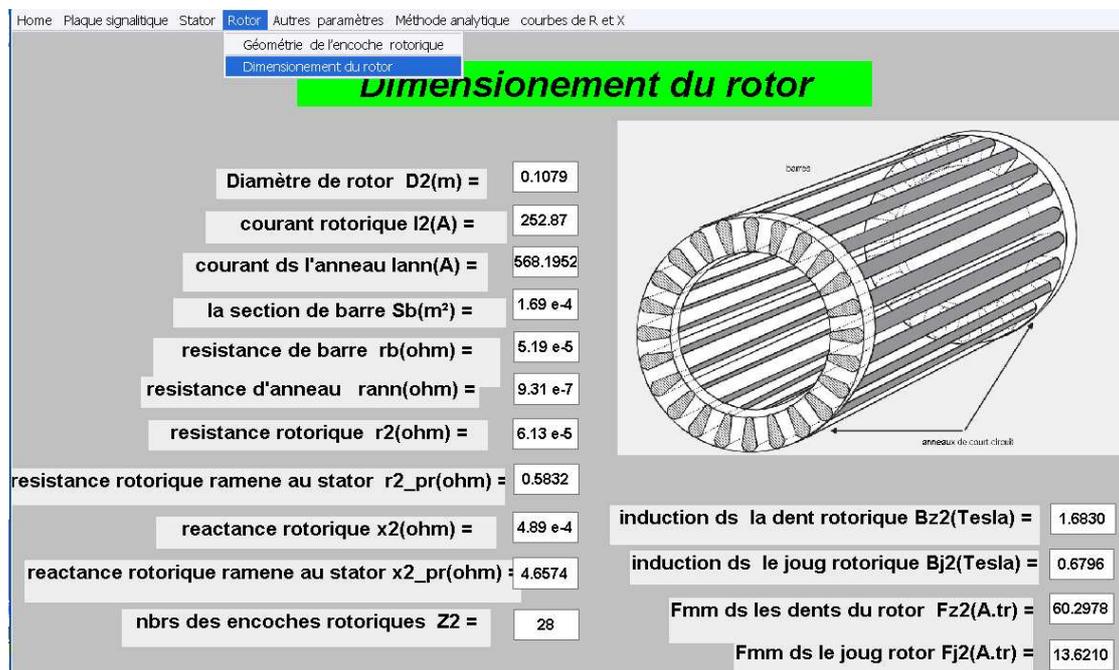


Figure (A.7): Dimensionnement du rotor.

A.5 autres paramètres:

Il s'agit des paramètres de l'entrefer et quelque autres paramètres principaux, tel que la puissance conventionnelle, le courant magnétisant...

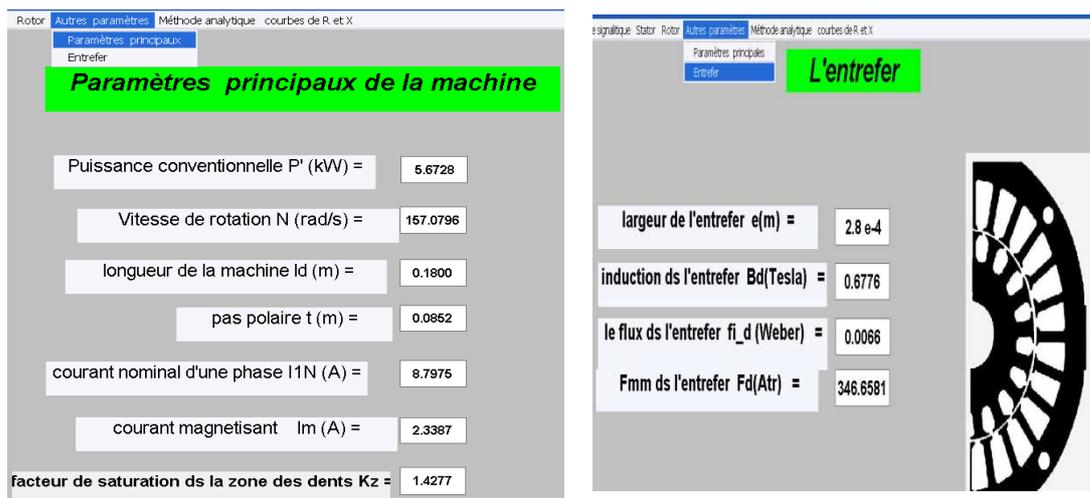


Figure (A.8): Les autres paramètres de la machine.

A.6 Methode analytique:

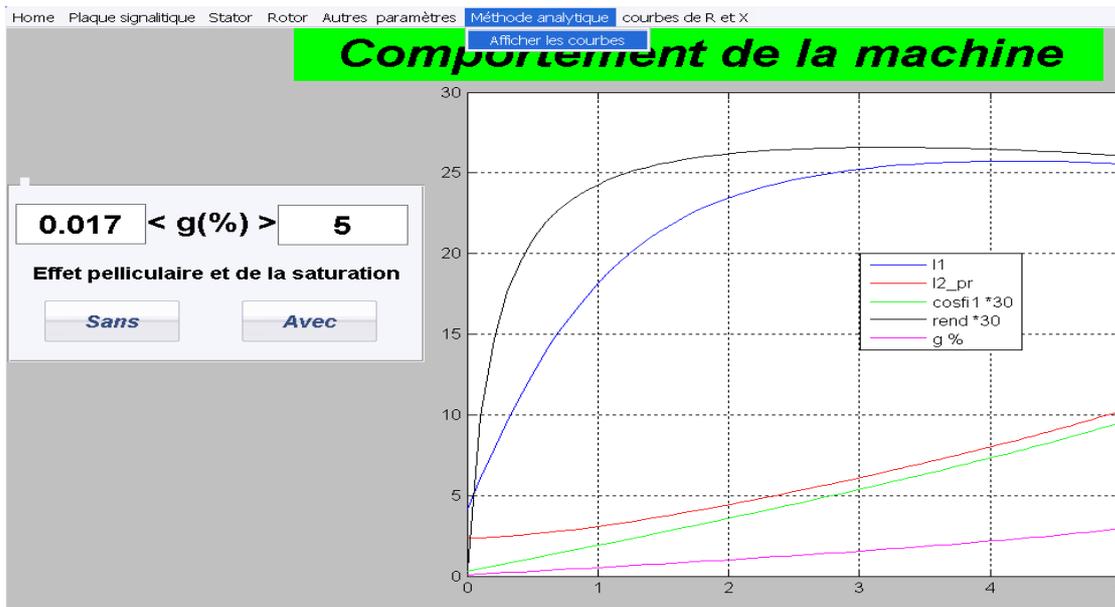


Figure (A.9): Courbes représentant les performances dynamiques de la machine.

A.7 Courbe de R et X'' du schéma équivalent en Γ

Pour tracer R et X on ouvre la fenêtre "courbes" et on appuyé sur l'un des bottions "TRACER R" ou "TRACER X".

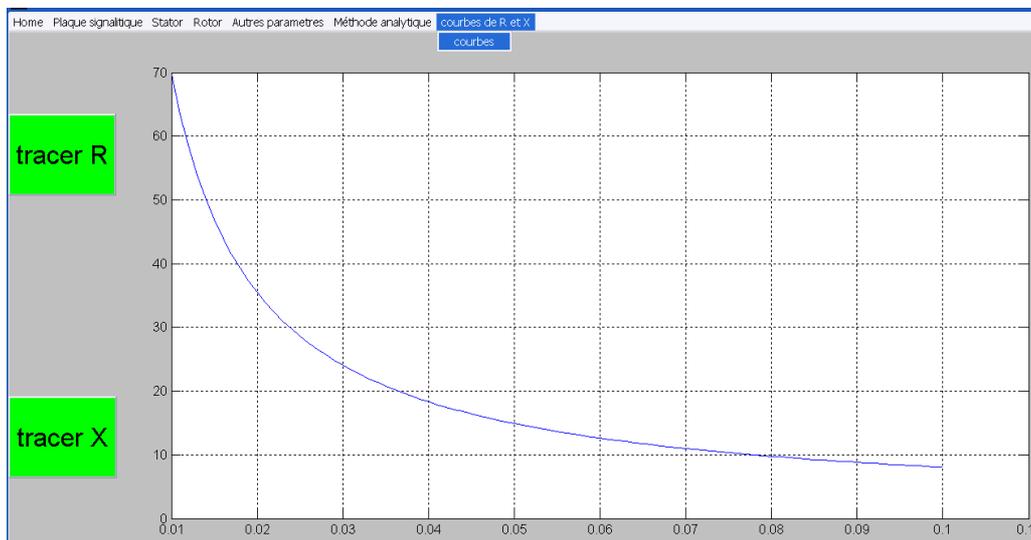


Figure (A.10): variation de la résistance R en fonction du glissement.

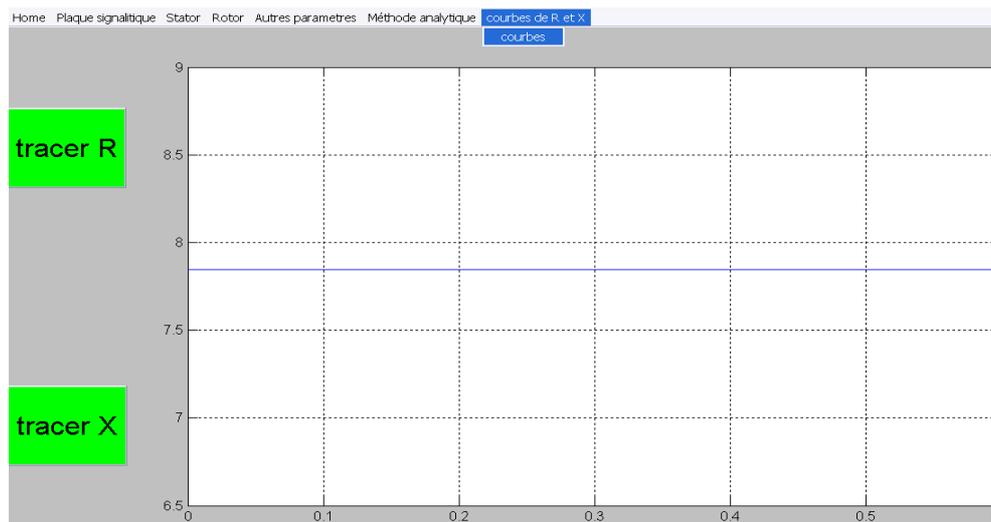


Figure (A.11): Variation de la réactance X en fonction du glissement.

Annexe B

Banc d'essai

B-1 Description du banc d'essai

Les machines utilisés sont des machines asynchrone à cage, et pour effectuer les essais de diagnostic, il existe quatre machines (saine, avec une barre cassée, deux barres cassées et avec portion d'anneau de court-circuit cassée), de 4 kW pour chacun, entraîne une machine à courant continu, cette dernière alimente des charges électriques purement résistives. Ces moteurs sont fabriqués par l'Entreprise Algérienne des Industries Electrotechniques Electro-Industries – AZAZGA.

Nous présentons sur la figure () le banc d'essai et les quatre rotors (sain, avec une barre cassée, deux barres cassées et avec portion d'anneau de court circuit cassée).



Figure (B-1): Banc d'essai et les quatre rotors.



Figure (B-2): stator de la machine asynchrone.

L'acquisition des signaux est faite par l'intermédiaire d'une carte d'acquisition IOTEQ/DAQ séries 1005, ayant une fréquence d'échantillonnage de 200kHz , 16 entrées analogiques, 16 entrées digitales.

Les capteurs utilisés sont des capteurs à effet Hall très sensibles et ils peuvent capter des signaux avec des fréquences qui peuvent aller jusqu'à 200kHz , l'utilisation de ces capteurs nécessite la connaissance de leurs caractéristiques surtout les valeurs maximales du courant et tension à relever. Pour ce faire, le conditionnement du signal est fortement recommandé afin de protéger les capteurs, la Figure présente une carte qui a été réalisée en vue de conditionner et rassembler les différents signaux.

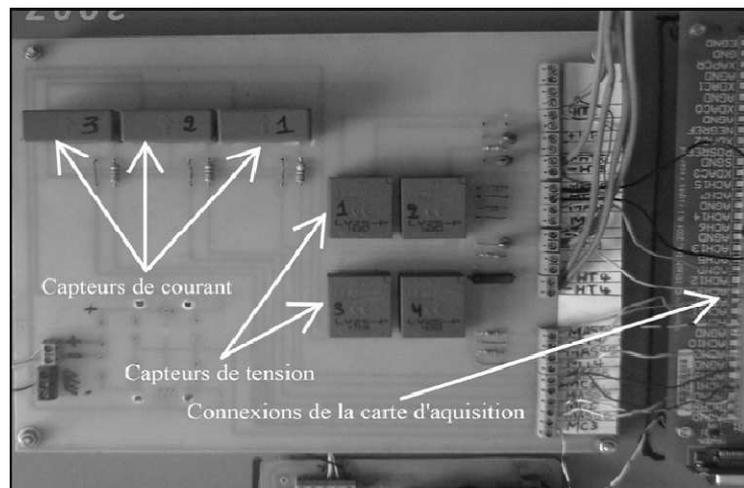


Figure (B-3): Carte pour le conditionnement des signaux.

Le variateur utilisé travail à U/f constant, qui permet de varier la vitesse de 0 à la vitesse nominale.



Figure (B-4): variateur de vitesse.

B-2 Les signaux relevés

a) Sans variateur

- La tension d'alimentation

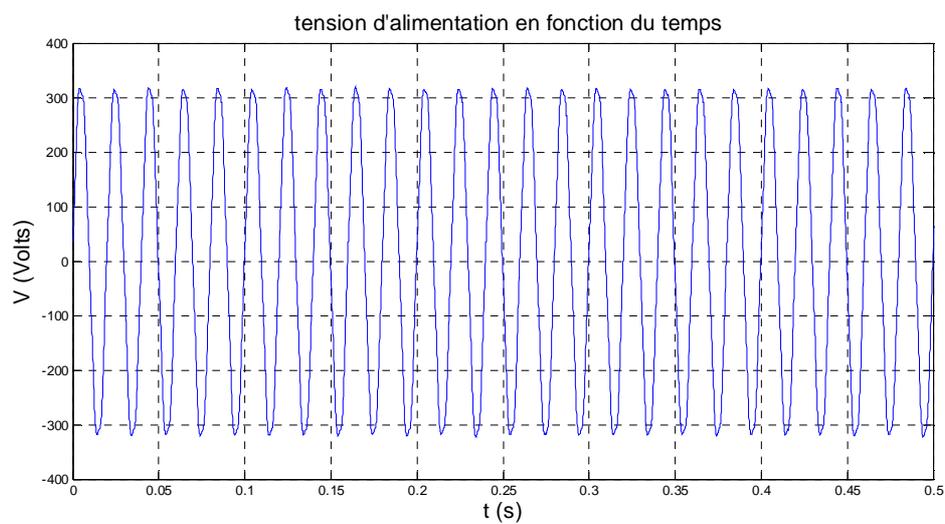


Figure (B-5): Allure de la tension d'alimentation.

- Les courants statorique

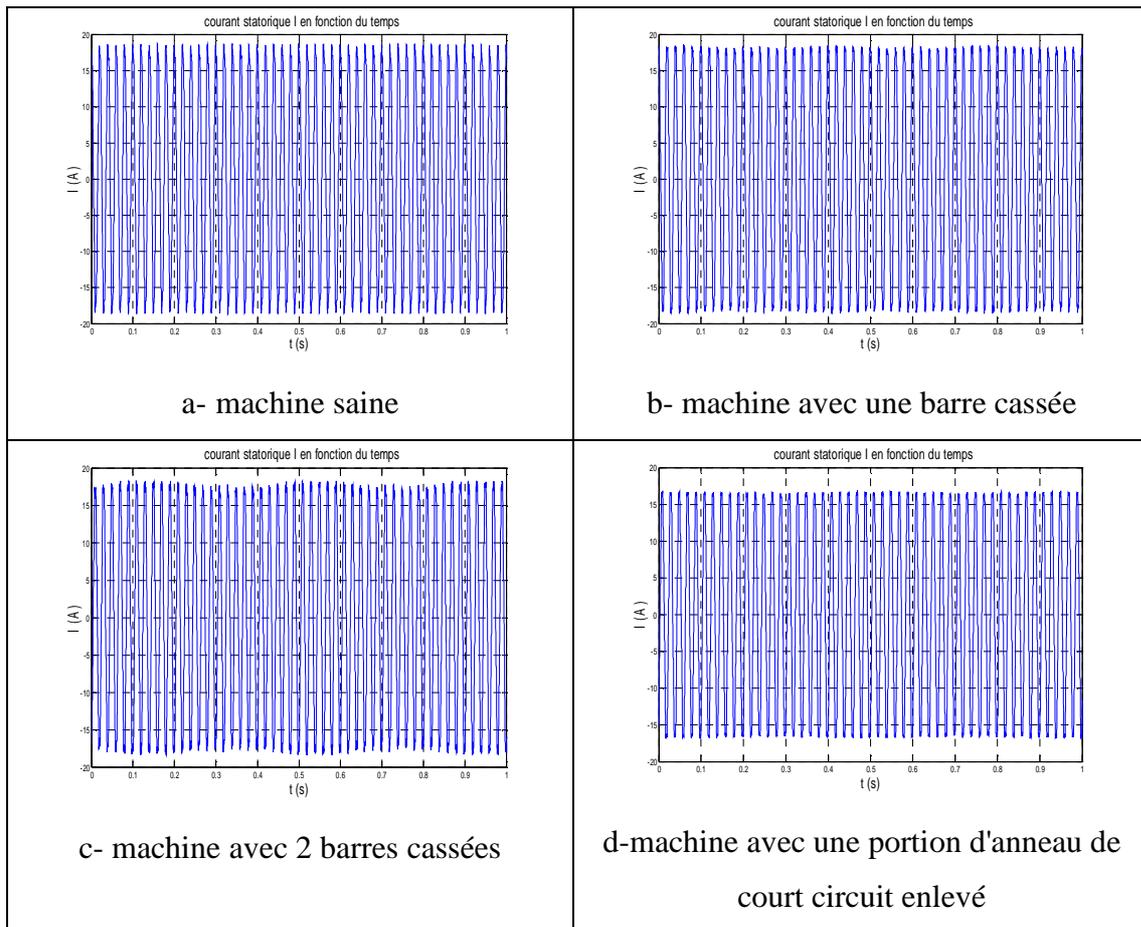


Figure (B-6): Allures des courants statoriques.

b) avec variateur de vitesse

- La tension d'alimentation

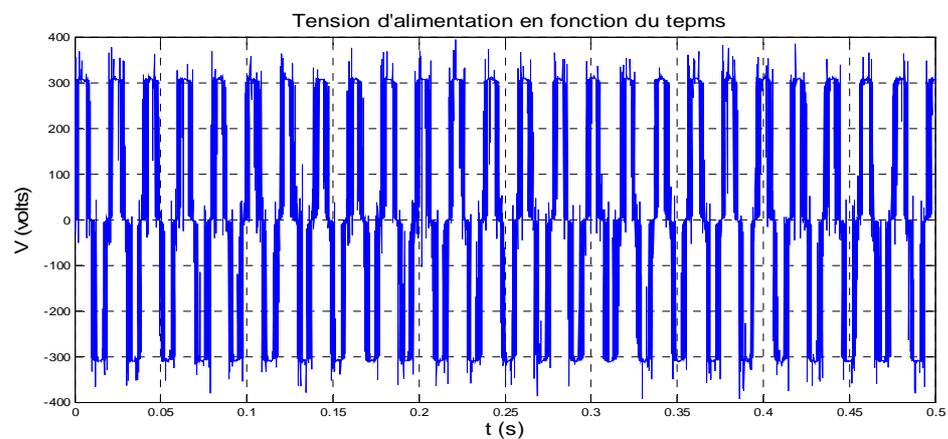


Figure (B-7): Allure de la tension d'alimentation.

- Les courants statoriques

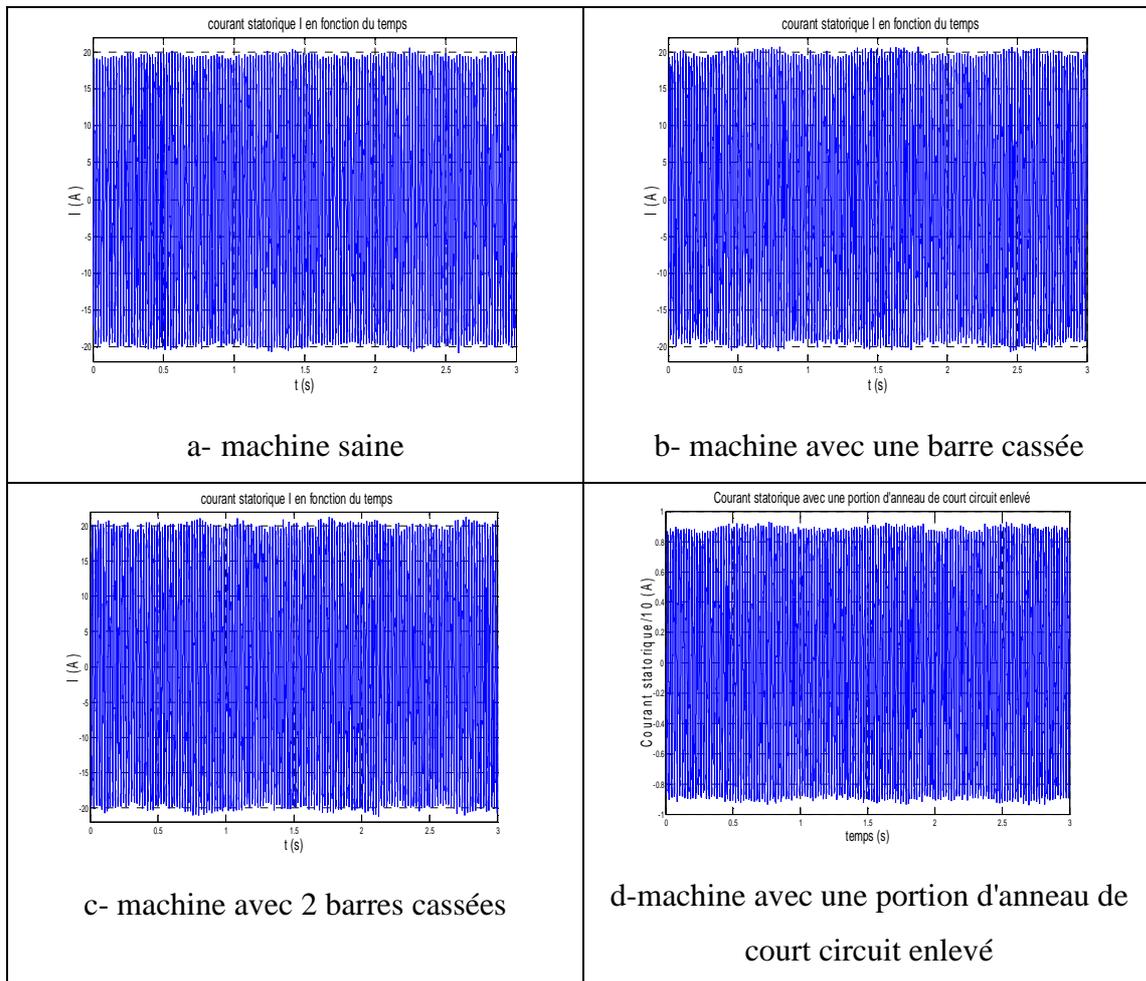


Figure (B-8): Allures des courants statoriques.

Annexe C

Analyse spectrale des courants

C.1 Méthode de Welch

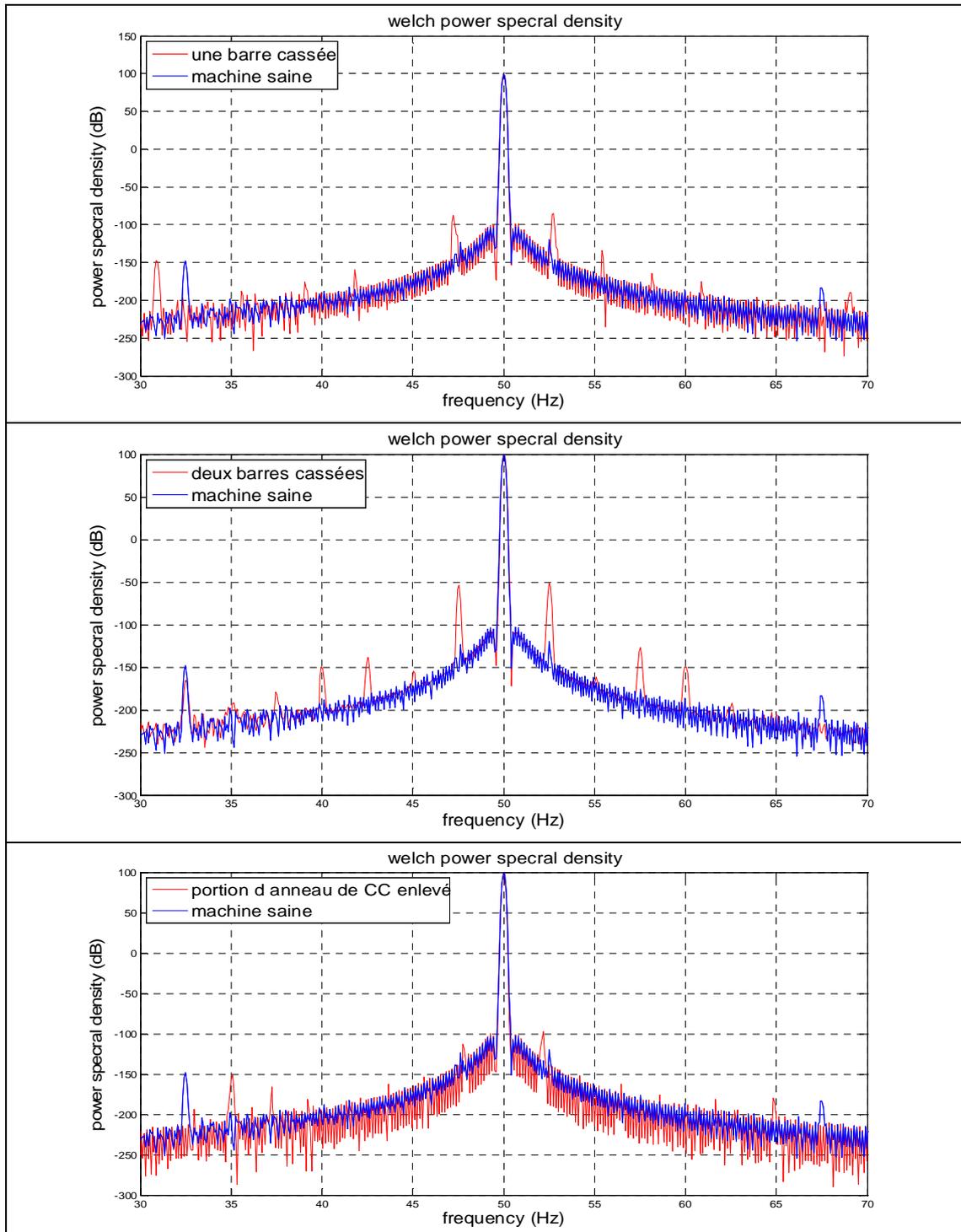


Figure (C.1): Spectre du courant stator.

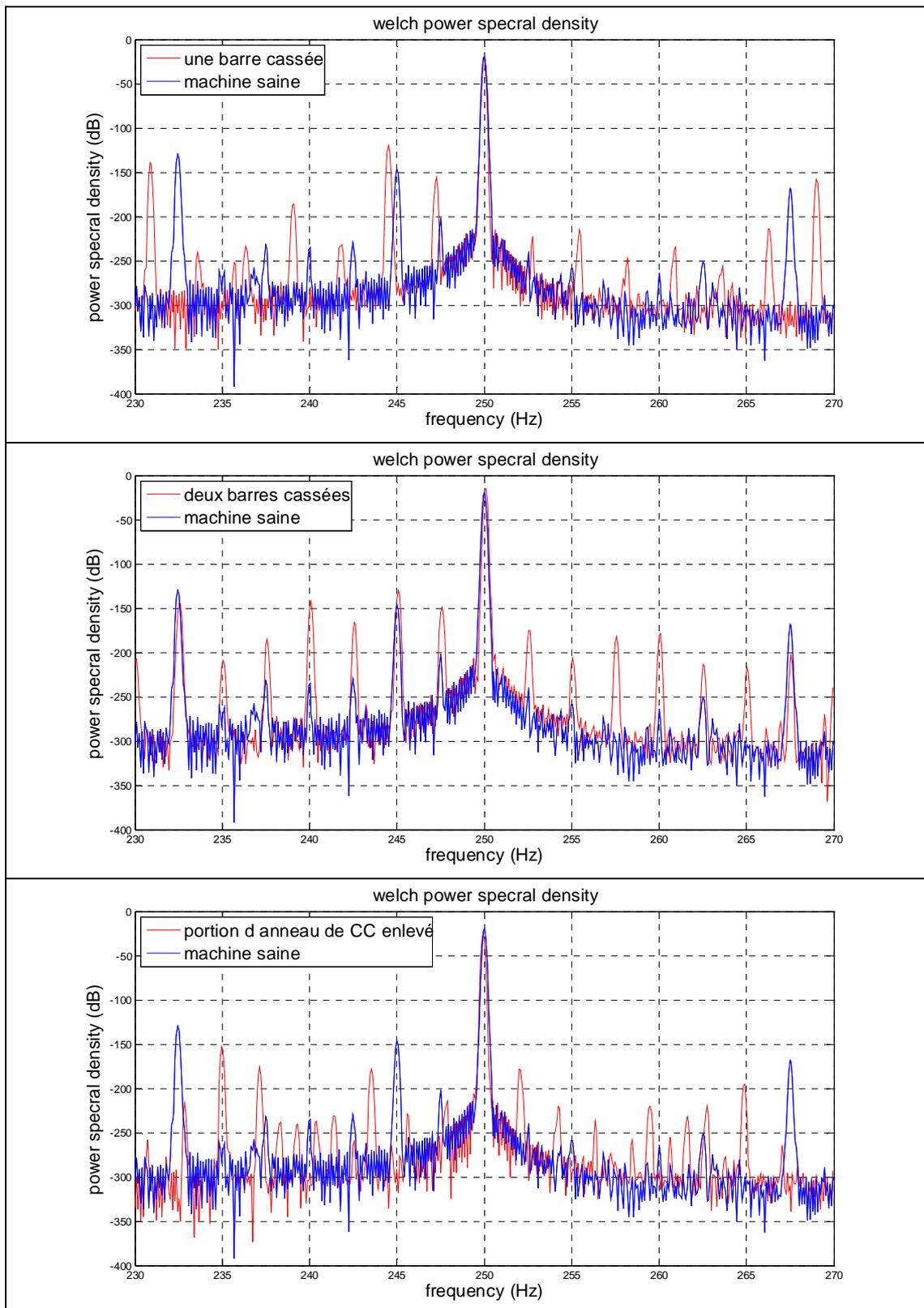


Figure (C.2): Spectre du courant stator (Harmonique 5).

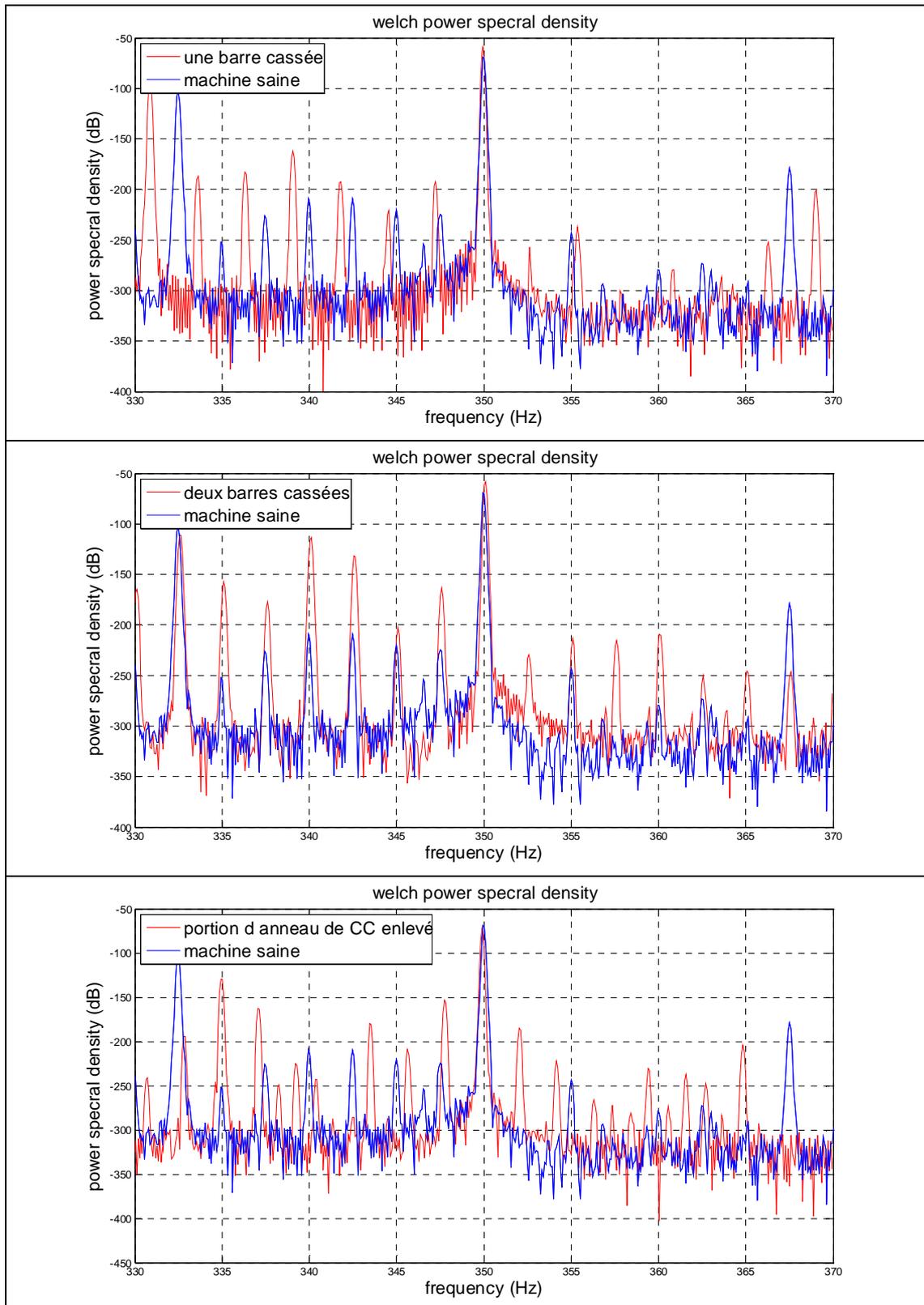


Figure (C.3): Spectre du courant stator (Harmonique 7).

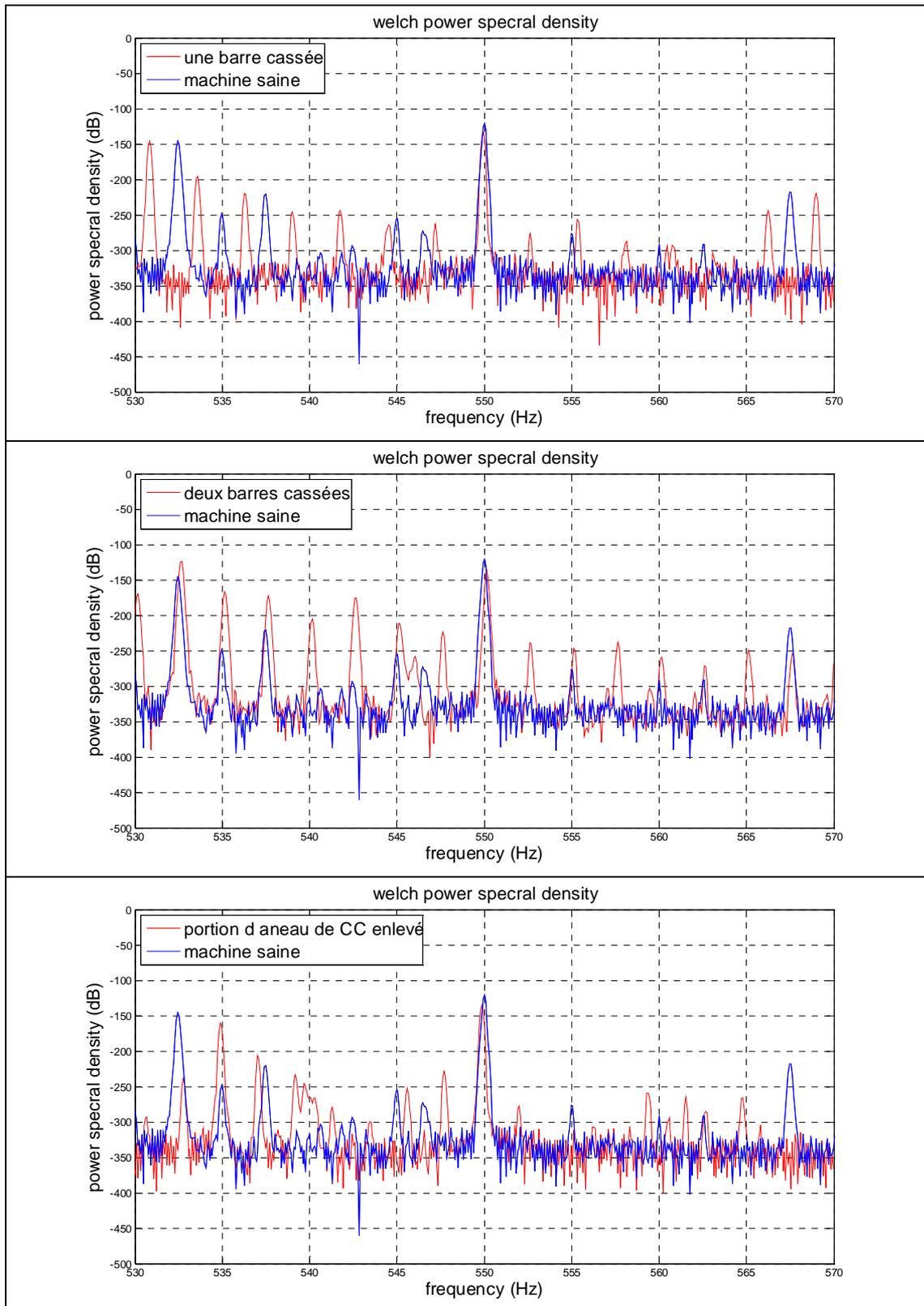


Figure (C.4): Spectre du courant stator (Harmonique 11).

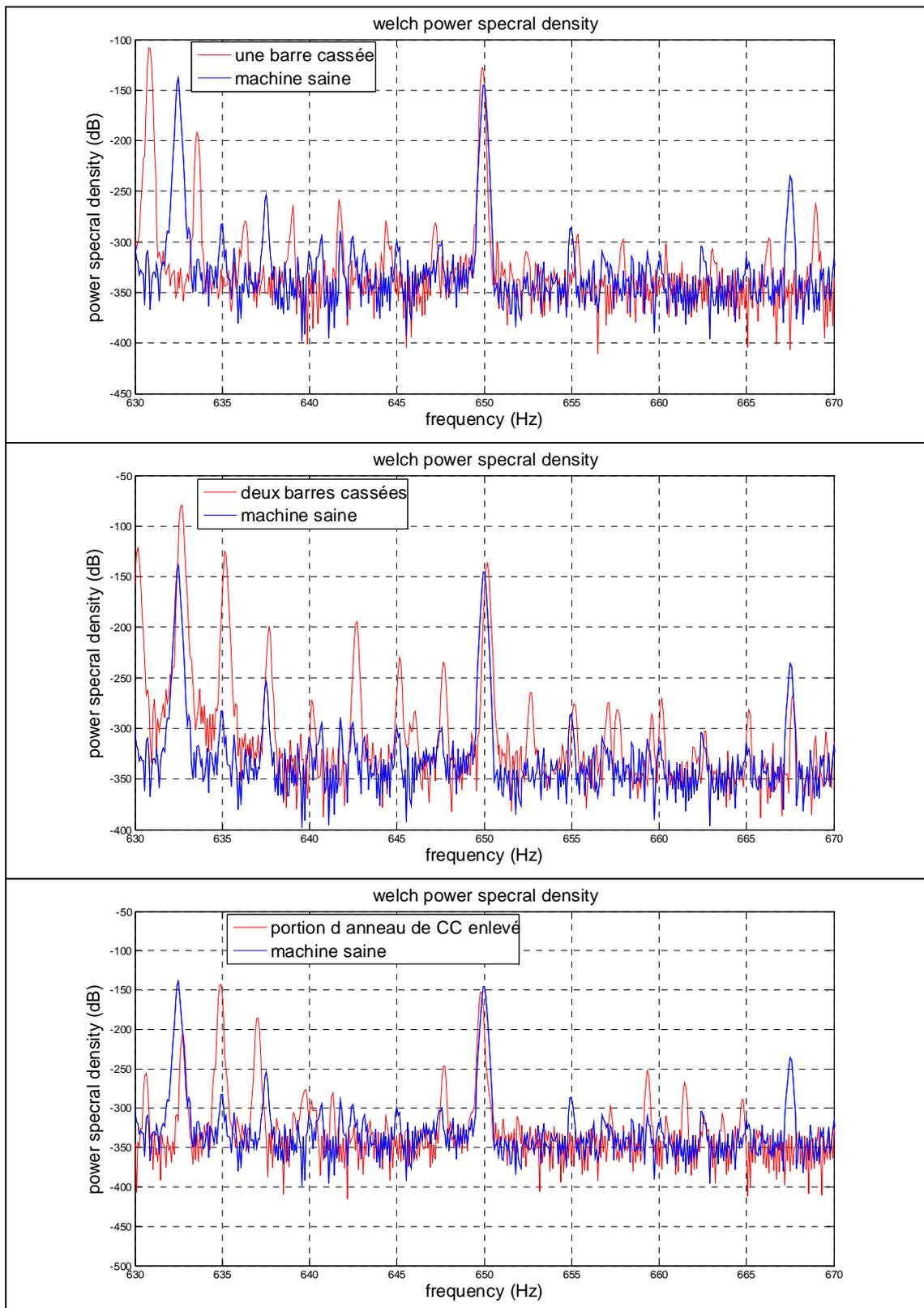


Figure (C.5): Spectre du courant stator (Harmonique 13)

C.2 Periodogramme

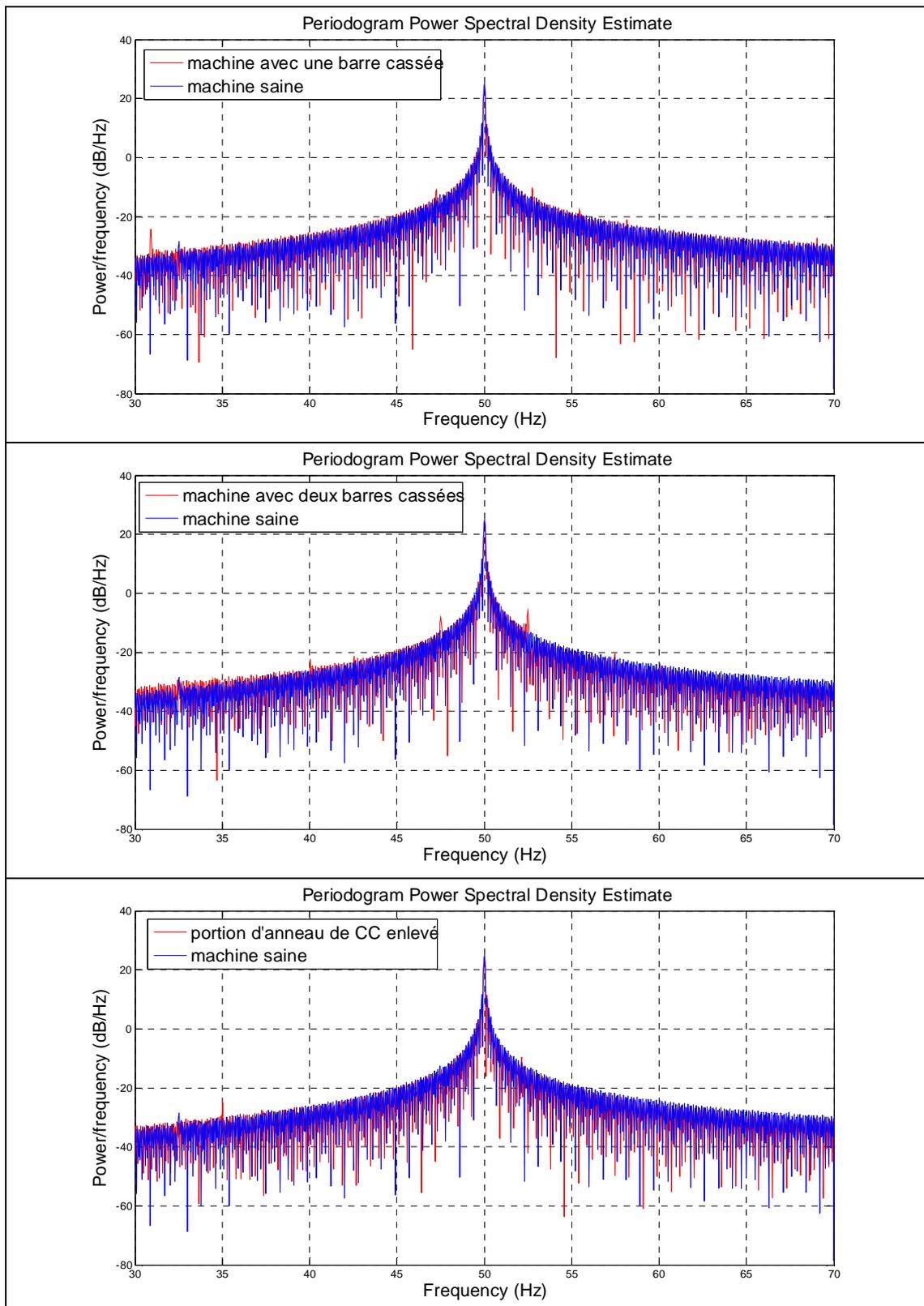


Figure (C.6): Spectre du courant stator.

C.3) Multi taper

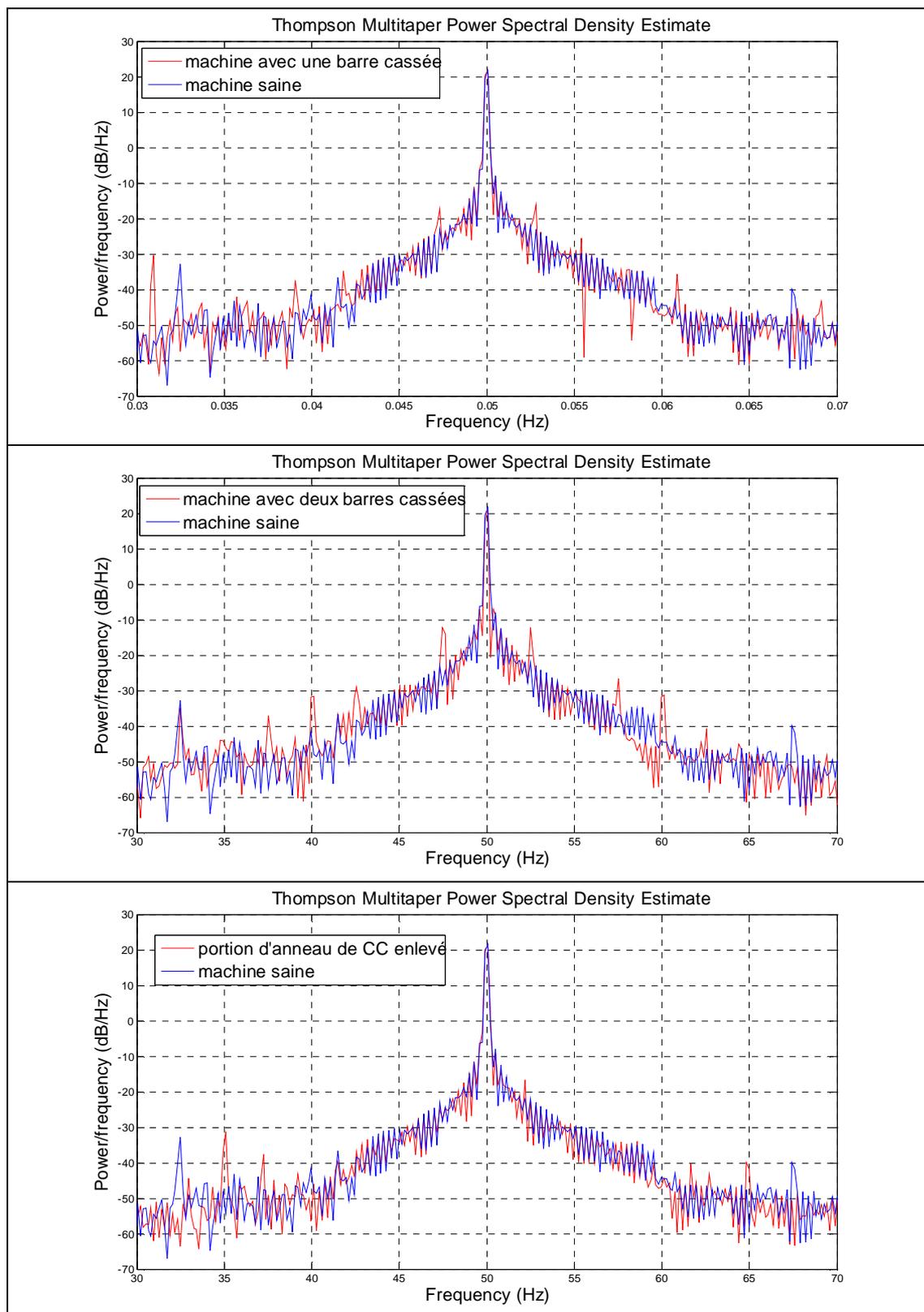


Figure (C.7): Spectre du courant stator.