



UNIVERSITÉ ABBES LAGHROUR - KHENCHELA
FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES



Département d'ingénierie industrielle

جامعة عباس لغرور خنشلة
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الهندسة الصناعية

Mémoire présenté au Département de génie industriel en vue de l'obtention
du grade de Master en ELECTROTECHNIQUE
Option : commande électrique

Présente par :

- ✓ Amrane Kettar
- ✓ Anwar Madi

THEME

**Diagnostic des défauts de la machine asynchrone triphasée
à cage par les paquets d'ondelette**

Devant le jury:

Président : Dr. Rezzak Daoud	MC	Université de Khenchela
Encadreur : Mme. Bessam Besma	MC	Université de Khenchela
Examineur : Dr. Boumaaref Abdelaali	MC	Université de Khenchela

Année universitaire 2022/2023

REMERCIEMENT

*Notre premier Remerciement va à Allah Soubhanhou
watahala.*

Nous tenions à remercier vivement notre encadreur,

"BESSMA BESSAM",

Pour sa gentillesse, sa disponibilité et sa contribution générale

à l'élaboration

De ce travail.

Nous souhaiterons également remercier nos enseignants

de la faculté de la technologie

*Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous
nos proches et amis qui nous ont toujours soutenu et encouragé*

pour la réalisation de ce mémoire

DEDICACES

Je dédie ce fruit de travail :

À ma mère et à mon père qui ont tout le crédit.

À mes frères et toute la famille. À tous les amis.

À tous mes professeurs

*À tous mes collègues et régiment spécial « commande
électriques ».*

À vous tous un grand merci.

*À mon binôme AMRAN que je remercie pour avoir partagé
avec moi ces moments pour la réalisation de ce modeste travail
et j'espère en garder de très bons souvenirs.*

ANWAR

DEDICACES

Je dédie ce fruit de travail :

À ma mère et à mon père qui méritent tout le crédit.

À mes frères et à toute la famille. À tous les amis.

À tous mes professeurs.

Un grand merci à vous tous.

Je remercie également mon binôme Anwar d'avoir partagé avec moi ces moments pour la réalisation de ce modeste travail et j'espère en conserver de très bons souvenirs.

AMRANE

Résumé

Le travail présenté dans cette note de mémoire porte sur le diagnostic moteur et l'extraction des défauts les plus importants, ainsi que sur l'analyse grâce à des techniques avancées telles que l'analyse de l'ondelette. L'objectif est de simuler le comportement d'un moteur asynchrone dans son état sain et lorsqu'il y a une rupture de ses barres rotoriques, puis d'extraire diverses propriétés électriques et mécaniques pour les analyser à l'aide de l'analyse de l'ondelette, puis nous les analysons jusqu'à ce qu'ils soient les derniers par paquets d'ondelette afin d'approfondir l'étude du moteur et de connaître les changements les plus importants du moteur, et nous allons analyser l'énergie présente dans le moteur pour connaître l'effet de la cassure des barres sur celui-ci.

Mots clés: Machine asynchrone, défaut rotorique, cassure de barres, diagnostic, ondelette.

Abstract

The work presented in this thesis focuses on motor diagnostics and the extraction of the most important defects, as well as on analysis using advanced techniques such as wavelet analysis. The objective is to simulate the behavior of an asynchronous motor in its healthy state and when there is a breakage of its rotor bars, then to extract various electrical and mechanical properties to analyze them using wavelet analysis, then we analyze them until they are the last in wavelet packets in order to deepen the study of the motor and to know the most important changes in the motor, and we will analyze the energy present in the motor to know the effect of the breakage of the bars on it.

Keywords: Asynchronous machine, rotor fault, broken bars, diagnosis, wavelet.

ملخص

يركز العمل المقدم في هذه الأطروحة على التشخيص الحركي واستخراج أهم العيوب ، وكذلك على التحليل باستخدام تقنيات متقدمة مثل تحليل الموجات. الهدف هو محاكاة سلوك المحرك غير المتزامن في حالته الطبيعية وعندما يكون هناك كسر في قضبان الدوار ، ثم استخراج الخواص الكهربائية والميكانيكية المختلفة لتحليلها باستخدام تحليل الموجات ، ثم نقوم بتحليلها حتى تصبح الأخيرة في حزم الموجات من أجل تعميق دراسة المحرك ومعرفة أهم التغييرات في المحرك ، وسنقوم بتحليل الطاقة الموجودة في المحرك لمعرفة تأثير كسر القضبان عليه.

الكلمات المفتاحية: آلة غير متزامنة ، خطأ دوار ، قضبان مكسورة ، تشخيص ، موجة.

Table des matières

Remerciement

Dédicace

Résumé

Table des matières

Liste des figures

List des tableaux

Liste des abréviations et symboles utilisés

Introduction générale 1

CHAPITRE I :

Machine asynchrone triphasée à cage : description, modélisation et défaillances

I.1. Introduction..... 4

I.2. Les principaux défauts dans la machine asynchrone triphasée a cage..... 4

 I.2.1. Défauts statoriques:..... 4

 I.2.2.Défauts rotoriques:..... 4

I.3.Methodes de diagnostic des défauts basees sur l'analyse spectrale des signaux..... 5

 I.3.1. Diagnostic par mesure des vibrations mécaniques 5

 I.3.2.Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite..... 5

 I.3.3.Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites 6

 I.3.4. Diagnostic par mesure du couple électromagnétique..... 6

 I.3.5.Diagnostic par mesure de la puissance instantanée 7

 I.3.6. Diagnostic par mesure du courant statorique 7

I.4. Diagnostic des défauts par l'estimation paramétrique..... 7

I.5. Signatures spectrales des défauts dans le spectre du courant statorique 8

 I.5.1.Défauts statoriques 8

 I.5.2.1.Cassure de barres rotoriques 9

 I.5.2.2. Excentricité d'entrefer 9

 I.5.3.Défauts au niveau des roulements..... 10

I.6. Modélisation du moteur asynchrone triphasé a cage 11

Table des matières

I.6.1. Approche numérique.....	12
I.6.2. Approche analytique	12
I.7. Le modelé multi-enroulements de la machine asynchrone Triphasé a cage	12
I.7.1. Hypothèses simplificatrices	12
I.7.2. Calcul des inductances	13
I.7.2.1. Inductances statoriques	13
I.7.2.2. Inductances rotoriques	14
I.7.2.3. Inductance mutuelle stator et rotor	15
I.7.3. Mise en équations	16
I.7.3.1. Equations de tensions au stator	17
I.7.3.2. Equations de tensions au rotor	17
I.7.3.3. Equation globale des tensions	18
I.7.4. Expression du couple électromagnétique.....	21
I.8. PRIS EN COMPTE DU DEFAUT DANS LE MODELE.....	22
I.9. CONCLUSION.....	24

CHAPITRE II :

THEORIE DES ONDELETTES ET LEURS APPLICATIONS

II.1. Introduction	26
II.2. De l'analyse de fourier a l'analyse par ondelettes:.....	27
II.2.1. Transformation de Fourier.....	27
II.2.1.1. Définition.....	27
II.2.1.2. Dualité Temps-Fréquences	27
II.2.2. Exemple d'application de la transformée de Fourier FT :.....	28
II.2.2.1. Signal stationnaire :	28
II.2.2.2. Signal non stationnaire :	28
II.2.3. Transformée de Fourier a fenêtre glissante STFT	29
II.2.3.1. Exemple d'application de la transformée de Fourier a fenêtre glissante STFT	30
II.2.3.2. Limitations de la Tf à fenêtre glissante.....	32
II.2.3.2.1. Principe d'incertitude	32

Table des matières

II.3. Transformée en ondelettes.....	33
II.3.1. Définition.....	33
II.3.2. Transformée en ondelettes continue (TOC)	35
II.3.2.1. Définition.....	35
II.3.3. Ondelettes réelles et complexes.....	36
II.3.3.1. Inversion de la transformée en ondelettes continue.....	36
II.3.3.2. Théorème.....	37
II.3.4. Transformée en ondelettes dyadique	37
II.3.4.1. Définition.....	37
II.3.5. Transforme en ondelette discrète (TOD).....	37
II.3.5.1. Décomposition simple	39
II.3.5.2. Décomposition multi niveaux.....	40
II.3.5.3. Reconstruction par ondelette:	40
II.3.5.4. Décomposition et Reconstruction multi-niveau par ondelettes :.....	41
II.4. LES PAQUETS D'ONDELETTES	41
II.4.1. Définition.....	41
II.4.2. La transformée en paquet d'ondelettes	42
II.4.3. Principe des paquets d'ondelettes.....	42
II.4.4. Propriétés d'ondelettes paquets.....	43
II.5. CONCLUSION	44

Chapitre III :

Simulation et résultats

III.1. Introduction.....	46
III.2. Simulation et résultats du modèle multi enroulements	46
III.2.1. Cas d'une machine saine	47
III.2.2. L'état de la machine en Cas -de casse:	48
III.2.2.1.Cas d'une cassure une barre à la charge nominale.....	48
III.2.2.2. Cas d'une cassure de deux barres adjacentes à la charge nominale.....	50
III.2.2.3. Cas d'une cassure de deux barres éloignées à la charge nominale	51

Table des matières

III.2.3. Comparaison du cas d'une machine saine avec le cas de cassure de barre	52
III.3. Analyse des caractéristiques électriques par la technique des ondelettes	53
III.3.1. Analyse du courant statorique par la décomposition multi niveau d'ondelettes	53
III.3.2. Analyse de la vitesse électrique par la décomposition multi niveau d'ondelettes.....	56
III.3.3. Analyse du couple électromagnétique par la décomposition multi niveau d'ondelettes..	59
III.4. Analyse de la caractéristique électrique par la technique d'ondelette paquet.....	61
III.4.1 Analyse du courant statoriques par technique d'ondelette paquet	61
III.4.2 Analyse du la vitesse électrique par technique d'ondelette paquet	66
III.4.3 Analyse du le couple électromagnétique par technique d'ondelette paquet.....	68
III.5 CONCLUSION	70
Conclusion générale	72
Reference bibliographies.....	74
Annexes.....	82

Liste des figures

Liste des figures

CHAPITRE I : Machine asynchrone triphasée à cage : description, modélisation et défaillances	
Figure I.1: Bobine exploratrice pour la mesure du flux de fuite axial [2].	6
Figure I.2 : Dimensions du roulement à bille [24] [10]	10
Figure I.3: Structure de la cage du rotor [2]	14
Figure I.4 : Induction magnétique produite par une maille rotorique [34]	14
Figure I.5: Schéma électrique équivalent des mailles rotorique [2].	17
Figure I.6 : schéma équivalent de la cage rotorique pour : a. Etat sain, b. Avec une barre rompue [39].	23
CHAPITRE II : théorie des ondelettes et leurs applications	
Figure II.1 : Représentation temporelle et fréquentielle „somme de deux sinusoides [53]	28
Figure II.2: Représentation temporelle et fréquentielle „succession de deux sinusoides puis succession de l'inverse [53]	29
Figure II.3 : Représentation temporelle vers STFT [45].	30
Figure II.4 : Algorithme de STFT	31
Figure II.5 Représentation temporelle de la succession de deux sinusoides et leur FT [50]	32
Figure II.6 : Exemple explicatif du d'Heisenberg [49]	33
Figure II.7 : Représentation temporelle vers ondelettes [45]	34
Figure II.8 : Quelques formes des ondelettes usuelles [50].	36
Figure II.9 : Décomposition du signal $S(n)$ en approximations et détails [45]	39
Figure II.10 : Décomposition simple du signal s en approximations et détails	39
Figure II.11 : Décomposition du signal $S(n)$ en multi-niveaux selon Mallat [45]	40
Figure II.12 : Reconstruction simple d'un signal $S(n)$ [45]	41
Figure II.13 Algorithme de MALLAT multi niveau [45]	41
Figure II.14 : Schéma de l'algorithme de décomposition en paquets d'ondelette d'un signal $s(t)$	42
Chapitre III : Simulation et résultats	
Figures III.1: Différents grandeurs électrique et mécaniques pour un fonctionnement sain de la machine	47

Liste des figures

Figures III.2 : Différents grandeurs électrique et mécaniques pour un fonctionnement cassure un barre de la machine	49
Figures III.3 : Différents grandeurs électrique et mécaniques pour un fonctionnement cassure deux barres (1, 2) de la machine	50
Figures III.4 : Différents grandeurs électrique et mécaniques pour un fonctionnement cassure deux barres (1, 3) de la machine	52
Figure III.5 : TOD type multi niveau du courant de la phase i_{as} sen fonctionnement sain : à vide et en charge	54
Figure III.6 : TOD type multi niveau du courant de la phase i_{as} avec défaut d'une barre (1) cassée au rotor	55
Figure III.7 : TOD type multi niveau du courant de la phase i_{as} avec défaut de deux barres (1, 2) cassées au rotor	55
Figure III.8 : TOD type multi niveau de la vitesse de la phase i_{as} en fonctionnement sain en charge	57
Figure III.9 : <i>TOD</i> type multi niveau de la vitesse de la phase i_{as} avec défaut d'une barre (1) cassée au rotor	57
Figure III.10 : <i>TOD</i> type multi niveau de la vitesse de la phase i_{as} avec défaut de deux barres (1, 2) cassées au rotor	58
Figure III.11 : TOD type multi niveau du couple de la phase i_{as} en fonctionnement sain en charge	59
Figure III.12 : TOD type multi niveau du couple de la phase i_{as} avec défaut d'une barre (1) cassée au rotor	60
Figure III.13 : TOD type multi niveau du couple de la phase i_{as} avec défaut de deux barres (1, 2) cassées au rotor	60
Figure III.14 : L'ondelette paquette multi niveau à fonctionnement en charge	63
Figure III.15 : L'ondelette paquette type multi niveau du courant de la phase i_{as} avec défaut d'une barre (1) cassée au rotor	63
Figure III.16 : L'ondelette paquette type multi niveau du courant de la phase i_{as} avec défaut de deux barres (1, 2) cassées	64
Figure III.17 : Variation de l'énergie dans les 16 bandes de fréquence au 9 ^{ième} niveau (db44)	65
Figure III.18 : Zoom de la variation de l'énergie dans les 16 bandes de fréquence au 9 ^{ième} Niveau (db44)	65

Liste des figures

Figure III.19 : L'ondelette paquette type multi niveau de la vitesse de la phase i_{as} en fonctionnement sain en charge	66
Figure III.20 : L'ondelette paquette type multi niveau de la vitesse de la phase i_{as} avec défaut d'une barre (1) cassée au rotor	67
Figure III.21 : L'ondelette paquette type multi niveau de la vitesse de la phase i_{as} avec défaut de deux barres (1, 2) cassées au rotor	67
Figure III.22 : L'ondelette paquette type multi niveau du couple de la phase i_{as} en fonctionnement sain en charge	68
Figure III.23 : L'ondelette paquette type multi niveau du couple de la phase i_{as} avec défaut d'une barre (1) cassée au rotor	69
Figure III.24 : L'ondelette paquette type multi niveau du couple de la phase i_{as} avec défaut de deux barres (1, 2) cassées au rotor	69

List des tableaux

List des tableaux

CHAPITRE I : Machine asynchrone triphasée à cage : description, modélisation et défaillances	
Tableau I.1 : Inductances de la machine asynchrone à cage [34].	16
Chapitre III : Simulation et résultats	
TableauIII.1 : Bandes de fréquences résultantes de la décomposition en paquet d'ondelettes	62
TableauIII.2 : Bandes de fréquences résultantes de la décomposition en paquet dans la bande [0-312.5Hz]	62
TableauIII.3 : L'énergie pour différent nombre de barres cassées	65

Liste des abréviations et symboles utilisés

Liste des abréviations et symboles utilisés

Φ_{rk} : Flux principale créé par une maille rotorique

Φ_s : Flux magnétique par pôle créé par le courant statorique

B_k : Induction magnétique dans l'entrefer produite par une maille rotorique k.

B_{ri} : Induction magnétique créée dans l'entrefer par le courant du système inverse équivalent au rotor.

f_b : La fréquence caractéristique d'un défaut au niveau d'une bille du roulement

$f_{b,ext}$: La fréquence caractéristique d'un défaut au niveau de la bague extérieure du roulement

$f_{b,int}$: La fréquence caractéristique d'un défaut au niveau de la bague intérieure du roulement

i_1 : Valeur maximale du composant inférieur $(1-2g) f_s$ du courant d'alimentation

i_a, i_b, i_c : Courants statoriques

i_{bk} : Courant dans la barre k.

i_{ds}, i_{qs} : Composantes biphasées du courant statorique

i_e : Courant dans l'anneau de court-circuit

i_{ek} : Courants dans une portion d'anneau

i_f : Valeur maximale de la composante fondamentale du courant d'alimentation

i_r : Valeur maximale du composant supérieure $(1-2g) f_s$ du courant d'alimentation

i_{rk} : Courant dans la maille k.

v_a, v_b, v_c : Tensions statoriques

v_m : La valeur maximale de la tension d'alimentation

w_{mag} : Energie magnétique emmagasinée dans l'entrefer

w_r : Vitesse électrique de rotation

w_s : Pulsation statorique

Liste des abréviations et symboles utilisés

β_1 : L'angle de phase de la composante $(1-2g) f_s$

β_r : L'angle de phase de la composante $(1+2g) f_s$

θ_r : Position du rotor

θ_s : Position des grandeurs statoriques

μ_0 : Perméabilité magnétique du vide (de l'air)

φ_{Brd} : Phase du champ tournant rotorique direct

φ_{Bri} : Phase du champ tournant rotorique inverse

φ_{Bs} : Phase du champ tournant statorique

ψ_{ds}, ψ_{qs} : Composantes biphasés du flux statorique

ψ_{sa} : Flux magnétique total créé par i_a et traversant l'enroulement de la phase « a »

$[R_{tr}], [L_{tr}]$: Matrices globales des résistances et des inductances après la transformation du Park

$[R], [L]$: Matrices globales des résistances et des inductances avant la transformation du Park

Δf : Résolution fréquentielle

α : Angle électrique entre deux barres rotoriques

Ce_{srd} : Le couple électromagnétique constant créé par le système du courant direct au rotor

Ce_{sri} : Le couple électromagnétique oscillatoire créé par le système du courant inverse au rotor

f_e : Fréquence d'échantillonnage

F_m : La force magnétomotrice de la phase « a »

α : L'angle de phase du composant fondamental du courant d'alimentation

σ : La force radiale créée par les champs d'entrefer.

Introduction générale

Introduction générale

Le secteur de l'industrie dans ces dernières années a connu un développement important, où les usines d'aujourd'hui utilisent les moteurs électriques. L'un des objectifs ciblés de ce développement est l'augmentation de la productivité et de la rentabilité, de ce fait des moteurs asynchrones ont été mis en place en raison de leur puissance électromagnétique et mécanique, ainsi que de leur faible coût de maintenance [1].

En revanche, malgré toutes ces caractéristiques elle est limitée dans son utilisation à cause de la difficulté de la contrôler dans les systèmes de vitesse limitée. Mais avec le développement de l'électronique de puissance, le moteur asynchrone a devenu capable de contrôler le couple, la vitesse et la rotation, de surcroît il a pu être entré dans plusieurs domaines à l'instar des chemins de fer, l'aviation et l'agriculture. Malgré le fait que le moteur asynchrone soit considéré comme le plus puissant des moteurs électriques, les conditions électriques et mécaniques peuvent causer des pannes dans les parties fixes et tournantes, entraînant des pertes et des coûts économiques importants, ce qui a conduit les ingénieurs à développer une série de techniques de surveillance [2].

De ce fait pour plus de sécurité et du bien-être du moteur il est impératif que nous fassions ces techniques de surveillance dans le but de détecter les défauts le plus tôt possible.

Quoiqu'il existe ces techniques, il arrivera de nombreux dysfonctionnements surviennent dans les pièces internes ou pendant le fonctionnement, c'est pour cette raison que les chercheurs ont développé des techniques de diagnostic afin de déterminer les causes et l'emplacement de ce dysfonctionnement et d'y traiter [3]. Cela a amené les ingénieurs et les chercheurs à développer un ensemble de techniques de surveillance et de diagnostic de ces moteurs afin d'assurer leur bon fonctionnement .ces systèmes de surveillance s'appuient sur des appareils de mesure (ampèremètre / voltmètre), comme pour les systèmes de diagnostic basés sur des programmes de simulation MATLAB. Le but de ces techniques est d'étudier et de connaître les caractéristiques du moteur lors d'un dysfonctionnement de ses parties internes afin de bien diagnostiquer et de trouver les moyens les plus importants de réparer les dysfonctionnements [4].

Où après ce qui précède, nous organiserons la lettre en trois chapitres :

La première chapitre les différents défauts du moteur asynchrone, pour montrer un modèle mathématique du moteur dans un état sain et à une cassure de la barre rotorique. Quant au deuxième chapitre, il est consacré à la présentation des théories et équations les

INRODUCTION GENERALE

plus importantes dans le domaine de L'ondelette transformée pour de les utiliser dans le diagnostic de la cassure des barres rotoriques.

Dans le troisième chapitre, nous construisons un modèle du programme Matlab à travers les équations du premier chapitre pour extraire diverses propriétés électriques et mécaniques à analyser par L'ondelette paquet afin de connaître les différents comportements du moteur lors d'une cassure de la barre rotorique.

Enfin une conclusion clôturera notre travail.

CHAPITRE I :

***Machine asynchrone triphasée à cage
: description, modélisation et
défaillances***

I.1. Introduction

Un des meilleurs types de moteurs électriques dans notre temps est la machine asynchrone pour leur raison de sa rigidité et faible coût, il est donc largement utilisé dans tous les secteurs industriels approximatifs.

Mais malgré ces caractéristiques le machine asynchrone il a beaucoup de négatifs des plus importants dans ses parties internes ou les erreurs dans le fonctionnement que nous allons essayer de montrer les plus importants avec leurs raisons, puis essayer simuler un model un multi-enroulement qui prend en compte la structure du rotor qui est la raison la plus importante pour le choix est sa capacité à simuler pour casser la barre , ou une partie d'épisodes de recuit d cour- circuit. C'est grâce à l'augmentation de la résistante de la barre que l'on veut casser et nous pouvons le faire parce que ce modèle a tous les barres, mais l'un des avantages les plus importants de ce modèle nous a permis de gagner du temps.

I.2. Les principaux défauts dans la machine asynchrone triphasée a cage

Les défaillances usuelles d'une machine asynchrone peuvent être identifiées si l'on exclut les pannes causées par des facteurs intrinsèques tels qu'une conception défectueuse (matériaux inadaptés), une fabrication défailante (erreurs d'usinage) ou un montage incorrect (mauvais serrage, désalignement) du moteur. [5]-[6] :

I.2.1. Défauts statoriques :

- Court-circuit entre phases statoriques ou entre spires d'une même phase.
- Ouverture d'une phase.
- Défaut du circuit magnétique (ruptures de tôles).

I.2.2. Défauts rotoriques :

- Rupture de barres ou d'anneaux de court-circuit.
- Défaut du circuit magnétique (ruptures de tôles).
- Défaut de roulements.

Ces dégâts peuvent avoir pour origines des problèmes de nature très différentes,

En raison de la variété des défauts et des causes pouvant causer une panne dans une machine asynchrone, il est facile de se tromper sur la nature et la localisation exacte de cette panne. Par conséquent, pour établir un diagnostic précis, il est essentiel de

comprendre en détail les mécanismes des défauts à surveiller, ainsi que les effets de ces défauts sur les signaux produits par la machine. [7].

I.3. Methodes de diagnostic des défauts basées sur l'analyse spectrale des signaux

Les techniciens de maintenance effectuent le diagnostic d'une installation industrielle en analysant plusieurs signaux produits par la machine. Ces signaux peuvent être exploités pour détecter et localiser les anomalies affectant le bon fonctionnement de l'installation, grâce à leur évolution temporelle et leur contenu spectral. Selon la littérature spécialisée, les principales techniques de diagnostic utilisées comprennent [7].

I.3.1. Diagnostic par mesure des vibrations mécaniques

Selon la référence [8], la méthode la plus couramment utilisée pour diagnostiquer les défauts dans les machines asynchrones est l'analyse des vibrations mécaniques. Les vibrations sont générées par les forces radiales induites par le champ d'entrefer de la machine asynchrone, qui sont proportionnelles au carré de l'induction magnétique [9].

$$\sigma(\theta, t) = \frac{B_s^2(\theta, t)}{2\mu_0} \quad (\text{I-1})$$

La distribution de l'induction magnétique dans l'entrefer, est le produit de la F.m.m (Fm) et de la perméance (P).

$$B_s = Fm \cdot P \quad (\text{I-2})$$

Des accéléromètres sont utilisés pour mesurer les vibrations de la machine, puis les spectres de ces signaux sont comparés à ceux enregistrés lorsque le moteur est en bon état de fonctionnement. Cette méthode permet la détection de défauts électriques et mécaniques, car la force magnétomotrice inclut les effets des asymétries du stator ou du rotor, tandis que la préséance est influencée par les variations de l'entrefer, causées par des facteurs tels que les ouvertures des encoches statoriques et rotoriques, ainsi que l'excentricité. [10].

I.3.2. Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite

Un défaut quelconque dans la machine asynchrone entraîne un déséquilibre électrique et magnétique entre le stator et le rotor, ce qui perturbe la répartition du champ magnétique à l'intérieur et à l'extérieur de la machine. Plusieurs auteurs se sont penchés sur l'utilisation du flux axial pour diagnostiquer ces défauts. En effet, en enroulant une bobine autour de l'arbre de la machine, il est possible de générer une force électromotrice. Le

spectre de cette tension induite peut être utilisé pour détecter divers défauts au niveau du stator ou du rotor [10].

L'analyse spectrale de la tension induite permet d'identifier différents types d'asymétries et de défauts. Les harmoniques présents dans les flux de fuites axiaux du stator et du rotor sont directement liés aux harmoniques présents dans les courants du stator et du rotor, respectivement. La conséquence directe d'un défaut est une augmentation du flux de fuite axial, qui doit être important pour pouvoir utiliser cette technique de diagnostic basée sur le flux de fuite axial. [2].

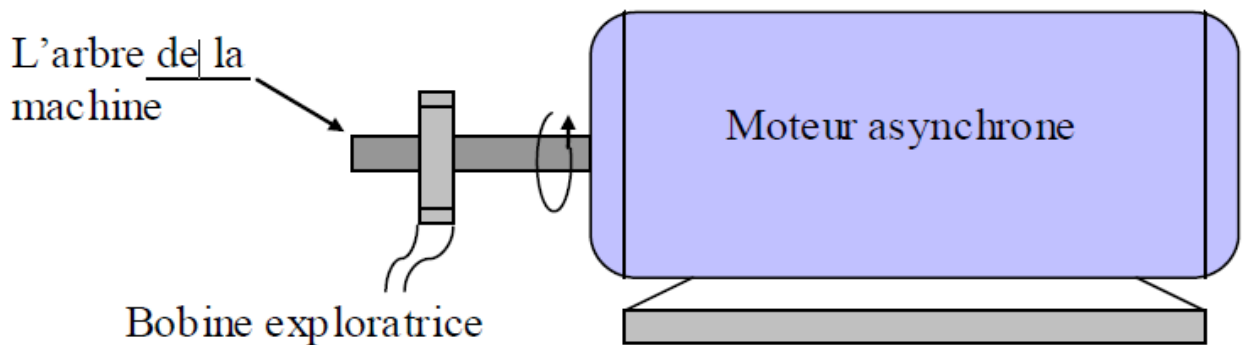


Figure I.1: Bobine exploratrice pour la mesure du flux de fuite axial [2].

I.3.3. Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites

En 1999, J. Milimonfared a proposé une technique alternative pour détecter les défauts rotoriques dans les machines asynchrones. Cette méthode se base sur l'analyse de la fréquence du contenu de la tension générée par le flux rotorique dans les enroulements du stator lors de la déconnexion du moteur du réseau électrique. La défaillance d'une barre du rotor affecte directement la tension induite dans les enroulements du stator. Néanmoins, il est impossible d'appliquer cette technique dans le cas d'un moteur faisant partie d'une chaîne de production [10].

I.3.4. Diagnostic par mesure du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique généré dans les machines électriques résulte de l'interaction entre les champs statorique et rotorique. Ainsi, tout défaut, que ce soit au niveau du stator ou du rotor, a un impact direct sur le couple électromagnétique. L'analyse spectrale de ce signal fournit des informations utiles sur l'état de la machine. Toutefois, l'inconvénient majeur de cette méthode est le coût élevé de l'équipement nécessaire pour acquérir cette grandeur [10].

I.3.5. Diagnostic par mesure de la puissance instantanée

L'utilisation de la puissance instantanée pour la détection des défauts dans les moteurs asynchrones, a fait l'objet des nombreux travaux [11]-[12]-[13].

La puissance instantanée est définie comme la somme des produits des courants et des tensions dans les trois phases statoriques. Ainsi, l'information fournie par cette grandeur est plus complète que celle fournie par le courant d'une seule phase, ce qui constitue un avantage majeur de cette méthode par rapport aux autres.

I.3.6. Diagnostic par mesure du courant statorique

Le courant statorique est l'un des signaux les plus pertinents pour la détection des défauts, car il est facilement accessible et permet de détecter à la fois les défauts électriques et mécaniques [14]-[15]-[16]-[17]. Cette méthode est connue sous le nom d'"Analyse de la Signature de Courant du Moteur" (MCSA) dans la littérature. Les défauts de la machine asynchrone se manifestent dans le spectre du courant statorique sous forme de :

- ❖ Les raies spectrales qui apparaissent sont directement liées à la fréquence de rotation de la machine, aux fréquences des champs tournants ainsi qu'aux paramètres physiques de la machine, tels que le nombre d'encoches rotoriques et le nombre de paires de pôles.
- ❖ La variation de l'intensité des pics spectraux préalablement identifiés dans le spectre du courant statorique est un indicateur de la présence de défauts. Cependant, la surveillance de la machine via cette méthode requiert une bonne compréhension des différents types de défauts et de leurs caractéristiques spectrales correspondantes.

M. Cardoso [18] a présenté l'approche du vecteur de Park. Cette approche utilise les grandeurs biphasées i_{ds} et i_{qs} pour l'obtention de la courbe de lissage : $i_{qs} = (f i_{ds})$.

Le changement de l'épaisseur et de la forme de cette courbe donne une information sur le défaut. L'Approche du Vecteur de Park Étendu, qui est basée sur l'analyse spectrale du module du vecteur de Park, a été proposée dans [19].

I.4. Diagnostic des défauts par l'estimation paramétrique

La méthode d'estimation paramétrique pour détecter et localiser les défaillances consiste à identifier les valeurs numériques des paramètres structuraux d'un modèle qui décrit le comportement dynamique du système, comme décrit dans la littérature [20]. La

première étape de cette méthode est donc d'élaborer un modèle mathématique ayant une complexité raisonnable pour caractériser le fonctionnement normal et dégradé de la machine. Le choix du modèle est déterminant pour la détection des différents types de défauts, qu'ils soient statoriques ou rotoriques. En effet, la capacité de discriminer les défauts au niveau des paramètres physiques estimés permet de les détecter et de les localiser.

On utilise souvent le modèle de Park pour l'estimation paramétrique en diagnostic [20]-[21]. Les défauts de cassure de barres entraînent une augmentation de la résistance rotorique apparente, ce qui a conduit M. S. Nait [22] à utiliser le filtre de Kalman étendu pour estimer cette résistance, puis la comparer à sa valeur nominale pour détecter les cassures de barres. Cette technique permet de détecter efficacement les modifications de la symétrie du champ magnétique dues à un défaut rotorique.

I.5. Signatures spectrales des défauts dans le spectre du courant statorique

I.5.1. Défauts statoriques

L'examen du spectre du courant statorique en état permanent peut fournir des informations sur les défaillances du rotor telles que les cassures de barres, le court-circuit d'anneaux ou l'excentricité de l'entrefer [16] :

$$f_{cs} = f_s \left\{ \frac{n}{p} (1 - g) \pm k \right\} \quad (\text{I.3})$$

Où

- f_{cs} : fréquence de court-circuit ;
- $n = 1, 2, 3, \dots, n \in \mathbb{N}$;
- p = nombre de pair de pôles ;
- g = glissement ;
- $k = 1, 2, 3, \dots, k \in \mathbb{N}$.

I.5.2. Défauts rotoriques

Les défaillances rotoriques, comme les ruptures de barres, les anneaux de court-circuit et l'excentricité d'entrefer, peuvent être détectées en analysant le spectre du courant statorique en régime permanent. [23] [24].

I.5.2.1. Cassure de barres rotoriques

Une asymétrie rotorique générée par la présence de barres rotoriques cassées produit des raies spectrales autour de la fréquence fondamentale f_s [25] telles que :

$$f_{brc} = f_s(1+2kg) \quad (I.4)$$

I.5.2.2. Excentricité d'entrefer

Il y a deux types d'excentricité : statique (déformation du corps du stator, positionnement incorrecte du rotor) et dynamique (lorsque le centre du rotor n'est pas le centre de rotation).

Les excentricités d'entrefer peuvent être détectées, en surveillant les raies latérales de la fréquence d'alimentation [15]-[26] :

$$f_{exc} = f_s \left[1 \pm k \frac{(1-g)}{p} \right] \quad (I.5)$$

Où:

- f_{exc} = Fréquence d'excentricité
- $k = 1, 2, 3, \dots, k \in \mathbb{N}$
- g = le glissement,
- P = nombre de paires de pôles,
- F = fréquence d'alimentation.

La détection des excentricités est aussi possible en surveillant les harmoniques principales d'encoches du courant et certaines de leurs composantes spectrales latérales [9]-[27]. Cette méthode nécessite la connaissance du nombre d'encoches rotoriques N_e .

$$f_{enc+exc} = f_s \left[(kN_e \pm n_d) \frac{(1-g)}{p} \pm n_w \right] \quad (I.6)$$

Où:

- f_{exc} = Fréquence d'excentricité
- $k = 1, 2, 3, \dots, k \in \mathbb{N}$
- g = le glissement,
- N_e = nombre d'encoches au rotor,
- P = nombre de paires de pôles,
- $n_d \in \mathbb{N}$
- $n_w = 1, 3, 5, \dots, n_w \in \mathbb{N}$
- F = fréquence d'alimentation.

$n_d = 0$, dans le cas d'une excentricité statique $etn_d = 1$, dans le cas d'une excentricité dynamique.

La présence d'une excentricité statique entraîne une modification de l'amplitude des harmoniques principales d'encoches du courant statorique, tandis qu'une excentricité dynamique produit l'apparition de nouvelles raies spectrales.

1.5.3. Défauts au niveau des roulements

Les défauts dans les roulements de la machine provoquent des mouvements radiaux entre le rotor et le stator, car les éléments roulants soutiennent le rotor. Cela entraîne des variations d'entrefer qui génèrent des raies spectrales de fréquence dans le courant statorique. [15] :

$$f_{roul} = |f_s \pm kf_v| \tag{I.7}$$

Où

- $k = 1, 2, 3$
- f_v est l'une des fréquences caractéristiques des vibrations
- f_s est la fréquence d'alimentation
- f_{roul} la fréquence des défauts de roulement reflétés dans le courant du stator.

Nous pouvons d'abord considérer la valeur entière de $k = 1$.

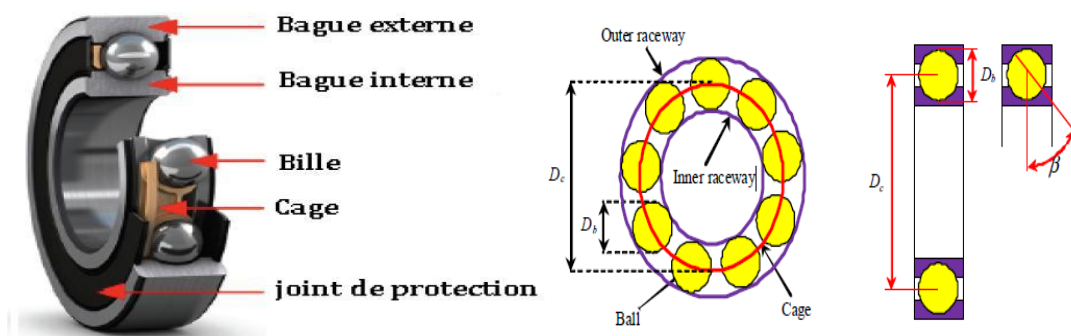


Figure I.2 : Dimensions du roulement à bille [24] [10].

Les fréquences caractéristiques des vibrations dépendent de l'élément du roulement affecté par un défaut et sont liées aux paramètres physiques du roulement.

Selon [15], les fréquences de vibration qui caractérisent les défauts des roulements à bille sont :

- Défaut au niveau d'une bille :

$$f_b = \frac{Dp}{Db} f_{rot} \left[1 - \left(\frac{Db}{Dp} \cos(\beta) \right)^2 \right] \quad (I.8)$$

- Défaut sur la bague intérieure :

$$f_{b.int} = \frac{n_b}{2} f_{rot} \left[1 + \frac{Db}{Dp} \cos(\beta) \right] \quad (I.9)$$

- Défaut sur la bague extérieure :

$$f_{b.ext} = \frac{n_b}{2} f_{rot} \left[1 - \frac{Db}{Dp} \cos(\beta) \right] \quad (I.10)$$

Où :

- f_{rot} : fréquence de rotation mécanique du rotor
- Db : Diamètre de la bille (Ball).
- Dp : Diamètre du palier
- β : angle de contact de la bille avec la cage
- n_b : nombre de billes ;

Pour des dimensions courantes où le nombre de billes comprises entre 6 et 12, pour cela, il est usuel d'appliquer les deux relations suivantes :

$$f_{b.int} = 0.6 n_b f_{rot} \quad (I.11)$$

$$f_{b.ext} = 0.4 n_b f_{rot} \quad (I.12)$$

I.6. Modélisation du moteur asynchrone triphasé à cage

La modélisation et la simulation des machines électriques sont des étapes clés du processus de diagnostic, permettant de vérifier les algorithmes de détection des défauts et de créer des bases de données sur les manifestations électriques et magnétiques des défauts. Il est donc essentiel de créer un modèle adapté au problème spécifique à traiter et de décrire de manière précise et détaillée le comportement de la machine, en prenant en compte à la fois sa moyenne et ses variations.

Il existe différentes approches de modélisation qui sont actuellement utilisées pour étudier divers problèmes tels que la commande, la conception ou la surveillance. Dans notre cas, nous nous concentrons spécifiquement sur les modèles qui simulent le comportement électromagnétique de la machine asynchrone, dans le but de faciliter le diagnostic des défauts.

Parmi les approches de modélisation, nous citons deux :

I.6.1. Approche numérique

On cite deux méthodes :

- **La méthode des réseaux de perméance :**

La méthode de modélisation consiste à diviser la machine en plusieurs tubes de flux, chacun étant caractérisé par une perméance. La dynamique de la machine est prise en compte en ajustant la perméance d'entrefer en fonction de la position du rotor, tout en prenant en compte la saturation. [29].

- **La méthode des éléments finis :**

La méthode consiste à diviser la machine en éléments suffisamment petits pour que le matériau magnétique soit linéaire sur chaque surface. En utilisant les équations de MAXWELL, il est possible de résoudre le problème. Les éléments finis permettent de simuler de manière précise le comportement électromagnétique de la machine et de reproduire les défauts de manière réaliste. Cependant, les temps de calcul sont élevés, ce qui limite l'utilisation de cette méthode pour la simulation des algorithmes de détection des défauts. [30].

I.6.2. Approche analytique

Les modélisations analytiques se basent sur le concept d'inductance, qui traduit la relation linéaire entre le flux et le courant. Cette approche permet d'obtenir un schéma électrique équivalent de la machine en prenant en compte l'ensemble des phénomènes électromagnétiques. La théorie des circuits est ensuite utilisée pour établir les équations différentielles qui décrivent le fonctionnement de la machine. [10].

I.7. Le modèle multi-enroulements de la machine asynchrone Triphasé à cage

I.7.1. Hypothèses simplificatrices

Le domaine des systèmes électromagnétiques requiert des compétences à la fois dans la compréhension des phénomènes physiques pour leur modélisation et dans le calcul numérique. Ainsi, le choix des hypothèses d'étude et des objectifs du modèle est crucial car ils déterminent la complexité du travail à effectuer et l'utilisation d'outils appropriés. Pour cette raison, nous avons dû faire certaines hypothèses simplificatrices importantes mais largement acceptées :

- Perméabilité relative des fers très grands.

- Entrefer lisse et constant, effet d'excentricité négligeable, camp radial.
- Distribution sinusoïdale de la force magnétomotrice statorique.
- Pas de saturation, effets pelliculaires nuls, courants de Foucault négligeables hors des barres rotoriques.

Avec ces hypothèses, et en supposant un stator sain de constitution symétrique, nous avons calculés, les différents paramètres du modèle [31].

I.7.2. Calcul des inductances

I.7.2.1. Inductances statoriques

Nous supposons que l'enroulement statorique triphasé est à distribution idéale autour du périphérique de l'entrefer. Par conséquent, le champ résultant a une forme sinusoïdale. L'expression de la F.m.m de la phase "a" est donnée par la relation suivante [32] :

$$Fm(\theta) = \frac{2N_s i_a}{p\pi} \cos(\theta) \quad (\text{I-13})$$

θ : est un angle électrique décrivant une position dans l'espace.

D'où l'induction créée dans l'entrefer :

$$B_s(\theta) = \frac{2\mu_0 N_s i_a}{ep\pi} \cos(\theta) \quad (\text{I-14})$$

Le flux magnétique dans l'entrefer, par pôles, est obtenu par intégration de l'expression (II.2) autour d'un intervalle polaire le long de la machine :

$$\Phi_s = \int_s \int B_s dS = \int_0^1 dz \int_{-\frac{\pi}{2p}}^{\frac{\pi}{2p}} B_s R d\theta \quad (\text{I-15})$$

On obtain:

$$\Phi_s = \frac{4\mu_0 N_s R^2}{\pi e p^2} i_a \quad (\text{I-16})$$

Le flux magnétique total traversant l'enroulement de la phase "a" dû au courant i_a :

$$\Psi_{sa} = N_s \Phi_s = N_s i_a \frac{2\mu_0 N_s R^2}{ep^2 \pi} \int_{-\frac{\pi}{2p}}^{\frac{\pi}{2p}} \cos(\theta) d\theta = L_{sp} i_a \quad (\text{I-17})$$

L'inductance principale (magnétisante) de la phase "a" statorique est donnée donc par :

$$L_{sp} = L_{ms} = \frac{4\mu_0 N_s^2 R^2}{ep^2} \quad (\text{I-16})$$

L'inductance totale (propre) de la phase "a", est égale à la somme de l'inductance de

magnétisation et l'inductance de fuite :

$$L_{as} = L_{sp} + L_{sf} \tag{I-17}$$

Puisque les enroulements statoriques sont symétriques, les inductances propres des trois phases sont égales ($L_{as} = L_{bs} = L_{cs} = L_s$).

L'inductance mutuelle entre les phases statoriques est :

$$M_s = - \frac{L_{sp}}{2} \tag{I-18}$$

I.7.2.2. Inductances rotoriques

Le schéma électrique équivalent du rotor est représenté sur la figure I.3, où le rotor est modélisé par une série de circuits élémentaires (mailles) constitués de deux barres et de deux portions d'anneaux les reliant à chaque extrémité. Cette configuration des circuits rotoriques offre la possibilité de détecter une rupture de barre ou de portion d'anneau quelconque. [33].

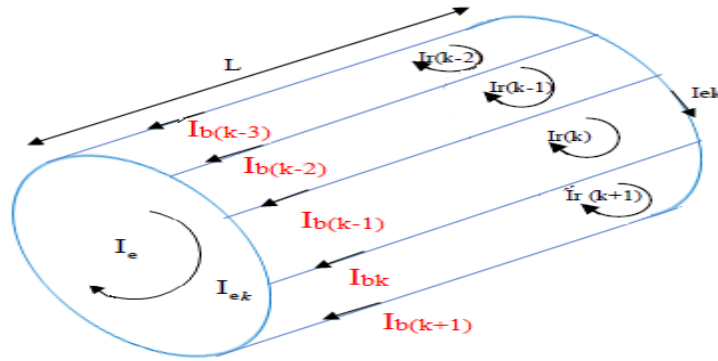


Figure I.3: Structure de la cage du rotor [2]

La figure I.4 représente en fonction de θ' , l'allure de l'induction magnétique, supposé radiale, produite par une maille rotorique "k" dans l'entrefer.

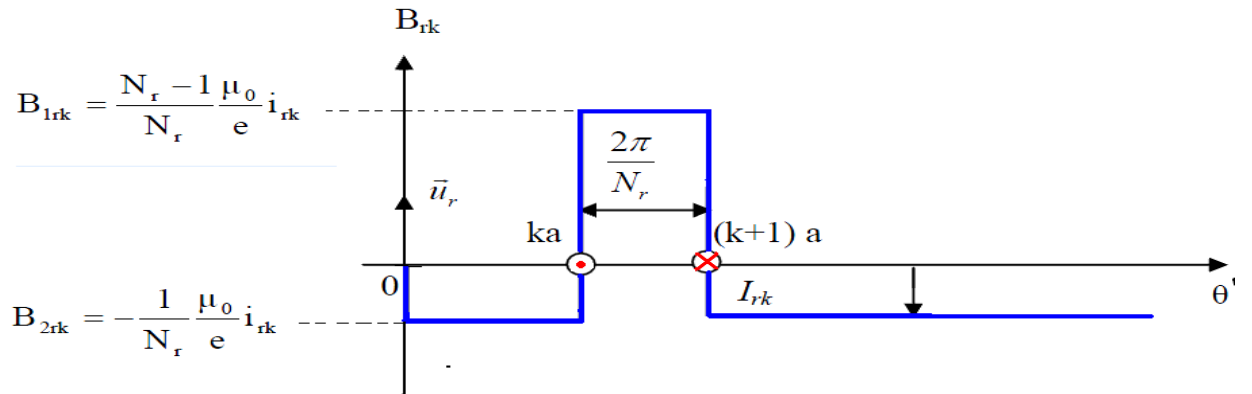


Figure I.4 : Induction magnétique produite par une maille rotorique [34]

Chaque maille rotorique, considérée comme une bobine à une seule spire, parcourue par un courant i_{rk} , est le siège d'un flux principale exprimé par :

$$\Phi_{rk} = \int_0^1 dz \int_{ka}^{(k+1)a} \left(\frac{N_r - 1}{N_r} \frac{\mu_0}{e} R i_{rk} \right) d\theta' = \frac{N_r - 1}{N_r^2} \mu_0 \frac{2\pi R^2}{e} i_{rk} \quad (I-19)$$

Et par la suite, l'inductance principale d'une maille rotorique est :

$$L_{rp} = \frac{N_r - 1}{N_r^2} \mu_0 \frac{2\pi}{e} R^2 \quad (I-20)$$

L'inductance totale de la $k^{\text{ème}}$ maille rotorique est égale à la somme de son inductance principale, des inductances de fuite des deux barres et des inductances de fuite des deux portions d'anneaux de court-circuit fermant la maille k . Donc l'expression est donnée par :

$$L_{rr} = L_{rp} + 2L_b + 2L_e \quad (I-21)$$

Les mailles rotoriques sont magnétiquement couplées par l'intermédiaire du flux rotorique d'entrefer. Le flux traversant la $j^{\text{ème}}$ maille, produit par le courant i_{rk} circulant dans la maille k est donné par :

$$\Phi_{rjrk} = \int_0^1 dz \int_{ja}^{(j+1)a} \left(-\frac{1}{N_r} \frac{\mu_0}{e} R i_{rk} \right) d\theta' \quad (I-22)$$

Donc, l'inductance mutuelle entre mailles rotoriques non adjacentes, est exprimée par la relation suivante :

$$M_{rr} = -\frac{1}{N_r^2} \frac{2\pi\mu_0}{e} R^2 \quad (I-23)$$

L'inductance mutuelle entre la $k^{\text{ème}}$ maille et les mailles adjacentes est donnée par :

$$M_{r_{k(k-1)}} = M_{r_{k(k+1)}} = M_{rr} - L_b \quad (I-24)$$

I.7.2.3. Inductance mutuelle stator et rotor

La transformation dans le repère lié au rotor de l'équation (I.14), donne :

$$B_s(\theta') = \frac{2\mu_0 N_s i_a}{e p \pi} \cos[(\theta' + \omega_r t)] \quad (I-25)$$

Avec : $\theta = \theta' + \omega_r t$

D'où le flux traversant la maille k , produit par le courant i_a , est donné par :

$$\Phi_{rka} = \int_0^1 dz \int_{ka}^{(k+1)a} B_s(\theta') R d\theta' \quad (I-26)$$

L'intégrale de l'équation ci-dessus conduit à :

$$\Phi_{rka} = L_{sr} i_a \cos[\omega_r t + ka] \quad (I-27)$$

L'inductance mutuelle entre la maille k et la phase "a" est donnée donc par la relation suivante :

$$M_{rka} = L_{sr} \cos(\omega_r t + k_a) \quad (I-28)$$

$$\text{Avec: } L_{sr} = \frac{4\mu_0 N_s R_1}{e\pi p^2} \sin\left(\frac{a}{2}\right) \quad (I-29)$$

$a = p \frac{2\pi}{N_r}$ est l'angle électrique entre deux maille rotorique.

De même, les inductances mutuelles entre la $k^{\text{ème}}$ maille et les phases "b" et "c", sont exprimées par :

$$M_{rkb} = L_{sr} \cos\left(\omega_r t + k_a - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (I-30)$$

$$M_{rkc} = L_{sr} \cos\left(\omega_r t + k_a - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (I-31)$$

Le tableau suivant, résume les expressions de toutes les inductances de la machine asynchrone à cage.

INDUCTANCES	EXPRESSIONS
L'inductance principale d'une phase statorique.	$L_{sp} = L_{ms} = \frac{4\mu_0 N_s^2 R_1}{e\pi p^2}$
L'inductance mutuelle entre phases statoriques.	$M_s = -\frac{L_{sp}}{2}$
L'inductance totale d'une phase statorique.	$L_{as} = L_{bs} = L_{cs} = L_s = L_{sp} + L_{sf}$
L'inductance principale d'une maille rotorique.	$L_{rp} = \frac{N_r - 1}{N_r^2} \mu_0 \frac{2\pi}{e} R_1$
L'inductance mutuelle entre mailles rotoriques non adjacentes.	$M_{rr} = -\frac{\mu_0}{N_r^2} \frac{2\pi}{e} R_1$
L'inductance mutuelle entre mailles rotoriques adjacentes.	$M_{r_{k(k-1)}} = M_{r_{k(k+1)}} = M_{rr} - L_b$
L'inductance mutuelle entre une maille rotorique et une phase statorique "a".	$M_{rk sa} = L_{sr} \cos(p\omega_r t + k a)$ Avec : $L_{sr} = \frac{4\mu_0 N_s R_1}{e\pi p^2} \sin\left(\frac{a}{2}\right)$

Tableau I.1 : Inductances de la machine asynchrone à cage [34].

I.7.3.Mise en équations

L'objectif est de réaliser une simulation numérique qui nécessite des équations aussi simples que possible. Il est également possible de considérer les défauts sans avoir à reformuler entièrement les équations de la machine et de son environnement.

En analysant la structure du circuit électrique, notre objectif est de déterminer l'ensemble des équations différentielles indépendantes qui régissent l'évolution des courants. Cette démarche nous conduit à une forme classique de modélisation. [35] :

$$\left\{ \frac{d}{dt} [I] = -[L]^{-1}[R][I] + [L]^{-1}[V] \right. \quad (I-32)$$

I.7.3.1. Equations de tensions au stator

$$[V_{abc}] = [R_s][i_{abc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{abc}] \quad (I-33)$$

D'où :

$$[\Phi_{abc}] = [L_s][i_{abc}] + [M_{sr}][i_{rk}] \quad (I-34)$$

Avec :

$[V_{abc}] = [V_a V_b V_c]^T$, le vecteur de tensions statoriques.

$[i_{abc}] = [i_a i_b i_c]^T$, le vecteur de courants statoriques.

$[i_{rk}] = [i_{r0} i_{r1} \dots i_{rk} \dots i_{r(N_r-1)}]^T$, le vecteur de courants dans les mailles rotoriques.

$[\Phi_{abc}] = [\Phi_a \Phi_b \Phi_c]^T$, le vecteur de flux statoriques.

$[R_s]$: matrice des résistances statoriques.

$$[R_s] = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \quad (I-35)$$

$[L_s]$: matrice des inductances statoriques.

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{as} & M_s & M_s \\ M_s & L_{bs} & M_s \\ M_s & M_s & L_{cs} \end{bmatrix} \quad (I-36)$$

$[M_{sr}]$: matrice des inductances mutuelles entre phases statoriques et mailles rotoriques.

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} \dots & L_{sr} \cos(\theta_r + ka) & \dots \\ \dots & L_{sr} \cos\left(\theta_r + ka - \frac{2\pi}{3}\right) & \dots \\ \dots & L_{sr} \cos\left(\theta_r + ka - \frac{4\pi}{3}\right) & \dots \end{bmatrix} \quad (I-37)$$

Où : $k = 0, 1, 2, \dots, N_r - 1$

I.7.3.2. Equations de tensions au rotor

La figure (I.5) présente une boucle k du rotor, et montre les conventions choisies pour les courants.

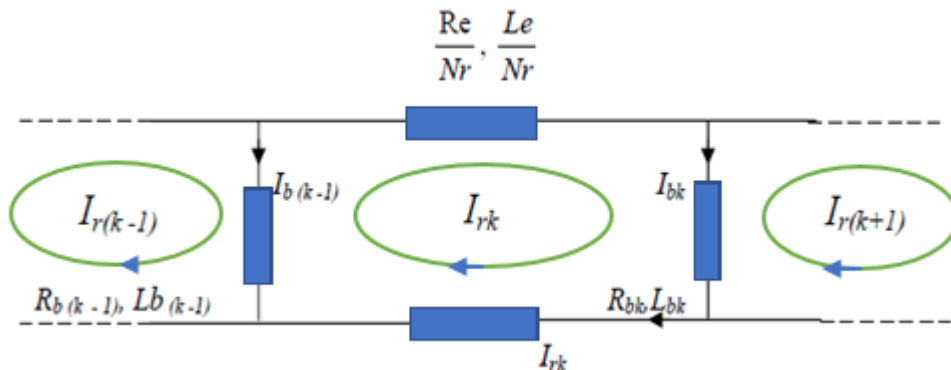


Figure I.5: Schéma électrique équivalent des mailles rotorique [2].

Sachant que :

$$i_{ek} = i_{rk} - i_e$$

$$i_{bk} = i_{rk} - i_{r(k+1)}$$

L'équation de tension pour une maille " k " de la cage rotorique est donnée par :

$$R_{bk}i_{r(k-1)} + \left(2\frac{R_e}{N_r} + R_{b(k+1)} + R_{bk}\right)i_{rk} - R_{bk}i_{r(k+1)} - \frac{R_e}{N_r}i_e + \frac{d}{dt}\phi_{rk} = 0 \quad (I-38)$$

Avec:

$$\phi_{rk} = \left(L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r}\right)i_{rk} - M_{rr}\sum_{j=0}^{N_r-1} i_{rj} - L_b(i_{r(k-1)} + i_{r(k+1)}) - \frac{L_e}{N_r}i_e - L_{sr} \left[\cos(\theta_r + ka) : \cos\left(\theta_r + ka - \frac{2\pi}{3}\right) : \cos\left(\theta_r + ka - \frac{4\pi}{3}\right) \right] [i_{abc}] \quad (I-39)$$

Il faut compléter le système d'équations des circuits du rotor par celle de l'anneau de court-circuit, on a alors :

$$\frac{R_e}{N_r}\sum_{k=0}^{N_r-1} i_{rk} + \frac{L_e}{N_r}\sum_{k=0}^{N_r-1} \frac{d}{dt}i_{rk} - R_e i_e - L_e \frac{d}{dt}i_e = 0 \quad (I-40)$$

I.7.3.3. Equation globale des tensions

L'équation globale des tensions est donnée par :

$$[V] = [R][I] + [L]\frac{d[I]}{dt} + \frac{d[L]}{dt}[I] \quad (I-41)$$

Avec :

$[V] = [v_a v_b v_c : 0 \ 0 \ \dots \ 0 : 0]^T$, le vecteur global des tensions ($N_r+4 \times 1$), il contient les trois tensions statoriques et les N, tensions des mailles rotoriques, ainsi que la tension de l'anneau de court-circuit.

$[I] = [i_a i_b i_c : i_{r0} i_{r1} \dots i_{rk} \dots i_{r(N_r-1)} : i_e]^T$, le vecteur global des courants ($N_r+4 \times 1$), il contient les trois courants statoriques et les N; courants des mailles rotoriques, ainsi que le courant de l'anneau de court-circuit.

$$[R] = \begin{bmatrix} [R_s] & \vdots & [0] \\ \dots & \vdots & \dots \\ [0] & \vdots & [R_r] \end{bmatrix}, \text{ la matrice globale des résistances.}$$

Avec :

$[R_r]$: la matrice des résistances rotoriques.

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_{b0} + R_{b(N_r-1)} + 2\frac{R_e}{N_r} & -R_{b0} & 0 & \dots & -R_{b(N_r-1)} & \vdots & -\frac{R_e}{N_r} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & R_{b(k-1)} & R_{bk} + R_{b(k-1)} + 2\frac{R_e}{N_r} & -R_{bk} & 0 & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -R_{b(N_r-1)} & 0 & \dots & -R_{b(N_r-2)} & R_{b(N_r-1)} + R_{b(N_r-2)} + 2\frac{R_e}{N_r} & \vdots & -\frac{R_e}{N_r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\frac{R_e}{N_r} & \dots & \dots & \dots & -\frac{R_e}{N_r} & \vdots & R_e \end{bmatrix} \quad (I-42)$$

$$[L] = \begin{bmatrix} [L_s] & \vdots & [M_{sr}] \\ \dots & \vdots & \dots \\ [M_{sr}]^T & \vdots & [L_r] \end{bmatrix}, \text{ la matrice globale des inductances.}$$

Avec :

$[L_r]$: matrice des inductances rotoriques.

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r} & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & M_{rr} - L_b & \vdots & -\frac{L_e}{N_r} \\ M_{rr} - L_b & L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r} & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & M_{rr} - L_b & L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r} & \vdots & -\frac{L_e}{N_r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots \\ -\frac{L_e}{N_r} & \dots & \dots & \dots & \frac{L_e}{N_r} & \vdots & L_e \end{bmatrix} \quad (I-43)$$

$$d\frac{[L]}{dt} = \begin{bmatrix} [0] & \vdots & \frac{d[M_{sr}]}{dt} \\ \dots & \vdots & \dots \\ \frac{d[M_{sr}]^T}{dt} & \vdots & [0] \end{bmatrix} \text{ la dérivée de la matrice globale des inductances.}$$

Il est remarquable que la matrice $[M]$ varie avec le temps, ce qui implique de devoir inverser la matrice d'inductance $[L]$, de dimension N_r+4 , à chaque itération. Afin de stabiliser cette matrice, on applique la transformation de Park aux équations de tensions statoriques en utilisant un repère lié au rotor.

La matrice de Park modifiée est définie par :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos \theta & -\sin \theta \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (I-44)$$

La dérivée de la matrice de Park est :

$$\frac{d[P(\theta)]}{dt} = \sqrt{\frac{2}{3}} \omega \begin{bmatrix} 0 & \sin \theta & \cos \theta \\ 0 & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ 0 & \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (I-45)$$

La matrice globale de Park de dimension $(N_r + 4) \times (N_r + 4)$ est définie par :

$$[T] = \begin{bmatrix} [P(\theta)] & \vdots & [0] \\ \dots & \vdots & \dots \\ [0]^T & \vdots & [1] \end{bmatrix} \quad (I-46) \quad [T]^{-1} = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1} & \vdots & [0] \\ \dots & \vdots & \dots \\ [0]^T & \vdots & [1] \end{bmatrix} \quad (I-46)$$

$[1]$: est la matrice identité de dimension $(N_r + 1) \times (N_r + 1)$.

Sachant que :

$$[V] = [T][V_{tr}], \text{ Avec : } [V_{tr}] = [v_{os} v_{ds} v_{qs} : 0 \ 0 \ \dots \ \dots \ 0 : 0]^T$$

$$[I] = [T][I_{tr}], \text{ Avec : } [I_{tr}] = [i_{os} i_{ds} i_{qs} : i_{r0} i_{r1} \dots i_{rk} \dots i_{r(N_r-1)} : i_e]^T$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} v_{ds} = \sqrt{\frac{3}{2}} v_m \cos(\omega_s - \omega_r)t \\ v_{qs} = \sqrt{\frac{3}{2}} v_m \sin(\omega_s - \omega_r)t \end{cases} \quad (\text{I-47})$$

L'équation (II.29) devient :

$$[T][V_{tr}] = [R][T][I_{tr}] + [L]d \frac{[T][I_{tr}]}{dt} + \frac{d[L]}{dt} [T][I_{tr}] \quad (\text{I-48})$$

$$\Leftrightarrow [V_{tr}] = \left(\underbrace{[T]^{-1}[R][T]}_A + \underbrace{[T]^{-1}[L] \frac{d[T]}{dt}}_B + \underbrace{[T]^{-1} \frac{d[L]}{dt} [T]}_C \right) [I_{tr}] + \underbrace{[T]^{-1}[L][T]}_D \frac{d[I_{tr}]}{dt} \quad (\text{I-49})$$

Les termes A, B, C et D sont données par :

$$A = [T]^{-1}[R][T] = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1}[R_s][P(\theta)] & \vdots & [0] \\ \dots & \vdots & \dots \\ [0] & \vdots & [R_r] \end{bmatrix} \quad (\text{I-50})$$

$$B = [T]^{-1}[L] \frac{d[T]}{dt} = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1}[L_s] \frac{d[P(\theta)]}{dt} & \vdots & [0] \\ \dots & \vdots & \dots \\ [M_{sr}]^T \frac{d[P(\theta)]}{dt} & \vdots & [0] \end{bmatrix} \quad (\text{I-51})$$

$$C = [T]^{-1}[T] \frac{d[L]}{dt} = \begin{bmatrix} [0] & \vdots & [P(\theta)]^{-1} \frac{d[M_{sr}]}{dt} \\ \dots & \vdots & \dots \\ \frac{d[M_{sr}]^T}{dt} [P(\theta)] & \vdots & [0] \end{bmatrix} \quad (\text{I-52})$$

$$D = [T]^{-1}[L][T] = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1}[L_s][P(\theta)] & \vdots & [P(\theta)]^{-1}[M_{sr}] \\ \dots & \vdots & \dots \\ [M_{sr}]^T [P(\theta)] & \vdots & [L_r] \end{bmatrix} \quad (\text{I-53})$$

La mise en équation du modèle de la machine, conduit à un système complet de dimension $Nr+4$:

$$\begin{bmatrix} V_{os} \\ V_{ds} \\ V_{qs} \\ \dots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} = [L_{tr}] \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{os} \\ i_{ds} \\ i_{qs} \\ \dots \\ i_{r0} \\ \vdots \\ i_{rk} \\ \vdots \\ i_{r(Nr-1)} \\ \dots \\ i_e \end{bmatrix} + [R_{tr}] \begin{bmatrix} i_{os} \\ i_{ds} \\ i_{qs} \\ \dots \\ i_{r0} \\ \vdots \\ i_{rk} \\ \vdots \\ i_{r(Nr-1)} \\ \dots \\ i_e \end{bmatrix} \quad (\text{I-54})$$

$[L_{tr}]$ et $[R_{tr}]$ sont les matrices globales des résistances et des inductances obtenues après la transformation de Park.

La matrice $[L_{tr}]$ est donnée par :

$$\begin{bmatrix}
 L_s + 2M_s & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & \vdots & 0 \\
 0 & L_s - M_s & 0 & \vdots & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr} & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr}\cos(\alpha) & \dots & \dots & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr}\cos((N_r - 1)\alpha) & \vdots & 0 \\
 0 & 0 & L_s - M_s & \vdots & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr}\sin(\alpha) & \dots & \dots & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr}\sin((N_r - 1)\alpha) & \vdots & 0 \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 0 & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr} & 0 & \vdots & L_{rp} + 2Lb + 2\frac{L_e}{N_r} & M_{rr} - Lb & M_{rr} & \dots & M_{rr} - Lb & \vdots & -\frac{L_e}{N_r} \\
 0 & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr}\cos(\alpha) & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr}\sin(\alpha) & \vdots & M_{rr} - Lb & L_{rp} + 2Lb + 2\frac{L_e}{N_r} & M_{rr} - Lb & M_{rr} & \dots & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 0 & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr}\cos((N_r - 1)\alpha) & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr}\sin((N_r - 1)\alpha) & \vdots & M_{rr} - Lb & M_{rr} & \dots & M_{rr} - Lb & Lb + 2Lb + 2\frac{L_e}{N_r} & \vdots & -\frac{L_e}{N_r} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 0 & 0 & 0 & \vdots & -\frac{L_e}{N_r} & \dots & \dots & \dots & -\frac{L_e}{N_r} & \vdots & L_e
 \end{bmatrix} \quad (I-55)$$

La matrice $[R_{tr}]$ est donnée par :

$$\begin{bmatrix}
 rs & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & \vdots & 0 \\
 0 & rs & w_r(M_s - L_r) & \vdots & 0 & -w_r L_{sr} \sqrt{\frac{3}{2}} \sin(\alpha) & \dots & \dots & -w_r L_{sr} \sqrt{\frac{3}{2}} \sin((N_r - 1)\alpha) & \vdots & 0 \\
 0 & w_r(L_s - M_s) & rs & \vdots & w_r L_{sr} \sqrt{\frac{3}{2}} & -w_r L_{sr} \sqrt{\frac{3}{2}} \cos(\alpha) & \dots & \dots & w_r L_{sr} \sqrt{\frac{3}{2}} \cos((N_r - 1)\alpha) & \vdots & 0 \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 0 & 0 & 0 & \vdots & R_{b0} + R_{b(N_r-1)} + 2\frac{R_e}{N_r} & -R_{b0} & 0 & \dots & -R_{b(N_r-1)} & \vdots & -\frac{R_e}{N_r} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 & -R_{b(k-1)} & R_{bk} + R_{b(k-1)} + 2\frac{R_e}{N_r} & -R_{bk} & 0 & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 0 & 0 & 0 & \vdots & -R_{b(N_r-1)} & 0 & \dots & -R_{b(N_r-2)} & R_{b(N_r-1)} + R_{b(N_r-2)} + 2\frac{R_e}{N_r} & \vdots & -\frac{R_e}{N_r} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 0 & 0 & 0 & \vdots & -\frac{R_e}{N_r} & \dots & \dots & \dots & -\frac{R_e}{N_r} & \vdots & R_e
 \end{bmatrix} \quad (I-56)$$

A ces équations, on ajoute les équations électromécaniques afin d'avoir la vitesse électrique de rotation et la position θ_r du rotor.

$$\frac{d}{dt} w_m = \frac{1}{J} (C_e - C_r - K_0 w_m) \quad (I-57)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_r = w_r \quad (I-58)$$

1.7.4. Expression du couple électromagnétique

Il faut d'abord, trouver les expressions des composantes biphasées Ψ_{ds} et Ψ_{qs} du flux statorique.

On a :

$$\begin{bmatrix} [\Psi_{odqs}] \\ [\Phi_{kr}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1} & [0] \\ [0] & [1] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{sr}]^T & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1} & [0] \\ [0] & [1] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i_{odqs}] \\ [i_{kr}] \end{bmatrix} \quad (I-59)$$

$$\Leftrightarrow \begin{bmatrix} [\Psi_{odqs}] \\ [\Psi_{kr}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1} [L_s] [P(\theta)] & [P(\theta)]^{-1} [M_{sr}] \\ [M_{sr}]^T [P(\theta)] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i_{odqs}] \\ [i_{kr}] \end{bmatrix} \quad (I-60)$$

On aura :

$$[\Psi_{odqs}] = [P(\theta)]^{-1} [L_s] [P(\theta)] [i_{odqs}] + [P(\theta)]^{-1} [M_{sr}] [i_{kr}] \quad (I-61)$$

Après le calcul on obtient :

$$\begin{cases} \Psi_{os} = (L_s + 2M_s) i_{os} \\ \Psi_{ds} = (L_s - M_s) i_{ds} + \sqrt{\frac{3}{2}} L_{sr} \sum_{k=0}^{N_r-1} i_{rk} \cos(ka) \\ \Psi_{qs} = (L_s - M_s) i_{qs} + \sqrt{\frac{3}{2}} L_{sr} \sum_{k=0}^{N_r-1} i_{rk} \sin(ka) \end{cases} \quad (I-62)$$

Or, pour un moteur alimenté par une source triphasée, la puissance instantanée s'écrit :

$$\begin{aligned}
 P_s(t) &= [V_{abc}]^T [i_{abc}] \\
 &= ([P(\theta)][V_{odqs}])^T [P(\theta)][i_{odqs}] \\
 &= [V_{odqs}]^T [i_{odqs}]
 \end{aligned} \tag{I-63}$$

Les équations de tensions dans un repère lié au rotor sont données par :

$$\begin{cases}
 V_{ds} = r_s i_{ds} + \frac{d\Psi_{ds}}{dt} - \omega_r \Psi_{qs} \\
 V_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{d\Psi_{qs}}{dt} - \omega_r \Psi_{ds}
 \end{cases} \tag{I-64}$$

En remplaçant les tensions V_{ds} et V_{qs} dans l'expression (II.63), on obtient :

$$P_{sa}(t) = r_s(i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + \left(i_{ds} \frac{d\Psi_{ds}}{dt} + i_{qs} \frac{d\Psi_{qs}}{dt} \right) + \omega_r (\Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds}) \tag{I-65}$$

Le troisième terme, représente la puissance électromagnétique transmise au rotor à travers l'entrefer par l'intermédiaire du champ tournant. Donc le couple électromagnétique est :

$$T_e = P(\Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds}) \tag{I-66}$$

En remplaçant Ψ_{ds} et Ψ_{qs} par leurs expressions, on obtient :

$$T_e = \sqrt{\frac{3}{2}} P L_{sr} \left\{ i_{qs} \sum_{k=0}^{N_r-1} i_{rk} \cos(ka) - i_{ds} \sum_{k=0}^{N_r-1} i_{rk} \sin(ka) \right\} \tag{I-67}$$

I.8. Pris en compte du défaut dans le modelé

Modéliser précisément la séquence des phénomènes physiques impliqués dans la rupture d'une barre est assez complexe. Cependant, on peut simuler la rupture d'une barre en supprimant le courant qui la traverse. [36]. Les matrices des inductances et des résistances sont modifiées de tel façon que : si la barre k est rompue, le courant i_{bk} dans cette barre s'annule. Dans ce cas, le courant dans la maille $(k-1)$ devient égal au courant dans la maille (k) , c'est-à-dire, $(i_{r(k-1)}=i_{rk})$ (Figure I.6). Ceci est traduit dans les matrices des inductances et des résistances, par l'addition des deux colonnes et des deux lignes liées aux $i_{r(k-1)}$ et i_{rk} . Le courant i_{rn} est donc supprimé du vecteur des courants, en d'autre terme l'ordre du système est réduit.

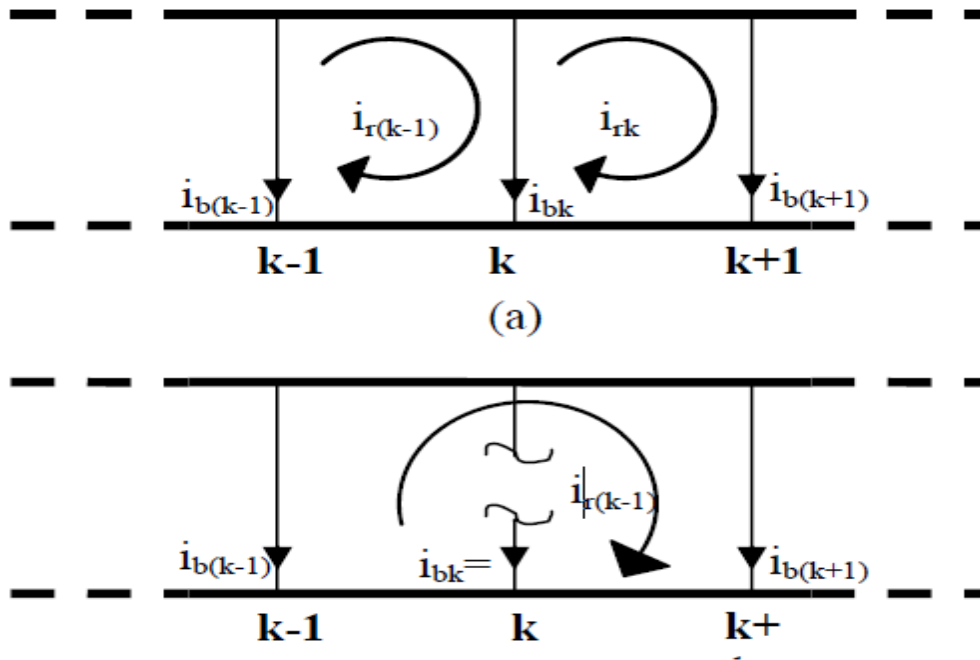


Figure I.6 : schéma équivalent de la cage rotorique pour :
a. Etat sain, **b.** Avec une barre rompue [39].

E. Ritchie [32] compared simulation results obtained by modeling a broken bar using the method described above with experimental results and found that this method has limitations. This is due to the simplifying assumptions made in the mathematical model, which neglect leakage currents between the bars. In reality, as Kerszenbaum [37] has noted, there is always a current passing tangentially through the rotor laminations to the adjacent bars even when a bar is broken. This phenomenon can be modeled by adding a high-value resistance in parallel with the broken rotor bar.

Selon les travaux d'A. Abed [38], la valeur de la résistance à ajouter pour simuler la rupture d'une barre dépend des paramètres de la machine, en particulier de la durée du pas de simulation. Dans notre cas, avec un pas de simulation de 10^{-3} sec, une augmentation de 30 fois de la résistance initiale de la barre a permis d'obtenir des résultats satisfaisants et cohérents avec ceux prédits par la théorie. Il convient de noter que l'augmentation de la résistance de plus de 30 fois entraîne des instabilités numériques, ce qui nécessite de réduire le pas de calcul pour éviter ce problème.

I.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons essayé de présenter un ensemble de termes et de concepts qui sont très importants dans le domaine des machines électriques de diagnostic pour trouver les défaillances les plus importantes affectant la "Machine Asynchrone" et aussi les technique utilise pour diagnostic à partir de techniques de mesure différentes caractéristiques de la couple électromagnétique ,vitesse et courant électrique. Et puis nous avons mentionné les problèmes les plus importants possibles pour enfin se concentrer sur les erreurs les plus importantes qui peuvent arriver au moteur et puis nous avons développé un simuler un model capable de simuler le Machine Asynchrone dans son état normal et quand il y a une fracture dans les barres pour connaître les caractéristiques les plus importantes.

CHAPITRE II :
THEORIE DES
ONDELETES ET LEURS
APPLICATIONS

II.1. Introduction

L'analyse en ondelettes est une méthode mathématique importante qui a suscité l'intérêt de nombreux scientifiques et experts pour son utilisation dans divers domaines tels que l'informatique, le traitement des images et des données, ainsi que dans le domaine des moteurs électriques pour le diagnostic de pannes [40]-[41]. Bien que cette technique soit apparue dans les années 1980, elle n'est pas basée sur une idée originale nouvelle.

Cette théorie a favorisé une approche interdisciplinaire qui a rassemblé des ingénieurs, des mathématiciens et des physiciens, tous ayant développé des idées similaires dans leur domaine respectif. Parmi les scientifiques les plus importants qui ont participé à la recherche et au développement, le Dr Gabor a proposé un prototype d'analyse en ondelettes pour le diagnostic des défauts de synchronisation des moteurs électriques. Cette méthode reposait sur une analyse de Fourier locale, où le signal était découpé en différentes parties de longueur fixe ou de fenêtre. Bien que chaque partie du signal puisse être étudiée individuellement, cette méthode présentait un inconvénient majeur, à savoir que la longueur du signal était fixe [42]. Le développement majeur de cette théorie est survenu avec l'introduction de la multi résolution par Mallat [43]. Pour obtenir la fonction d'échelle, un filtre passe-bas est utilisé, tandis que pour obtenir les détails, c'est-à-dire la partie du signal qui change d'allure, un filtre passe-haut est utilisé. Cette méthode permet, comme l'a noté Mallat, "une interprétation de l'image qui ne varie pas avec l'échelle".

Le but de ce chapitre est de présenter la théorie de L'ondelette en regardant la transformée de Fourier et des exemples de son application ainsi que ses types, puis nous mentionnerons la transformée d'ondelette de sa définition à ses types les plus importants, puis ses avantages les plus importants, pour enfin passer à l'ondelette Paquette pour commencer à la définir, puis nous expliquerons comment la convertir, et enfin comment l'appliquer dans le diagnostic de cassure de barre.

Où l'ingénieur simule le moteur dans tous ses états (à l'état normal et lorsqu'il y a une cassure dans ses barre rotoriques) pour en extraire toutes les propriétés électriques et mécaniques pour les analyser par l'ondelette Paquette afin d'étudier le moteur est bon, et connaître les changements les plus importants en présence d'une cassure.

II.2 De l'analyse de Fourier a l'analyse par ondelettes :

II.2.1 Transformation de Fourier

II.2.1.1 Définition

La transformation de Fourier permet de décrire dans l'espace des fréquences un signal dont on connaît l'histoire au cours du temps, et réciproquement.

$$F(\omega) = \int f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (\text{II-1})$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int F(\omega)e^{j\omega t} d\omega \quad (\text{II-2})$$

II.2.1.2 Dualité Temps-Fréquences

$$y = f(t) \Leftrightarrow Y = F(f)$$

$F(f)$ Est appelée la transformée de Fourier de $f(t)$ et sa représentation, le spectre en fréquences

On appelle densité spectrale d'énergie $\frac{|F(\omega)|^2}{2\pi}$ [44].

Avant de pouvoir concevoir et développer des techniques de jeu efficaces, il est essentiel de disposer d'outils permettant de définir les différents éléments distinctifs d'une situation de jeu. L'un des outils les plus importants et traditionnels est la transformée de Fourier, que nous aborderons dans ce chapitre. L'étude de la transformée de Fourier, de ses avantages et de ses limites, est le point de départ de notre exploration des ondelettes.

Si nous avons une connaissance de l'emplacement, du début et de la fin du signal $f(t)$ avec le temps, ainsi que des différences qualitatives les plus significatives, il peut néanmoins être difficile d'identifier les fréquences associées. Ainsi, la transformée de Fourier est souvent utilisée pour décomposer le signal en une fréquence fondamentale ainsi que des harmoniques spectrales. Chaque fréquence correspond à La fonction sinusoidale [45]-[46]. Par conséquent, l'analyse de Fourier est une analyse de fréquence du signal horaire $f(t)$.

Si la fonction f est périodique de période T , sa transformée de Fourier est [46] :

$$C_n(f) = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) e^{-2i\pi\frac{n}{T}t} dt \quad (\text{II-3})$$

Où, si f appartient à $L^1(\mathbb{R})$:

$$\hat{f}(v) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-2i\pi vt} dt \quad (\text{II-4})$$

$\hat{f}(v)$ Donne le contenu fréquentiel de f pour la fréquence $\frac{n}{T}$ ou v

II.2.2 Exemple d'application de la transformée de Fourier FT :

II.2.2.1 Signal stationnaire :

Dans la figure II.1 de notre exemple, nous avons effectué la transformée de Fourier d'un signal stationnaire qui est la somme de deux sinusoïdes ayant des périodes et des amplitudes différentes (figure II.1 (a)), ainsi que du même signal avec des amplitudes égales (figure II.1 (b)).

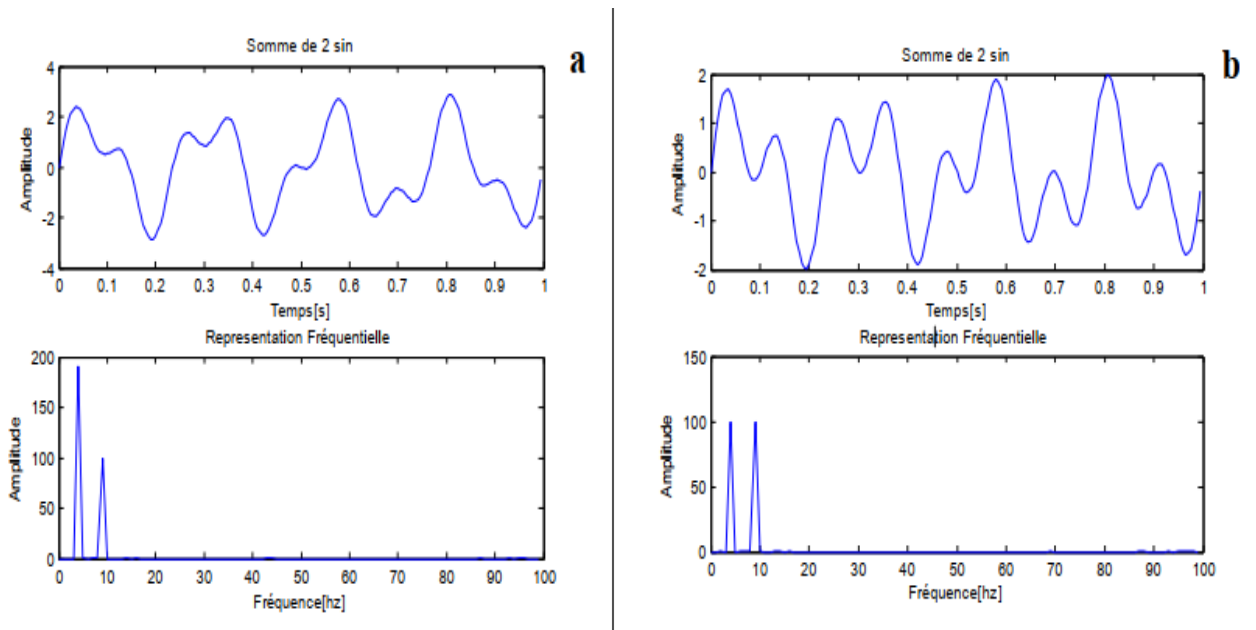


Figure II.1 : Représentation temporelle et fréquentielle „somme de deux sinusoïdes [53]

$$F_1 = x_1 + x_2$$

II.2.2.2 Signal non stationnaire :

Dans le deuxième exemple on passe à un signal non stationnaire (succession de deux sinusoïdes) de différentes successions $F_1 = x_1 + x_2$ (figure.II.2 (a)) et l'inverse $F_1 = x_1 + x_2$ ((figure.II.2 (b)).

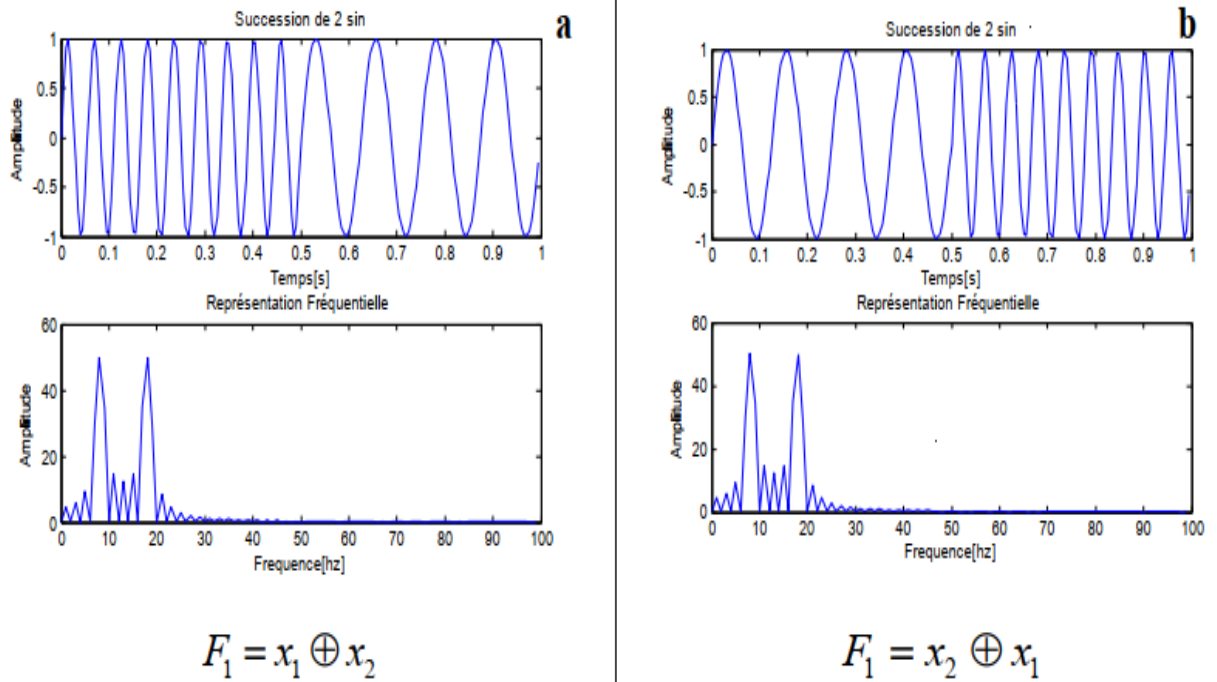


Figure II.2: Représentation temporelle et fréquentielle „succession de deux sinusoïdes puis succession de l’inverse [53]

Dans les deux exemples précédents, nous avons observé que l'utilisation de deux signaux différents dans le temps donne la même représentation fréquentielle grâce à la transformée de Fourier. Cependant, cette méthode ne nous donne pas d'information sur la fréquence du signal en fonction du temps, ce qui rend difficile l'obtention d'informations locales. Évidemment, cette méthode ne peut pas être utilisée pour les signaux non stationnaires. Pour résoudre ce problème, l'idée suivante est de représenter notre signal en fonction à la fois du temps et de la fréquence.

Ainsi, nous avons des caractérisations directes et des descriptions de fréquence. Puis nous continuons Fenêtre glissante de courte durée STFT Transformée de Fourier.

II.2.3 Transformée de Fourier a fenêtre glissante STFT

Pour étudier les signaux $f(t)$ à un moment précis t_0 et réaliser une analyse de spectre local, il est nécessaire de calculer la transformée de Fourier autour de ce point. Cependant, l'intégration de Fourier requiert un temps d'intégration infini, ce qui n'est pas réalisable. Pour résoudre ce problème, une méthode consiste à utiliser une fenêtre de temps (intervalle fenêtre) qui représente une constante locale autour de t_0 , permettant ainsi de ne considérer qu'une portion du signal pour le calcul de la transformée de Fourier. Le physicien Dennis Gabor a été le premier à appliquer ce principe à la transformée de Fourier dans les années

1940, en utilisant des ondes sinusoïdales qui dépendent à la fois du temps et de la fréquence. Cette méthode est appelée transformée de Fourier glissante et utilise des fenêtres pour limiter l'analyse à une région locale [46].

L'idée fondamentale est de diviser le signal en segments de temps finis et de réaliser une analyse de Fourier sur chaque segment. Cette analyse dépend donc de l'emplacement temporel du segment. La Figure II.3 illustre cette notion. [45]-[46].

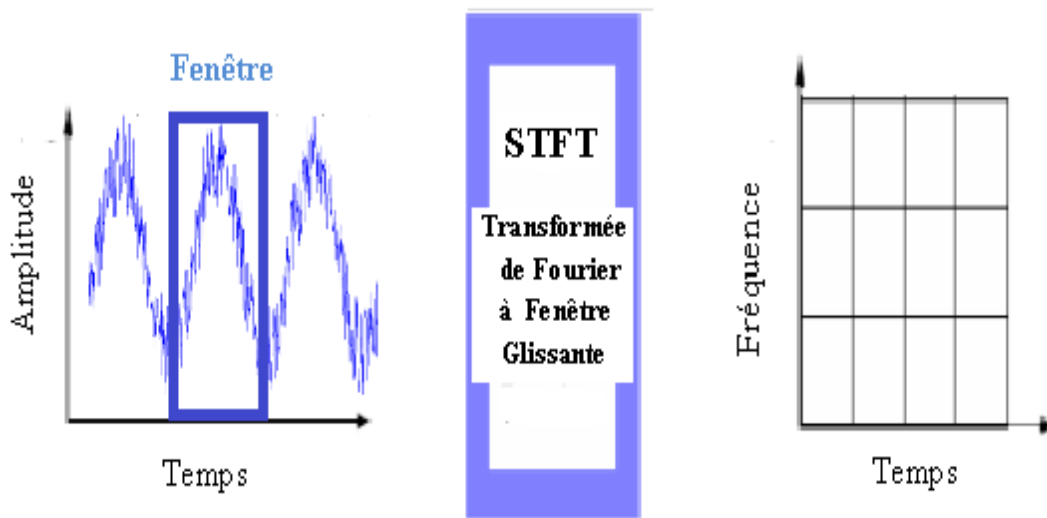


Figure II.3 : Représentation temporelle vers STFT [45].

II.2.3.1. Exemple d'application de la transformée de Fourier a fenêtr glissante STFT

On peut donner l'algorithme de transformée de Fourier à fenêtr comme suit [47]-[48]

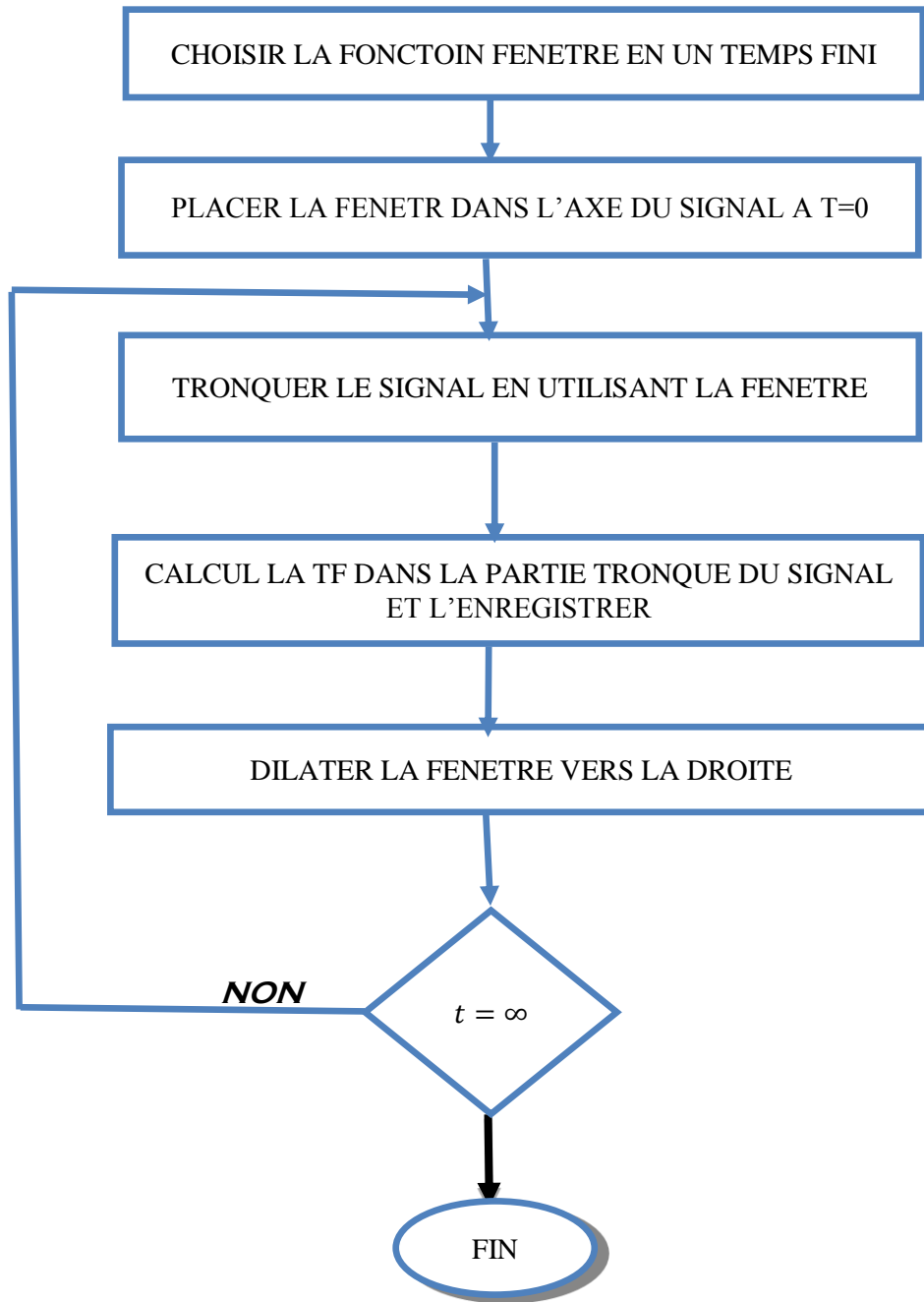


Figure II.4 : Algorithme de STFT

La multiplication du signal $f(t)$ par une fenêtre glissante $h(t - t_0)$ et le calcul de la transformée de Fourier de ce produit est donné par la relation mathématique suivante :

$$G_f(\nu, t_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) h(t - t_0) e^{-2i\pi\nu t} dt \quad (\text{II-5})$$

Où, t_0 est largeur de fenêtre, ν est la fréquence et $G_f(\nu, t_0)$ n'est que la STFT

Désormais, chaque transformée de Fourier fournit des informations spectrales sur une tranche de temps spécifique du signal, offrant ainsi des informations temporelles et fréquentielles simultanément. L'exemple suivant illustré dans la Figure II.5 représente la

transformée de Fourier d'un signal non stationnaire composé de deux fréquences distinctes, 50 Hz et 25 Hz.

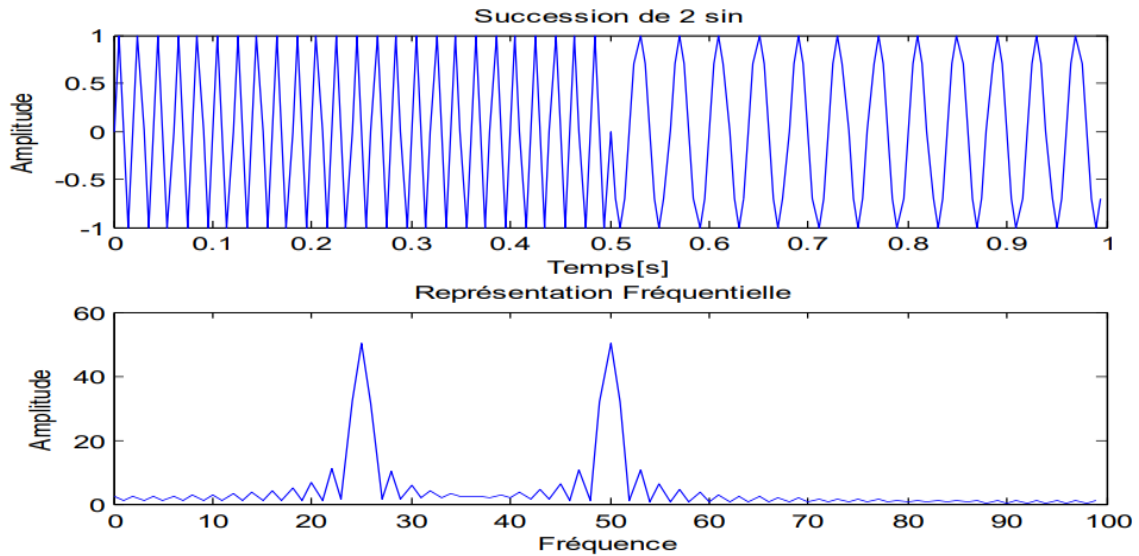


Figure II.5 : Représentation temporelle de la succession de deux sinusoïdes et leur FT [53]

II.2.3.2 Limitations de la Tf à fenêtre glissante

II.2.3.2.1 Principe d'incertitude

La localisation précise du signal dans le temps et la fréquence est impossible, et ce même en zoomant à l'infini. En effet, plus l'analyse est précise en fréquence, moins elle l'est en temps, et vice versa. Cette relation est appelée le principe d'incertitude, qui tire son origine de la mécanique quantique, mais qui joue un rôle important dans le traitement du signal. Elle indique qu'il est impossible de localiser le signal avec une précision arbitrairement élevée dans le temps et la fréquence. Mathématiquement, cela se traduit par la moyenne des fluctuations de temps et de fréquence qui est liée à une borne inférieure de $\frac{1}{4\pi}$

$$\Delta t \cdot \Delta f \geq 1/4\pi \tag{II-6}$$

Avec

Δt : la résolution temporelle

Δf : la résolution fréquentielle

On peut illustrer cette formule par une fonction particulière appelée gaussienne et qui a la particularité que sa transformée de Fourier est encore une gaussienne [49] :

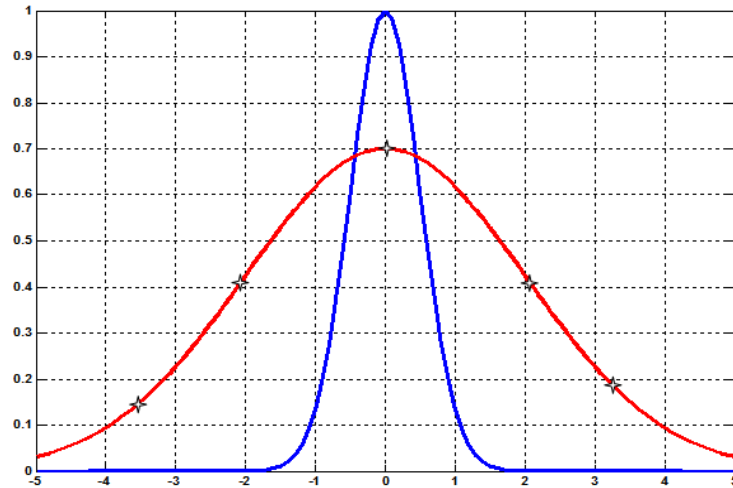


Figure II.6 : Exemple explicatif du d'Heisenberg [49]

D'après la figure II.6, le signal avec symbole étoile * est la gaussienne d'origine, l'autre sa transformée de Fourier. La différence entre les deux largeurs montre bien le principe: «Au plus on localise en temps, au moins on localise en fréquence ». On peut montrer que la gaussienne a la particularité que: $\Delta t * \Delta f \geq 1/4\pi$

Ainsi, il n'est pas possible d'avoir des résolutions temporelles et fréquentielle à la fois arbitrairement élevées. On ne peut pas déterminer avec précision à quel moment le spectre fréquentiel est localisé, mais seulement dans quel intervalle de temps les différentes fréquences sont présentes. [54].

L'analyse en ondelettes a pour objectif de rendre compte de ces deux phénomènes simultanément, en introduisant une fenêtre dont la taille varie avec la fréquence.

II.3 Transformée en ondelettes

II.3.1 Définition

La forme d'onde de l'ondelette est caractérisée par une durée limitée et une valeur moyenne égale à zéro.

Grâce à la transformation en ondelette, il est possible d'effectuer une analyse multi-résolution sur le signal étudié. Cette analyse permet une décomposition atomique temps-échelle, où chaque atome représente une projection locale du signal et est obtenu par une translation en temps et une dilatation d'une ondelette unique. Cette ondelette est initialement bien localisée dans le plan temps-échelle. [50].

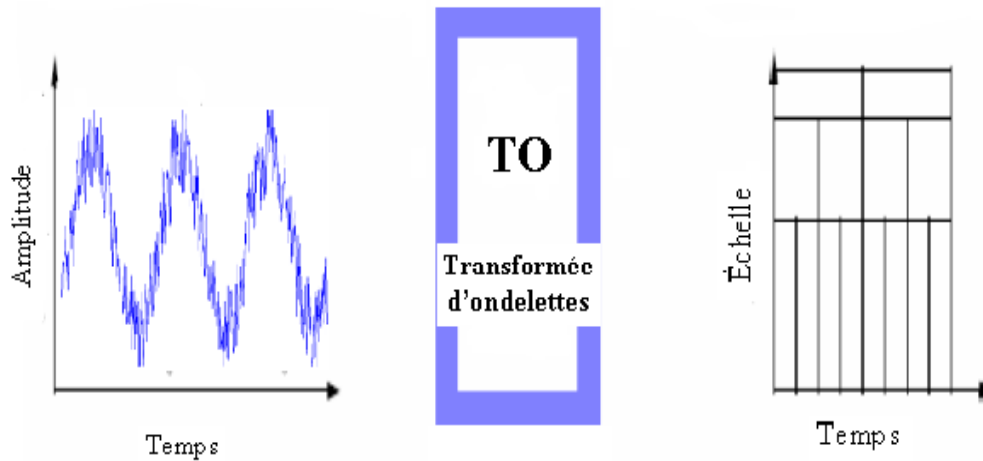


Figure II.7 : Représentation temporelle vers ondelettes [45]

On peut représenter un signal f à l'aide de sa transformée en ondelettes, qui se compose de coefficients d'ondelettes $C(s, u)$ dépendant de deux paramètres : l'échelle s et le facteur de localisation u . Ces paramètres peuvent être utilisés de manière continue (TOC) ou discrète (TOD) selon les besoins de l'analyse du signal f . La transformée en ondelettes continue (TOC) requiert une valeur continue de (s, u) et est utilisée principalement pour l'analyse de la forme du signal (approximation), tandis que la transformée en ondelettes discrète (TOD) utilise deux filtres (passe-haut et passe-bas) pour extraire des informations sur les transitions rapides du signal (détails).

La transformée en ondelettes de la fonction f à l'échelle s et la translation u est calculée en corrélant f avec l'ondelette mère ψ :

$$W_f^\psi(u, s) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi^*\left(\frac{t-u}{s}\right) dt \quad (\text{II-7})$$

Où $*$ désigne le complexe conjugué

Pour retrouver le signal f d'origine on utilise la transformée en ondelette continue donnée par :

$$f(t) = \frac{1}{c} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{|s|^2} W_f^\psi(u, s) \psi_{s,u}(t) ds \cdot du \quad (\text{II-8})$$

$$\text{Ou } C = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < +\infty$$

Sachant que C 'est la condition d'admissibilité pour qu'une ondelette soit réversible, c'est à-dire pour que l'on puisse reconstruire le signal sans perdre d'information.

Et $\hat{\psi}$ est la transformée de Fourier de ψ .

La transformée en ondelettes permet une représentation complète, stable et redondante du signal. Elle est caractérisée par l'existence d'un noyau reproduisant, ce qui lui confère une propriété d'inversibilité à gauche. Contrairement à la transformée de Fourier à fenêtre, la transformée en ondelettes peut mesurer les variations de temps-fréquence des composants spectraux avec une résolution différente. En effet, elle effectue une corrélation entre le signal f et la fonction d'ondelette f avec $\psi_{u,s}(t)$. En utilisant la formule de Fourier-Parseval sur l'équation (II.6), on peut l'écrire sous la forme d'une intégration de fréquence :

$$W_f^\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi_{u,s}^*(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f(\hat{\omega}) \hat{\psi}_{u,s}(\omega) d\omega \quad (\text{II-9})$$

Le coefficient d'ondelettes $W_f^\psi(u, s)$ dépend ainsi des valeurs $f(t)$ et $\hat{f}(t)$ dans le domaine temps-fréquence où l'énergie de $\psi_{u,s}(t)$ et $\hat{\psi}_{u,s}(\omega)$ de, est concentrée. Des harmoniques variables dans le temps sont détectés à partir de la position et l'échelle des coefficients d'amplitude élevés des ondelettes. En temps $\psi_{u,s}(t)$, est centrée à u avec une distribution proportionnelle au s que sa transformée de Fourier est calculée à partir de la relation suivante

$$\hat{\psi}_{u,s}(\omega) = e^{-j u \omega} \sqrt{s} \hat{\psi}(s\omega) \quad (\text{II-10})$$

Où $\hat{\psi}$ est la transformée de Fourier de ψ

II.3.2 Transformée en ondelettes continue (TOC)

II.3.2.1 Définition

La transformée en ondelettes continue (TOC) utilisant l'ondelette $\hat{\psi}$ est définie comme [51]

$$\forall (s, u) \in \mathbb{R}_+^* \times \mathbb{R}, W f(u, s) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{\mathbb{R}} \hat{f}(t) \psi\left(\frac{t-u}{s}\right) dt \quad (\text{II-11})$$

Avec $W f(u, s)$ sont des coefficients d ondelettes.

Remarque La transformée en TOC ; utilisant l'ondelette ψ est équivalent à :

$$\forall (s, u) \in \mathbb{R}_+^* \times \mathbb{R}, W f(u, s) = \sqrt{s} \int_{\mathbb{R}} \hat{f}(\lambda) \bar{\psi}(s\lambda) e^{2i\pi u \lambda} d\lambda \quad (\text{II-12})$$

Preuve. Il suffit d'appliquer la formule de Parseval :

$$w f(u, s) = (f, \psi_{u,s}), (\hat{f}, \hat{\psi}_{u,s}) \quad (\text{II} - 13).$$

Remarque Si on pose :

$$\tilde{\psi}_s(x) = \frac{1}{\sqrt{s}} \bar{\psi}\left(\frac{-x}{s}\right) \quad (\text{II-14})$$

On obtient d'après

$$\forall (s, u) \in \mathbb{R}_+^* \times \mathbb{R}, Wf(u, s) = \int_{\mathbb{R}} f(t) \bar{\psi}_s(t - u) dt \quad (\text{II-15})$$

Donc :

$$\forall (s, u) \in \mathbb{R}_+^* \times \mathbb{R}, Wf(u, s) = f(t) * \bar{\psi}_s(u) \quad (\text{II-16})$$

Parmi une grande famille des ondelettes, on trouve : Ondelette gaussienne et gaussienne complexe, Morlet et Morlet complexe, chapeau mexicain, Haar, Daubechies, Meyer et Meyer avec une fonction auxiliaire et Ondelette complexe de Shannon...etc. La figure II.8 suivantes donne Quelques formes des ondelettes usuelles.

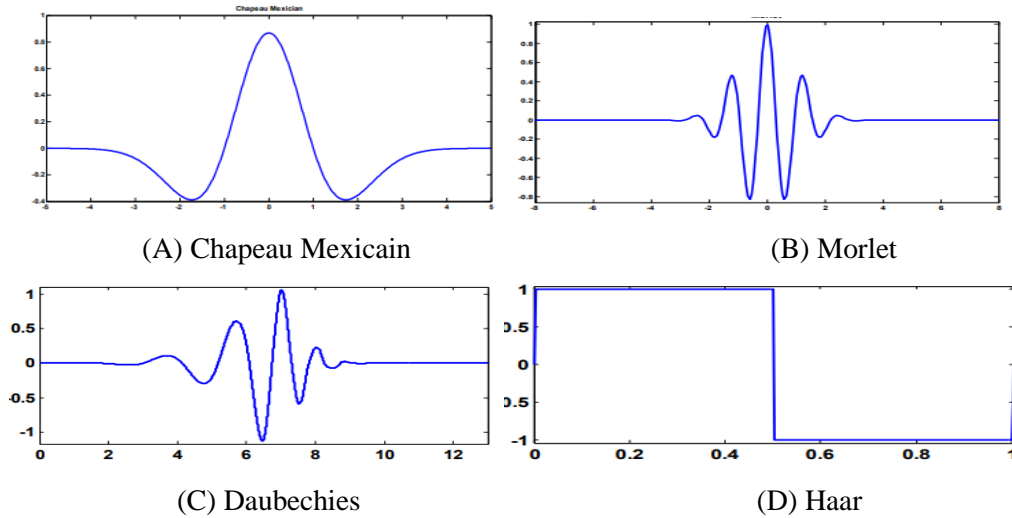


Figure II.8 : Quelques formes des ondelettes usuelles [50].

II.3.3 Ondelettes réelles et complexes

Les ondelettes réelles sont particulièrement adaptées pour détecter les changements brusques dans un signal, tandis que les ondelettes complexes (ou analytiques) sont couramment utilisées pour séparer la phase et l'amplitude des composantes d'un signal. [52].

II.3.3.1 Inversion de la transformée en ondelettes continue

Le théorème suivant montre que la TOC est une transformation inversible qui conserve l'énergie du signal si l'ondelette vérifie la condition d'admissibilité suivante :

$$C_{\bar{\psi}} = \int_0^{+\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|}{\omega} d\omega < +\infty \quad (\text{II-17})$$

Si ψ vérifie la condition ci-dessus, alors l'ondelette est dite admissible. On peut remarquer que la condition d'admissible. Impose nécessairement que $\hat{\psi}(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt$ c'est à dire que l'ondelette soit de moyenne nulle [52].

II.3.3.2 Théorème

Soit $\psi \in L^2(\mathbb{R})$ une ondelette admissible alors pour tout $f \in L^2(\mathbb{R})$ on a :

$$f(t) = \frac{1}{c_\psi} \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} W_f(u, s) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-u}{s}\right) \frac{du ds}{s^2} \quad (\text{II-18})$$

De plus, la TOC conserve l'énergie du signal

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |f(t)|^2 dt = \frac{1}{c_\psi} \int_0^{+\infty} \int_0^{+\infty} |W_f(u, s)|^2 \frac{du ds}{s^2} \quad (\text{II-19})$$

II.3.4 Transformée en ondelettes dyadique

La transformée en ondelettes dyadique est une représentation invariante par translation car le paramètre de translation u n'est pas discrétisé. Pour construire cette représentation, l'échelle est discrétisée, mais pas le paramètre de translation u , qui est continu. L'échelle est échantillonnée sur une suite dyadique $\{2^j\}_{j \in \mathbb{Z}}$ [52].

II.3.4.1 Définition

La transformée en ondelettes dyadique de $f \in L^2(\mathbb{R})$ est définie par

$$W_f(u, 2^j) = \int_{\mathbb{R}} f(t) \frac{1}{\sqrt{2^j}} \psi\left(\frac{t-u}{2^j}\right) dt = f * \tilde{\psi}_{2^j}(u) \quad (\text{II-20})$$

Avec

$$\tilde{\psi}_{2^j}(u) = \psi_{2^j}(-t) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \psi_{2^j}\left(-\frac{t}{2^j}\right) \quad (\text{II-21})$$

II.3.5 Transforme en ondelette discrète (TOD)

On restreint les paramètres de dilatation-translation (a ; b) à un sous-ensemble discret, ce qui est étudié par I. Daubechies, A. Grossman et Y. Meyer, on choisit [52].

$$a_m = a^{-m}, b_n = n\beta a^{-m}, (a > 1, \beta \neq 0) \text{ avec } \psi_{ambn} = a^{m/2} \psi(a^m x - n\beta) \quad (\text{II-22})$$

Pour des fins de stabilité numérique, I. Daubecheis a étudié dans quelles conditions l'application

$$W: f \rightarrow W_f = W_f(a_m, b_n) = \int_{\mathbb{R}} f(x) \psi_{ambm}(x) dx \quad (\text{II-23})$$

De $L^2(\mathbb{R})$ dans $l^2(\mathbb{Z}^2)$ est injective, mais aussi d'inverse continue sur son domaine.

Cette condition se traduit par l'existence de deux constantes positives A et B telles que

$$A \|f\|^2 \leq \sum_{m,n \in \mathbb{Z}} |\psi_{am,bn}, f|^2 \leq B \|f\|^2 \quad (\text{II-24})$$

Et on a la formule de reconstruction définie par

$$f = \frac{2}{A+B} \sum_{m,n \in \mathbb{Z}} W_f(a_m, b_n) \psi_{am,bn} + R_f \quad (\text{II-25})$$

Où le reste R_f est estimé par $\|R_f\| \leq 0 \left(\frac{B}{A} - 1\right) \|f\|$. Si $\frac{B}{A} \sim 1$ le terme d'erreur

R_f peut être négligé et la reconstruction est numériquement satisfaisante.

Pour d'autres types d'applications on préfère utiliser des bases orthonormées d'ondelettes dans le but de réduire autant que possible la redondance de la famille $(\psi_{am,bn})_{(m,n) \in \mathbb{Z}^2}$.

Compte tenu de la redondance d'informations données par les coefficients $W_f(a, b)$ sur la base des $\psi_{a,b}$.

Soit $\psi \in L^2(\mathbb{R})$, régulière telle que $(\psi_{j,k})_{j, k \in \mathbb{Z}}$ soit une base orthonormée de $L^2(\mathbb{R})$ on peut décomposer tout signal $f \in L^2(\mathbb{R})$ en série double

$$f(x) = \sum_{j \in \mathbb{Z}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} (f, \psi_{j,k}) \psi_{j,k}(x) \quad (\text{II-26})$$

Avec

$$\psi_{j,k}(x) = 2^{j/2} \psi(2^j x - k) \quad (\text{II-27})$$

Ces coefficients sont définis par

$$W_{j,k} = (f, \psi_{j,k}) = 2^{j/2} \int_{\mathbb{R}} f(x) \psi(2^j x - k) dx \quad (\text{II-28})$$

et qui sont indépendantes les uns des autres.

Les paramètres de dilatation-translation $(a, b) = (2^j, 2^{-j}k)$ correspondent à la discrétisation de

$\mathbb{R} \times \mathbb{R}_+$.

Le réseau des paramètres de dilatation-translation considéré dans ce cas est la collection de tous les intervalles dyadiques.

$$I(j, k) = [k2^j, (k + 1) 2^{-j}], (j, k \in \mathbb{Z}) \cdot \quad (\text{II-29})$$

La transformation en ondelettes peut aussi être considérée comme un processus de décomposition du signal en approximations et en détails. Le signal d'origine $S(n)$, traverse deux filtres complémentaires, passe-haut et passe-bas, et émerge en tant que deux signaux. Respectivement le signal d'approximations A et le signal de détails comme la montre la Figure II.9

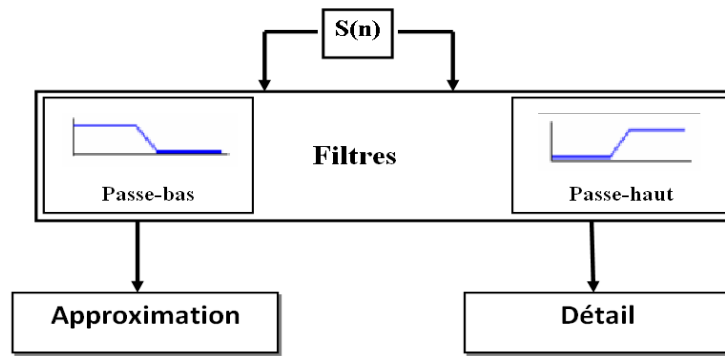


Figure II.9 : Décomposition du signal $S(n)$ en approximations et détails [45]

Pour plusieurs signaux, la partie dans les basses fréquences est la partie la plus importante. Elle donne au signal son identité.

La partie haute fréquence, attribuer saveur (fumet) ou nuance.

Dans l'analyse d'ondelette, on parle seulement des approximations et détails.

- L'approximation : est la partie grand échelle donc basse -fréquence du signal.
- Le détail : est la partie petit-échelle donc haute-fréquence du signal.

II.3.5.1 Décomposition simple

Comme il a été noté précédemment le signal $S(n)$, est divisé en deux signaux mais, actuellement pour faire cette opération dans un signal réelle, on trouve deux signaux de même taille que le signal original.

Supposons, pour l'instant, que le signal original $S(n)$ contient 1000 échantillons. Le résultat des deux signaux à 1000 échantillons pour chaque signal, le total est 2000 échantillons.

Pour donner deux vecteurs respectivement CA (Coefficients approximation) et CD (Coefficients détails). Tous deux sont de taille approximativement égale à la moitié du vecteur d'origine. Ceci est dû au fait de l'opération de décimation par 2 (down sampling). [45].

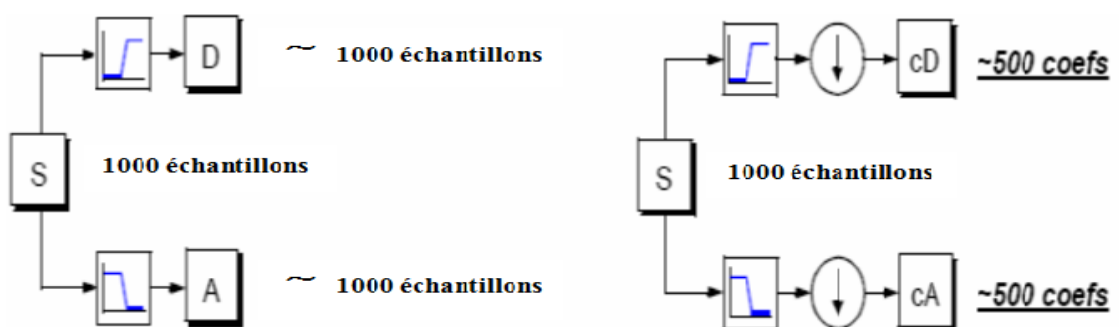


Figure II.10 : Décomposition simple du signal s en approximations et détails

II.3.5.2 Décomposition multi niveaux

L'algorithme de Mallat [49]-[50] permet de décomposer le signal $S(n)$ en plusieurs niveaux à l'aide d'un arbre de décomposition en ondelettes, comme illustré à la figure II.10. Le processus de décomposition peut être répété plusieurs fois, avec les approximations successives étant décomposées alternativement pour obtenir des composants de plus haute résolution. Ce processus itératif peut être poursuivi indéfiniment dans la théorie. En pratique, il n'est pas possible de poursuivre la décomposition à l'infini, car cela entraînerait des détails de plus en plus petits et insignifiants. On doit donc déterminer un niveau de décomposition approprié en fonction de la nature du signal étudié ou en utilisant un critère approprié tel que l'entropie [49], [50].

En utilisant l'analyse multi-résolution, le signal $S(n)$ peut-être décomposé en ses versions approximatives et détaillées. Il s'agit d'un signal de temps discret. Les coefficients de décomposition initiaux comprennent A_1 et D_1 . A_1 représente la version approximative du signal original $S(n)$, tandis que D_1 représente la représentation détaillée de $S(n)$, telle que définie dans la figure II.11.

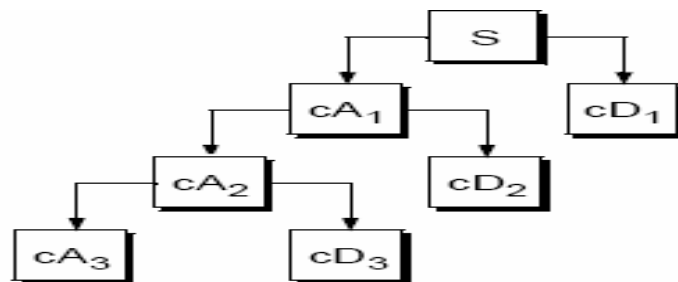


Figure II.11 : Décomposition du signal $S(n)$ en multi-niveaux selon Mallat [45]

II.3.5.3 Reconstruction par ondelette:

Nous avons vu précédemment comment la transformée en ondelettes discrète (TOD) pouvait être utilisée pour analyser et décomposer un signal. La seconde partie de la théorie concerne la reconstruction ou la synthèse du signal original à partir de ses composants sans perte d'information. Cette procédure est illustrée dans la figure II.12 et s'appelle la transformation en ondelettes inverse (TODI). Il s'agit d'une manipulation mathématique qui permet de reconstituer le signal original à partir de ses approximations et détails.

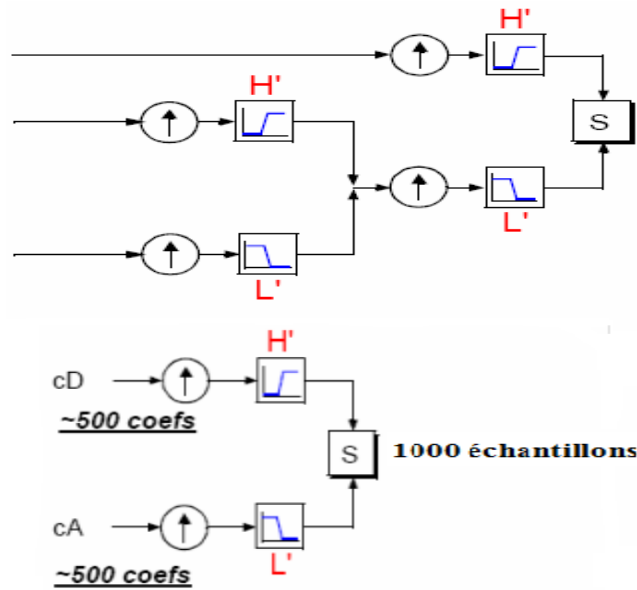


Figure II.12 : Reconstruction simple d'un signal $S(n)$ [45]

II.3.5.4 Décomposition et Reconstruction multi-niveau par ondelettes :

En résumé l'opération de décomposition et la reconstruction multi-niveau par l'algorithme de Mallat [49] est schématisé par la structure suivante :

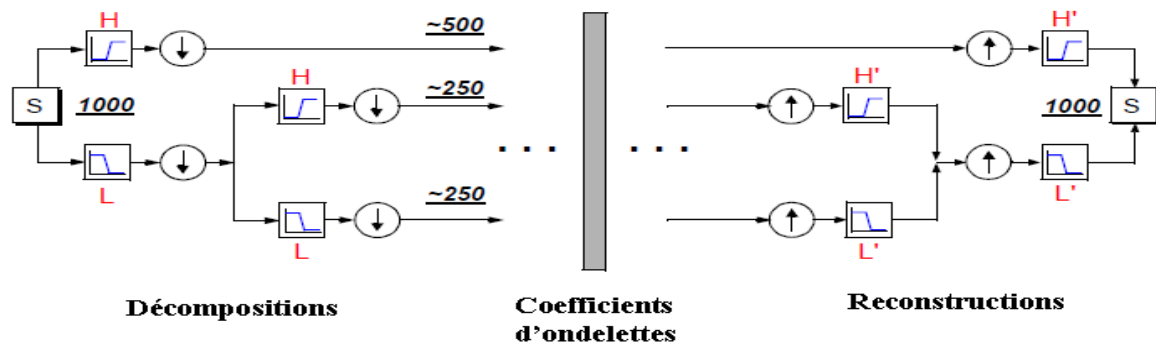


Figure II.13 Algorithme de MALLAT multi niveau [45]

II.4 LES PAQUETS D'ONDELETTES

II.4.1 Définition

L'ondelette de paquets, également connue sous le nom de paquet d'ondelettes, est une méthode de traitement du signal utilisée pour décomposer un signal en composants de fréquences et d'échelles différentes. La technique est basée sur l'utilisation d'ondelettes mères, qui sont des ondelettes de base qui peuvent être étendues et transformées pour couvrir différentes gammes de fréquences. Lorsqu'un signal subit une transformée en ondelettes groupées, il est divisé en bandes de fréquences de largeurs différentes. Les

hautes fréquences sont représentées par des bandes étroites, tandis que les basses fréquences sont représentées par des bandes de fréquences plus larges. Cette décomposition en paquets d'ondelettes permet une meilleure analyse des signaux complexes.

II.4.2 La transformée en paquet d'ondelettes

La décomposition en ondelettes généralise l'analyse du signal, offrant un éventail de possibilités plus diversifié. Lors de l'analyse des ondes, le signal se décompose en approximations et en détails. Ces approximations sont ensuite décomposées en approximations et en détails dans un processus successif. Des techniques existent pour décomposer ou coder des signaux en "n" niveaux, avec possibilité de décomposer jusqu'à (n + 1). Dans l'analyse du faisceau d'ondes, les détails sont les suivants [55]. Dans l'analyse en paquets d'ondelettes, les détails aussi bien que les approximations peuvent être décomposés. Ceci rapporte plus de 2n+1 de différentes décompositions du signal. L'arbre de décomposition en paquets d'ondelettes a représenté dans la Figure II.14.

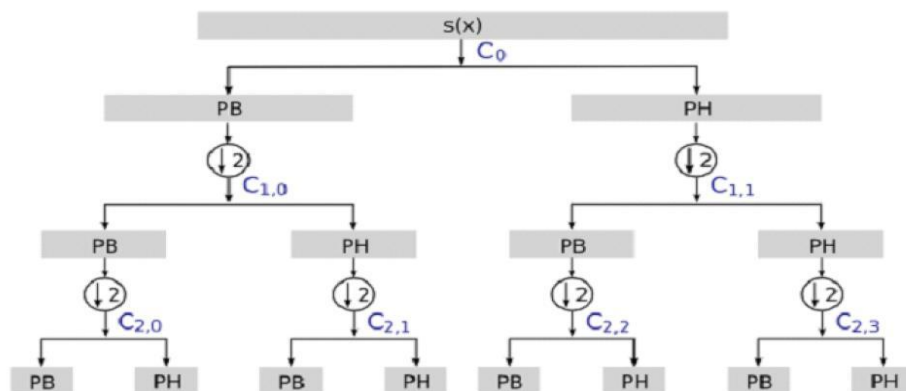


Figure II.14 : Schéma de l'algorithme de décomposition en paquets d'ondelette d'un signal $s(t)$

II.4.3 Principe des paquets d'ondelettes

Voici les étapes principales du principe des paquets d'ondelettes :

- **Décomposition initiale** : Le signal est initialement décomposé en approximations et en détails à un certain niveau de résolution. Cela peut être effectué à l'aide d'une ondelette mère spécifique.
- **Sous-bandes** : Les approximations et les détails obtenus à l'étape précédente sont divisés en plusieurs sous-bandes. Chaque sous-bande représente une combinaison spécifique de détails et d'approximations.

- **Répétition de la décomposition** : Le processus de décomposition est répété pour chaque sous-bande, créant ainsi une structure arborescente. Cela signifie que chaque sous-bande peut être à son tour décomposée en d'autres sous-bandes, permettant une exploration plus approfondie des détails du signal.
- **Sélection des sous-bandes** : Dans les paquets d'ondelettes, il est possible de sélectionner différentes combinaisons de sous-bandes pour obtenir une représentation plus adaptée au signal étudié. Cela permet d'explorer les caractéristiques spécifiques du signal avec une plus grande flexibilité.

La décomposition en paquets d'ondelettes offre ainsi une flexibilité accrue par rapport à la décomposition en ondelettes classique, permettant d'explorer différentes combinaisons de sous-bandes et de mieux capturer les caractéristiques du signal.

II.4.4 Propriétés d'ondelettes paquets

Les paquets d'ondelettes présentent plusieurs propriétés qui les rendent particulièrement utiles dans l'analyse des signaux. Voici quelques-unes des propriétés clés des paquets d'ondelettes :

- **Multi résolution** : Les paquets d'ondelettes permettent une représentation multi résolution des signaux, c'est-à-dire qu'ils fournissent une décomposition hiérarchique du signal en différentes échelles de résolution. Cela permet d'analyser le signal à différentes échelles et de détecter des structures ou des changements à des niveaux de détail variables.
- **Flexibilité** : Les paquets d'ondelettes offrent une grande flexibilité dans la construction des filtres. On peut choisir différentes fonctions d'ondelettes et personnaliser les filtres selon les besoins spécifiques de l'application. Cela permet d'adapter l'analyse aux caractéristiques particulières du signal à étudier.
- **Localisation dans le temps et en fréquence** : Les paquets d'ondelettes permettent une localisation précise des événements dans le temps et en fréquence. Contrairement à d'autres techniques de transformation comme la transformée de Fourier, les paquets d'ondelettes peuvent détecter des caractéristiques transitoires ou localisées temporellement dans un signal.

En combinant ces propriétés, les paquets d'ondelettes offrent une approche puissante et polyvalente pour l'analyse des signaux dans de nombreux domaines tels que le traitement du signal, la compression de données, l'imagerie, l'analyse des vibrations, la reconnaissance de formes, etc.

II.5 Conclusion

Dans cette note technique, nous avons mis en lumière la définition de la transformée de Fourier et ses caractéristiques, puis nous avons expliqué son utilisation massive en traitement du signal ainsi que les types de signaux, ce qui au final nous a appris les avantages de cette transformée et ses applications. Nous sommes ensuite passés à la transformée de Fourier glissante, elle-même un principe de Heisenberg frustré, et nous en avons terminé avec cette histoire qui arrive à la transformée en ondelettes paquets et principes des paquets d'ondelettes et propriétés d'ondelettes paquets.

Et finalement, nous concluons que les paquets d'ondelettes sont une technique importante dans le domaine de la science et de l'ingénierie des ondelettes.

Chapitre III :
Simulation et résultats

III.1 Introduction

Notre étude du moteur asynchrone, dans le premier Chapitre étudiant la théorie, nous Constatons que erreurs les plus importantes lors du fonctionnement du moteur est la survenue de casse dans les barres du moteur, nous allons donc essayer de simuler le moteur en concernant un modèle du moteur base sur l'analyse et les équations du premier chapitre dans le programme MATLAB 7.9.0 nous essaierons de modéliser dans chacun des cas normaux où l'une des barres du moteur est cassées ensemble, et quand ils sont séparés, afin de connaître les caractéristiques les plus importantes du moteur.

Dans ce chapitre, après l'analyse mathématique du moteur asynchrone du premier chapitre et l'extraction des défauts les plus importants, à savoir la cassure de l'une de barre du rotor, nous allons essayer d'analyser les caractéristiques les plus importantes du moteur et les différentes évolutions des courbes de courant de phase statorique, du couple électromagnétique et de la vitesse dans différentes conditions de fonctionnement, afin d'essayer de simuler dans un état sain, puis d'essayer de cassure l'une de barre du rotor. Ensuite, nous avons essayé d'analyser ces courbes par l'ondelette que pour type Daubechies 44 (44db) multi-niveaux. Ensuite, nous prenons la courbe avec laquelle l'erreur a semblé être analysée par l'ondelette paquet, le but de cette étude est d'analyser et d'expliquer les phénomènes caractéristiques électriques et mécaniques notables du moteur tel que le courant de couple de la phase statorique.

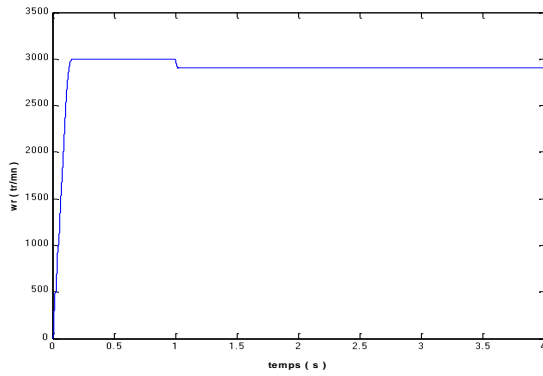
III.2 Simulation et résultats du modèle multi enroulements

Nous avons développé le modèle général d'une machine à cage asynchrone, à travers le programme, écrit en langage MATLAB où il est devenu possible d'obtenir, les caractéristiques les plus importantes du comportement du moteur asynchrone dans le cas du rotor sain et en cassure des barres rotoriques, les équations issues du modèle machine étant non linéaires, la résolution des équations est effectuée par la méthode numérique Runge Kutta dans l'ordre 4.

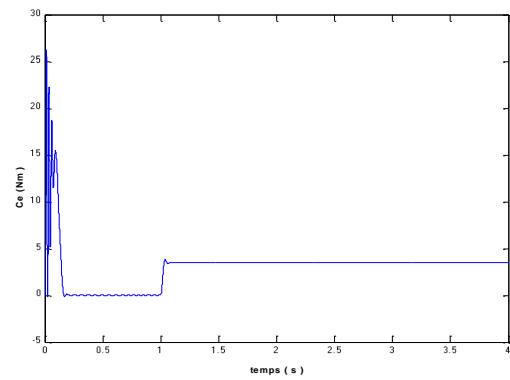
Nous réaliserons la simulation dans ce chapitre dans tous les cas de moteur et en cas ne pas une cassure dans les barres et lorsque elle est présente, nous mettons le temps de la charge de la simulation à 1s et la valeur de charge à 3,5 Nm. et nous réglage le temps de la cassure de barres rotoriques à 2s.

III.2.1 Cas d'une machine saine

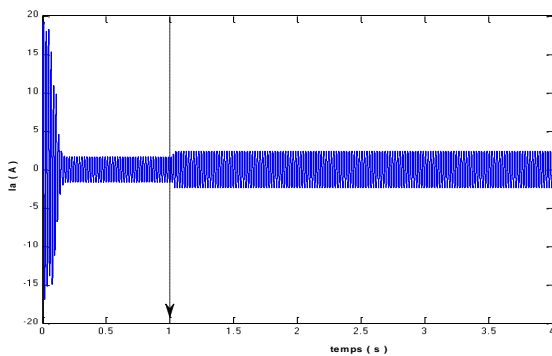
La simulation du modèle du moteur asynchrone avec un rotor sain, on observe les différentes caractéristiques de ce moteur à partir de la vitesse, du couple électromagnétique et des courants statoriques (figures III.1).



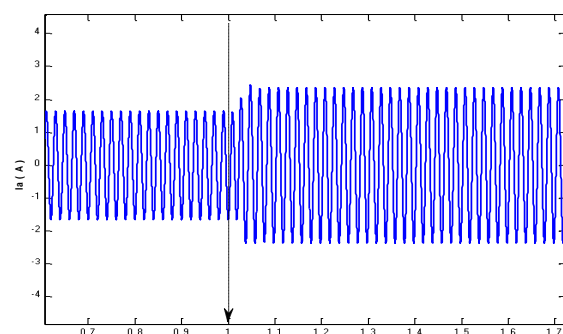
(A) : Vitesse électrique



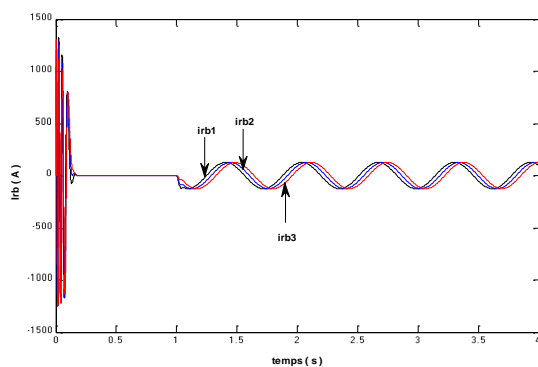
(B) : Couple électromagnétique



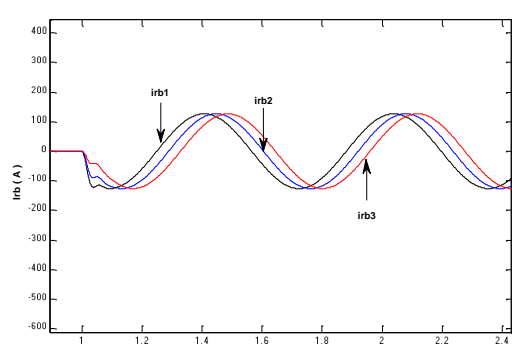
(C) : La courante d'une phase statorique Ia



(D) : Zoom du courant statorique Ia



(E) : Courants des barres rotoriques (1,2, 3)



(F) : Zoom courants des barres rotoriques (1,2,3)

Figures III.1 : Différents grandeurs électrique et mécanique pour un fonctionnement sain de la machine

On constate sur les courbes issues de la modélisation que la vitesse atteint la valeur nominale et diminue légèrement lorsque l'appareil est chargé (figure. A), tandis que le couple tend alors à la valeur du couple de charge (figure. B).

On nous remarquons fort appel du courant statorique (figures. C, D) et le courant dans les barres rotoriques (figures, E, F) en début de simulation. Lorsque le régime permanent est atteint, ces courants deviennent sinusoïdaux (figure. D). Et le courant de barre est d'autant plus important que la charge est élevée (figure. F).

La simulation du modèle a confirmé le bon fonctionnement du moteur asynchrone avec un rotor en bon état. Les caractéristiques obtenues sont en accord avec les spécifications nominales du moteur. Cela indique que le moteur est capable de fournir la puissance et le couple requis dans des conditions normales de fonctionnement.

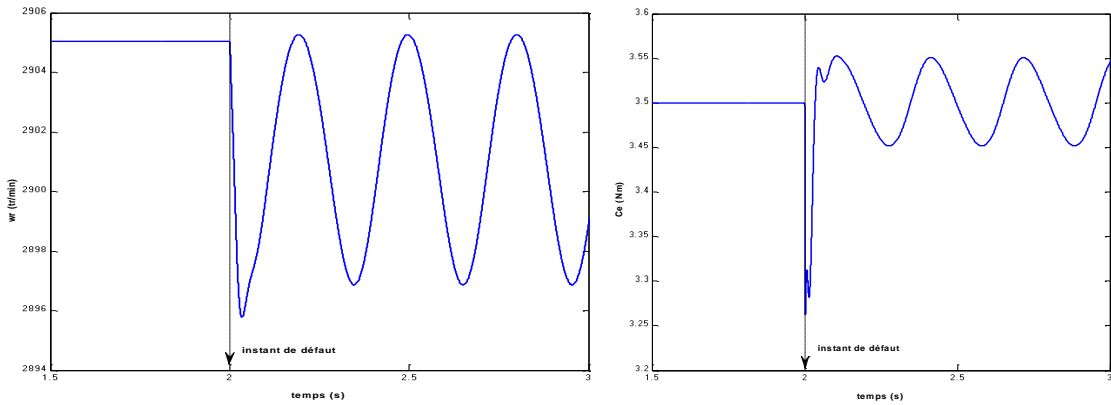
III.2.2 L'état de la machine en Cas -de casse:

Pour étudier et connaître le comportement d'un moteur asynchrone en cas de cassure des barres rotoriques, nous allons simuler le modèle du moteur pour programme MATLAB dans différents cas de cassure des barres que l'on prendra la valeur de la charge 3,5 Nm et le moment de la cassure en 2 S on va essayer de simuler le moteur quand la première barre est cassée seule, puis on simule quand deux barres sont cassées ensemble (1, 2) puis la dernière quand deux barres séparées sont cassées (1, 3).

Ces simulations nous permettront d'analyser les effets de la cassure des barres rotoriques sur les caractéristiques du moteur, telles que la vitesse, le couple et les courants. Nous pourrions ainsi observer comment ces défaillances influencent le fonctionnement global du moteur et évaluer les conséquences sur ses performances.

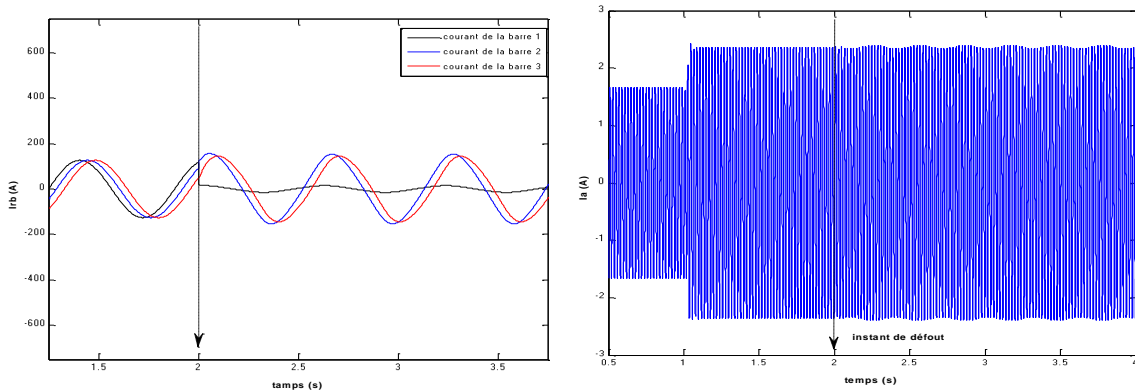
III.2.2.1. Cas d'une cassure d'une barre à la charge nominale

On va simuler le moteur si l'une de ses barres est cassée pour l'obtenir différents changements de vitesse, de couple, de courant statorique et de courant rotorique (Figures III.2).



(A) : Vitesse électrique

(B) : Couple électromagnétique



(C) : Courants des barres rotoriques (1, 2,3)

(D) : Courant d'une phase statorique Ia

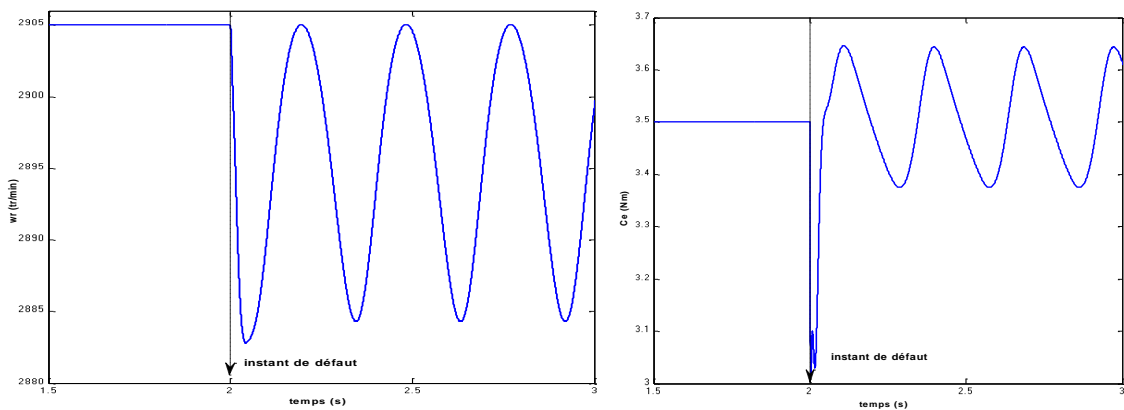
Figures III.2 : Différents grandeurs électrique et mécaniques pour un fonctionnement cassure un barre de la machine

Afin que l'on constate une augmentation de la valeur de la vitesse et du couple pour atteindre la valeur la plus élevée, mais il ya a un l'oscillation qui apparaissent sur les courbes de vitesse et du couple quand en cassure le barre (Figure .A et B), nous remarquons Le courant de la barre (1) cassées ont fortement diminué ont fortement diminué (figure C), quant à courant statorique (Ia) l'amplitude n'est plus constante (figure D).

Ces observations montrent les modifications induites par la cassure d'une barre du rotor sur les caractéristiques du moteur. La simulation nous permet de mieux comprendre l'impact de cette défaillance sur la vitesse, le couple et les courants, ce qui peut être utile pour le diagnostic et la maintenance du moteur.

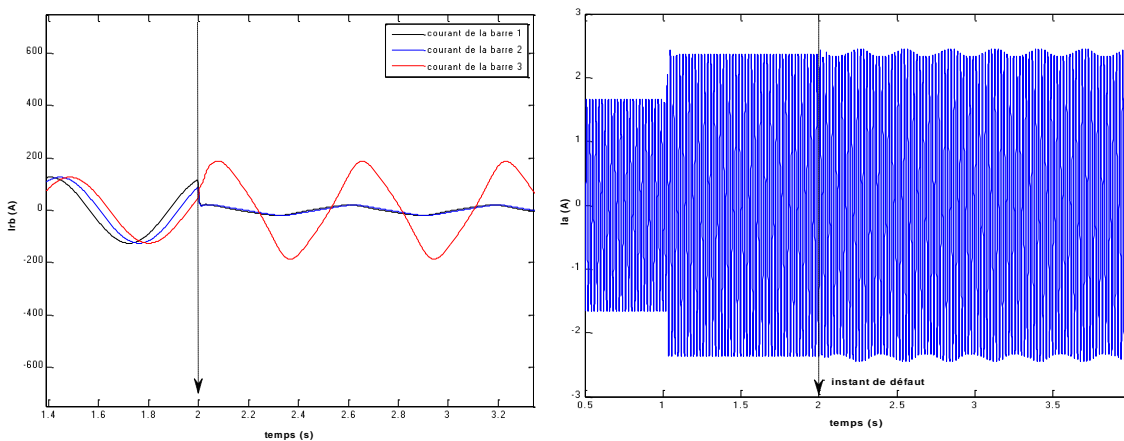
III.2.2.2 Cas d'une cassure de deux barres adjacentes à la charge nominale

Préférez simuler le moteur que nous avons fait dans le cas de la cassure d'une des barres du rotor et connaître les caractéristiques et les changements les plus importants qui se sont produits, nous allons essayer à ce stade de simuler dans le cas de la cassure de deux barres afin qu'elles soient adjacentes à l'étude des différentes caractéristiques de vitesse, couple électromagnétique, courant du statoriques et courants rotoriques (Figures III.3).



(A) : Vitesse électrique

(B) : Couple électromagnétique



(C) : Courants des barres rotoriques (1, 2,3)

(D) : Courant d'une phase statorique I_a

Figures III.3 : Différents grandeurs électrique et mécaniques pour un fonctionnement cassure deux barres (1, 2) de la machine

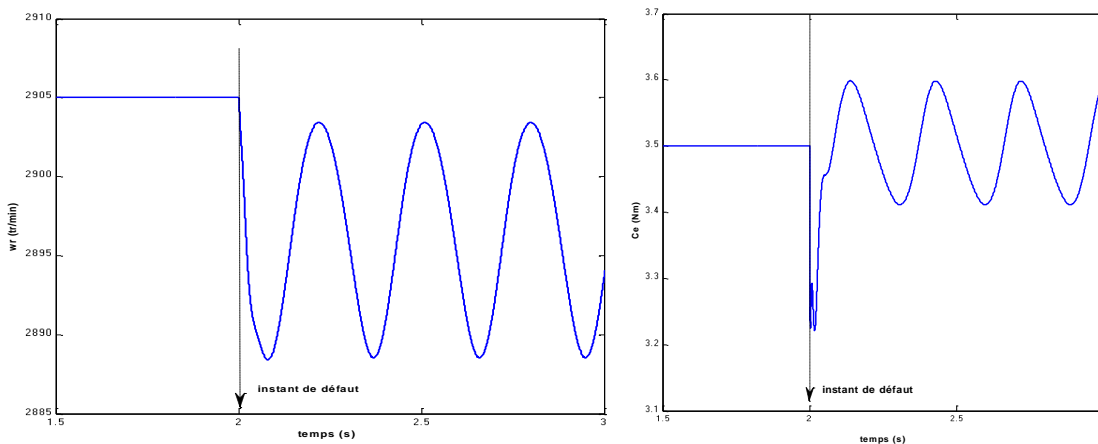
Nous remarquons qu'il y a une augmentation de la vitesse et du couple, mais il y a un les oscillations qui apparaissent sur les courbes de vitesse et du couple quand les deux cassure des barres (figure A et B) se traduisent par des vibrations dans la rotation de la machine.

Les courants dans les barres (1, 2) cassées ont fortement diminué (figure C), pour le courant statorique (I_a) l'amplitude n'est plus constante (figure D).

La diminution des courants dans les barres cassées est une conséquence directe de la cassure du chemin de courant. Les barres cassées ne peuvent plus transporter efficacement le courant électrique, ce qui entraîne une diminution significative des courants dans ces barres.

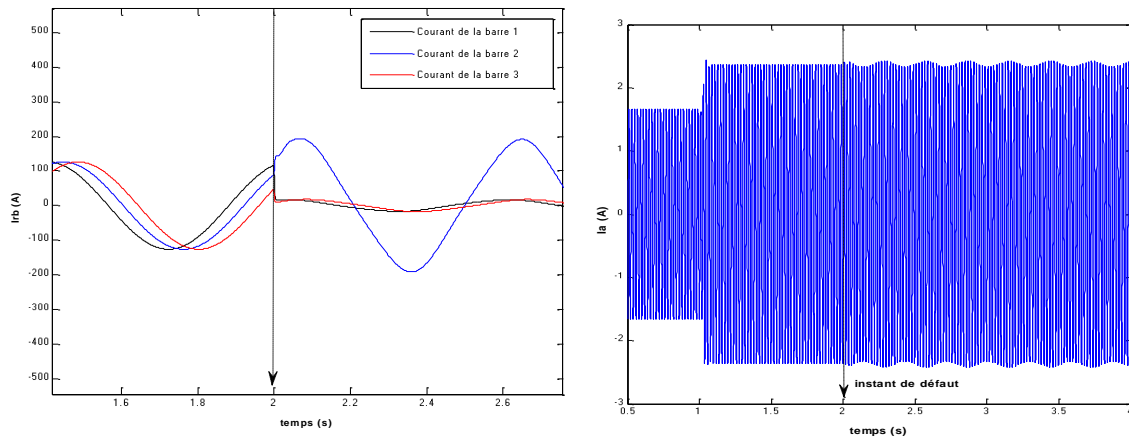
III.2.2.3 Cas d'une cassure de deux barres éloignées à la charge nominale

Lors de l'étude du moteur dans les deux cas précédents et de la compréhension de son comportement en présence d'une cassure, ainsi que de l'étude de ses principales caractéristiques en cas de cassure des barres du rotor, nous allons maintenant essayer d'étudier et de simuler le moteur dans le cas où deux barres éloignées sont cassées (les première et troisième barres), afin d'obtenir différentes caractéristiques mécaniques et électriques de ce moteur, telles que la vitesse, le couple et le courant de barre rotorique (Figures III.4).



(A): Vitesse électrique

(B): Couple électromagnétique



(C): Courants des barres rotoriques (1, 2,3) (D): Courant d'une phase statorique I_a

Figures III.4 : Différents grandeurs électrique et mécanique pour un fonctionnement cassure deux barres (1, 3) de la machine

Nous noterons une augmentation de la valeur du couple de la vitesse pour atteindre une valeur plus élevée tout en maintenant la valeur lors de la charge, mais il y a un les oscillation qui apparaissent sur les courbes de vitesse et du couple (figure A et B), Les courants dans les barres cassées et au moment de la cassure les premier et troisième ont fortement diminué (figure C), pour le courant statorique (I_a) l'amplitude n'est plus constante (figure D).

Ces observations nous permettent de mieux comprendre les caractéristiques mécaniques et électriques du moteur en cas de cassure de deux barres éloignées du rotor. La simulation nous offre des informations précieuses pour l'évaluation des performances et la maintenance du moteur dans de telles situations de défaillance.

III.2.3.Comparaison du cas d'une machine saine avec le cas de cassure de barre

✓ **Vitesse et couple :** Dans le cas d'une machine saine, la vitesse de la machine atteint sa valeur nominale et reste relativement stable, tandis que le couple électromagnétique tend vers la valeur du couple de charge. Cependant, lorsqu'il y a une cassure de la première barre, des oscillations et des variations de la vitesse et du couple peuvent survenir. Ces oscillations sont généralement dues aux déséquilibres créés par la cassure et peuvent entraîner des vibrations indésirables dans la machine.

✓ **Courant dans la barre cassée :** Lorsqu'une barre est cassée, le courant qui y circule diminue considérablement, voire atteint zéro. Cela est dû à la discontinuité dans le

circuit électrique causée par la cassure. En conséquence, le courant dans les autres barres peut augmenter pour compenser cette perte de courant.

✓ **Courant statorique** : Dans le cas d'une machine saine, le courant statorique peut avoir une valeur relativement constante. Cependant, lorsque la première barre est cassée, la valeur du courant statorique peut ne plus être constante et peut présenter des variations. Cela est également dû à l'effet de la cassure sur le circuit électrique et peut avoir un impact sur les performances globales du moteur.

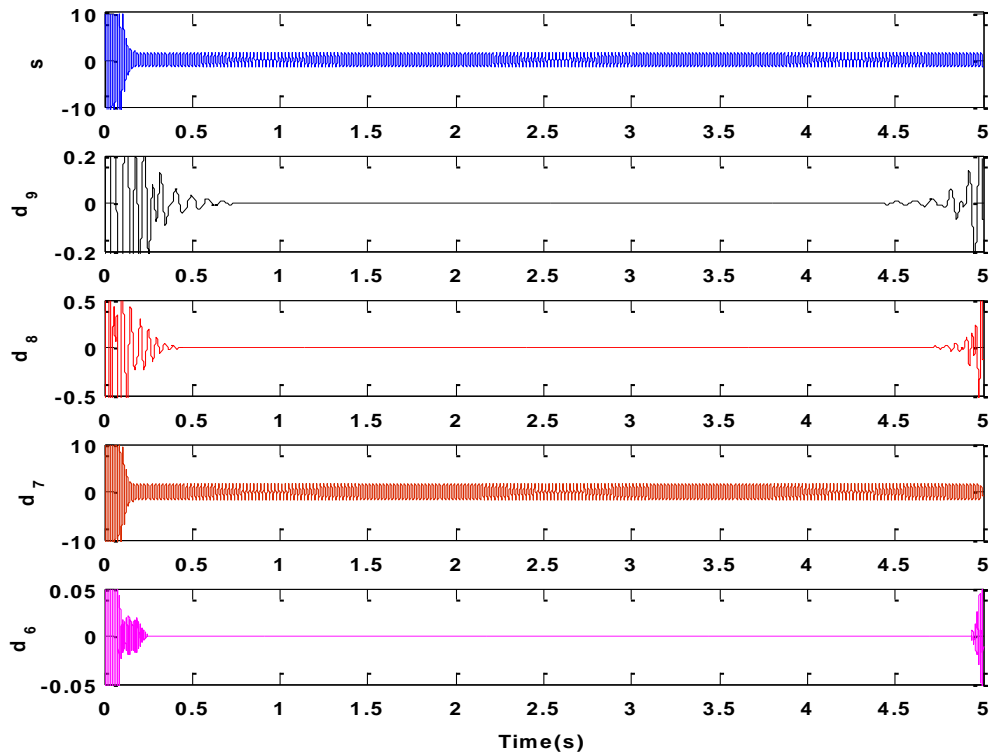
En résumé, la cassure de la première barre dans le moteur asynchrone entraîne des variations et des perturbations dans la vitesse, le couple et les courants électriques. Ces différences par rapport à l'état normal peuvent être détectées et surveillées pour évaluer l'état de la machine et prendre les mesures appropriées pour la réparation ou la maintenance.

III.3. Analyse des caractéristiques électriques par la technique des ondelettes

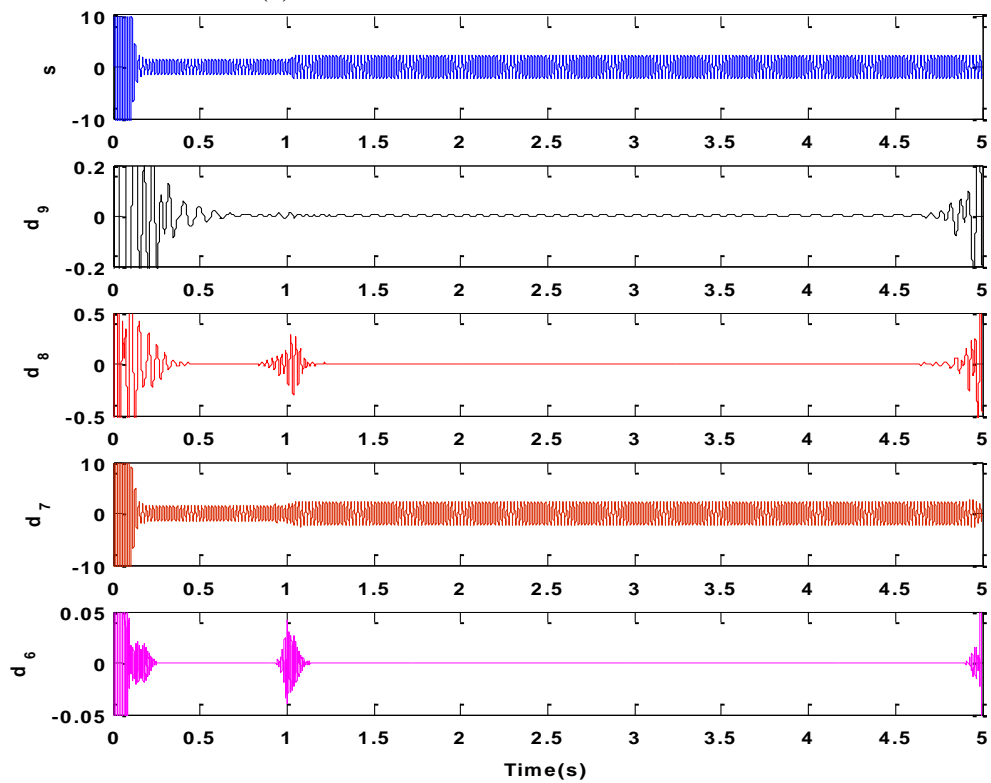
Lorsque nous avons simulé le moteur asynchrone et extrait toutes les propriétés électriques et mécaniques dans la première barre puis la seconde avec la première, nous allons essayer à ce stade d'analyser toutes les courbes les propriétés extraites et c'est-à-dire deux types d'ondelette discrète. Il s'agit de décomposition multi-niveaux et d'analyse en paquet d'ondelette. Les résultats ont été obtenus pendant un certain temps 10^{-4} sur une durée totale de 1s.

III.3.1. Analyse du courant statorique par la décomposition multi niveau d'ondelettes

Nous analyserons le courant statorique avec des ondes d'ondelette de type Daubechies 44 (44db) comme des ondes d'ondelette mère et de fréquence d'échantillonnage $F_e=10\text{KHz}$, donc le nombre de décompositions égale 9.



(a) : TOD multi niveau à fonctionnement à vide



(b) : TOD multi niveau à fonctionnement en charge

Figure III.5 : TOD type multi niveau du courant de la phase i_{as} en fonctionnement sain : à vide et en charge

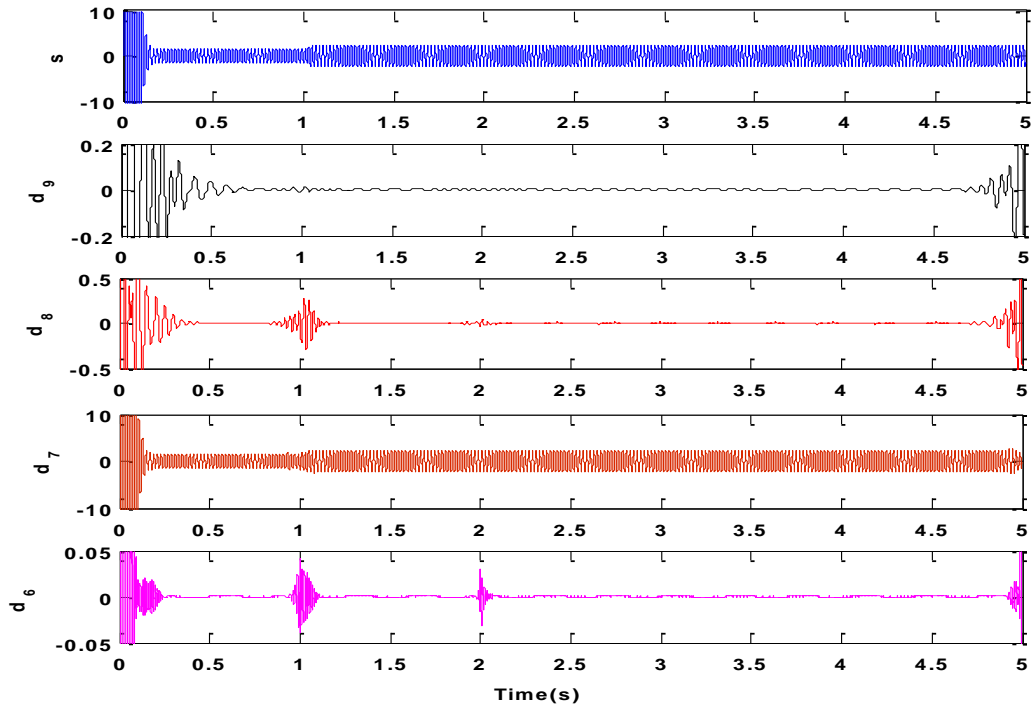


Figure III.6 : TOD type multi niveau du courant de la phase i_{as} avec défaut d'une barre (1) cassée au rotor

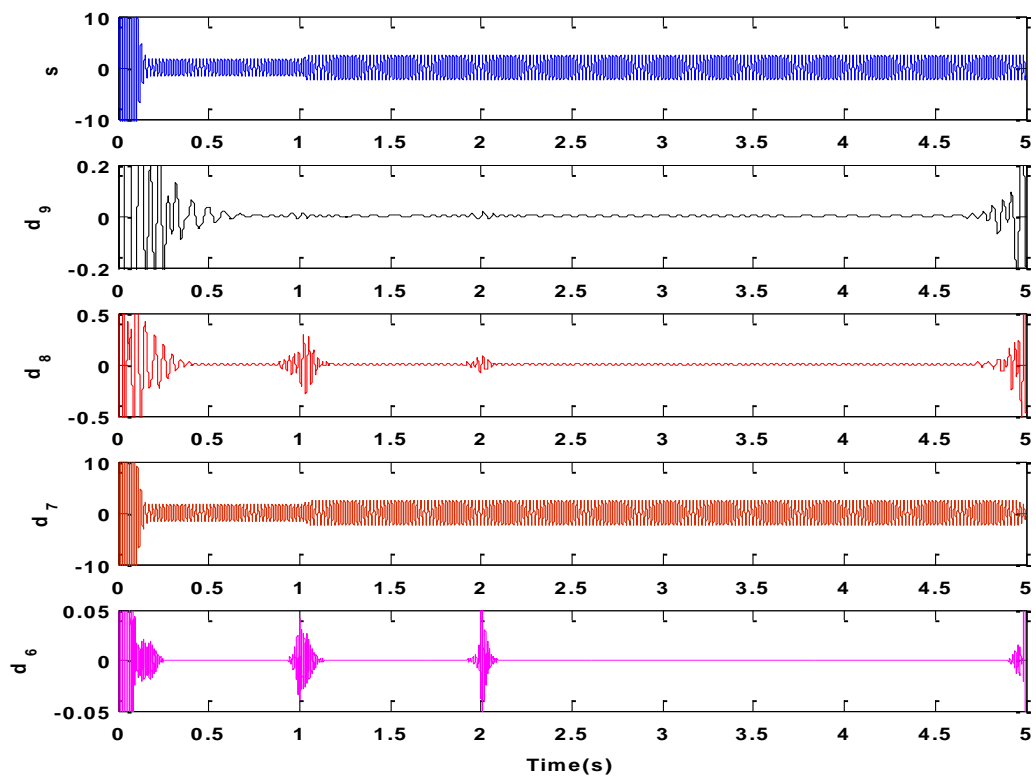


Figure III.7 : TOD type multi niveau du courant de la phase i_{as} avec défaut de deux barres (1, 2) cassées au rotor

Les données signaux de détail et d'approximation représentent (D9_D8_D7_D6) obtenues à partir de la méthode de décomposition en multi niveau courant statorique pour un fonctionnement sain (à vide et en charge) et avec défaut d'une seule et deux barres

cassées au rotor, dans tous les cas obtenu par décomposition en multi niveau courant statorique.

- **Comparaison entre fonctionnement sain (à vide et en charge) et la cassure d'une barre rotorique:**

Les courbes (D7) n'ont pas évolué, ce qui signifie qu'il n'y a pas de changement significatif dans les fréquences de moyen niveau. La courbe (D9) n'a pas changé lors de la cassure de la première barre, indiquant une similarité avec l'état normal. Cependant, il y a une légère impulsion qui peut indiquer une perturbation dans les fréquences de très bas niveau.

- **Comparaison entre l'état sain (à vide et en charge) et la cassure de deux barres rotoriques :**

Les courbes (D7) n'ont pas évolué, ce qui suggère une similarité avec l'état sain en termes de fréquences. La courbe (D9) présente une légère impulsion lorsque les deux barres sont cassées, ce qui peut indiquer une perturbation supplémentaire dans les fréquences de très bas niveau par rapport à la cassure d'une seule barre. Les courbes (D6-D8) montrent une légère impulsion lors de la cassure d'une seule barre rotorique, suggérant une perturbation dans les fréquences de bas niveau. Lors de la cassure des deux barres ensemble, il y a une augmentation du volume de l'impulsion, ce qui indique une perturbation plus prononcée dans les fréquences de bas niveau.

Ces observations suggèrent que la cassure d'une ou de deux barres rotoriques peut entraîner des changements dans les fréquences de très bas et bas niveau du courant statorique. La présence d'impulsions et de perturbations plus importantes lors de la cassure de deux barres par rapport à une seule peut être attribuée à l'interaction entre les défauts et leurs effets cumulatifs.

III.3.2. Analyse de la vitesse électrique par la décomposition multi niveau d'ondelettes

A cette partie, comme nous l'avons fait précédemment, nous allons analyser les données de régime moteur de l'ondelette, et qui sont de type Daubechies (44db) telles que l'ondelette mère de fréquence d'échantillonnage $F_e=10\text{KHz}$, et donc le nombre de décompositions est égal à 9.

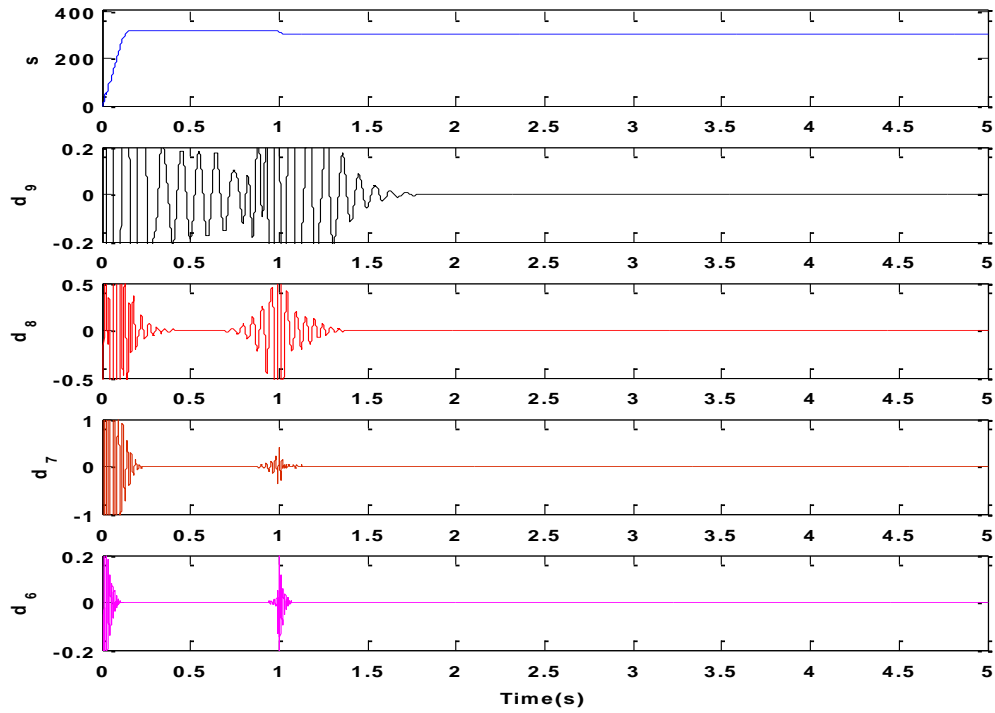


Figure III.8: TOD type multi niveau de la vitesse de la phase i_{as} en fonctionnement sain en charge

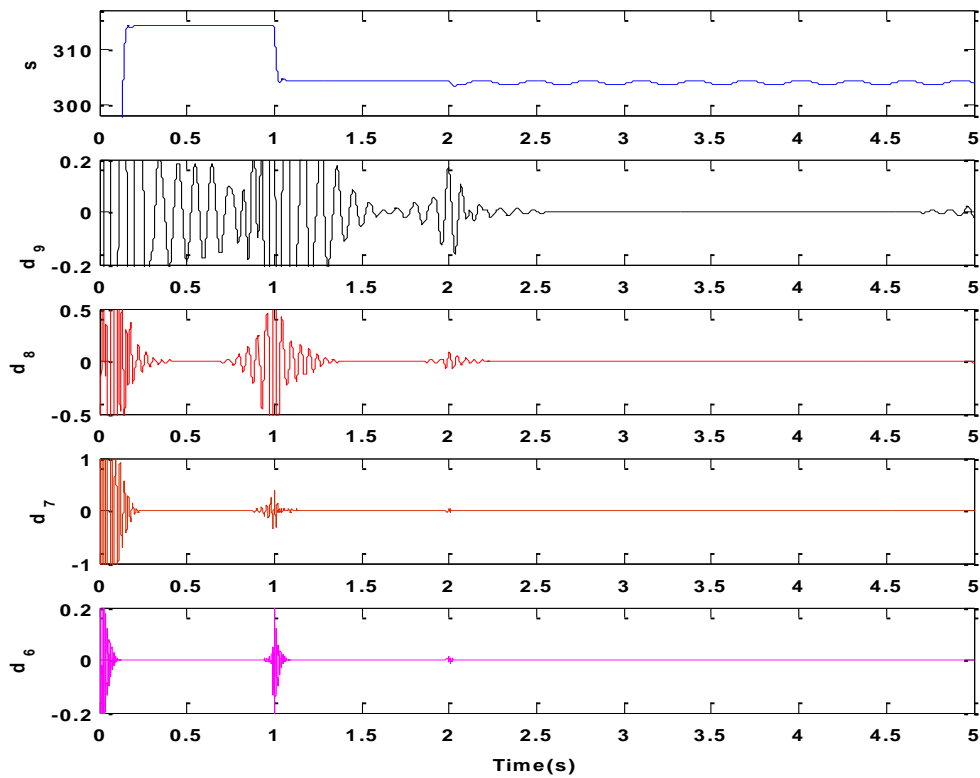


Figure III.9 : TOD type multi niveau de la vitesse de la phase i_{as} avec défaut d'une barre (1) cassée au rotor

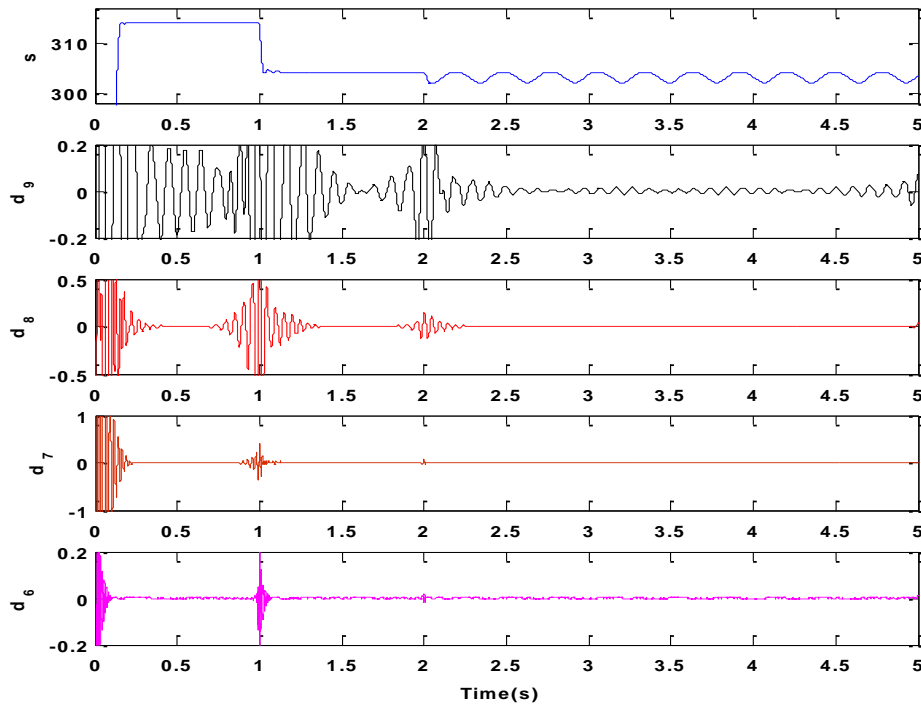


Figure III.10 : *TOD* type multi niveau de la vitesse de la phase i_{as} avec défaut de deux barres (1, 2) cassées au rotor

Nous avons extrait les courbes qui représente les signaux détail et approximation (D9-D8-D7-D6-S), et nous les avons obtenues par la méthode d'obtention par décomposition en multi-niveaux pour les courbes de vitesse électrique et nous l'avons obtenue dans tous les cas étudiés pour connaître toutes les évolutions et caractéristiques. Nous allons essayer de comparer tous les signaux d'approximation que nous avons reçus du moteur à l'état normal et lorsque la première barre a été cassée, puis les deux barres ont été cassées ensemble.

- **Comparaison entre l'état sain en charge et la cassure d'une barre :**

La courbe (S) présente une décroissance suivie d'une perturbation, ce qui indique une variation du comportement de la vitesse électrique par rapport à l'état normal. La courbe (D9) présente des vibrations lors de la cassure de la première barre, suggérant une perturbation dans les fréquences de très bas niveau. Cependant, en présence d'une seule barre cassée, il peut y avoir une certaine régularité dans les vibrations. La courbe (D8) présente une impulsion lors de la cassure de la première barre, indiquant une perturbation dans les fréquences de bas niveau. Les courbes (D7_D6) ne montrent aucun changement significatif dans ce cas.

- **Comparaison entre l'état sain en charge et la cassure de deux barres :**

La perturbation dans la courbe (S) est plus importante lorsque les deux barres sont cassées ensemble par rapport à la cassure d'une seule barre. La courbe (D9) présente des vibrations accompagnées de désordre lorsque les deux barres sont cassées, ce qui suggère une perturbation plus prononcée dans les fréquences de très bas niveau. La courbe (D8) montre une augmentation de l'impulsion lors de la cassure des deux barres, indiquant une perturbation accrue dans les fréquences de bas niveau. La courbe (D7) ne présente aucun changement significatif, mais la courbe (D6) montre une perturbation si les deux barres sont cassées ensemble.

Ces observations indiquent que la cassure d'une ou de deux barres rotoriques entraîne des changements dans les caractéristiques des signaux d'approximation, notamment dans les fréquences de très bas et bas niveau. La présence d'une perturbation plus importante et d'une augmentation des impulsions dans les courbes d'approximation est observée lorsque les deux barres sont cassées par rapport à la cassure d'une seule barre.

III.3.3. Analyse du couple électromagnétique par la décomposition multi niveau d'ondelettes

Nous allons essayer d'analyser les données du couple électromagnétique avec l'ondelette à travers Daubechies (44db) telles que l'ondelette mère de fréquence d'échantillonnage $F_e=10\text{KHz}$, et donc le nombre de décompositions est égal à 9.

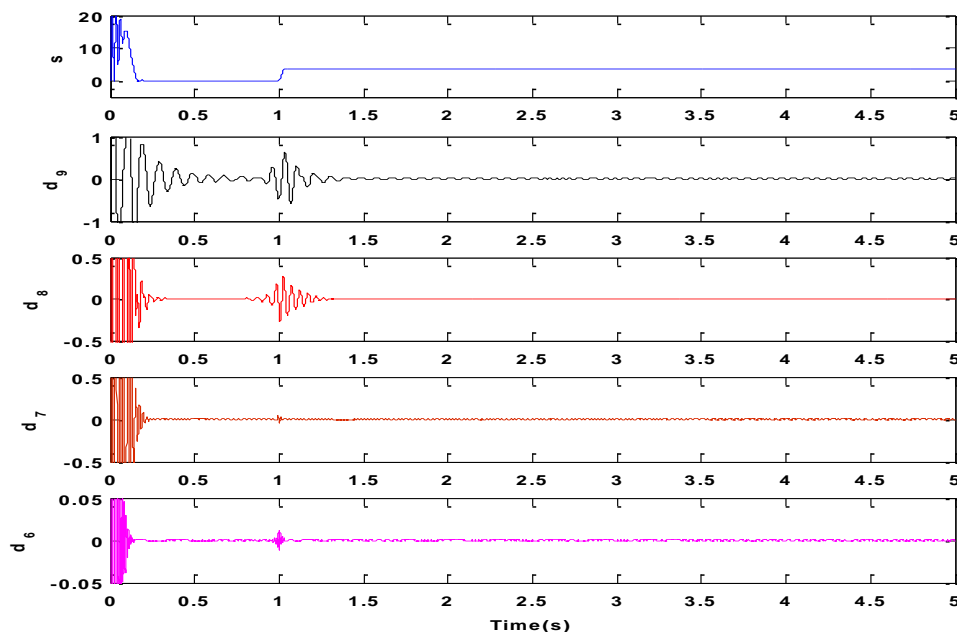


Figure III.11 : TOD type multi niveau du couple de la phase i_{as} en fonctionnement sain en charge

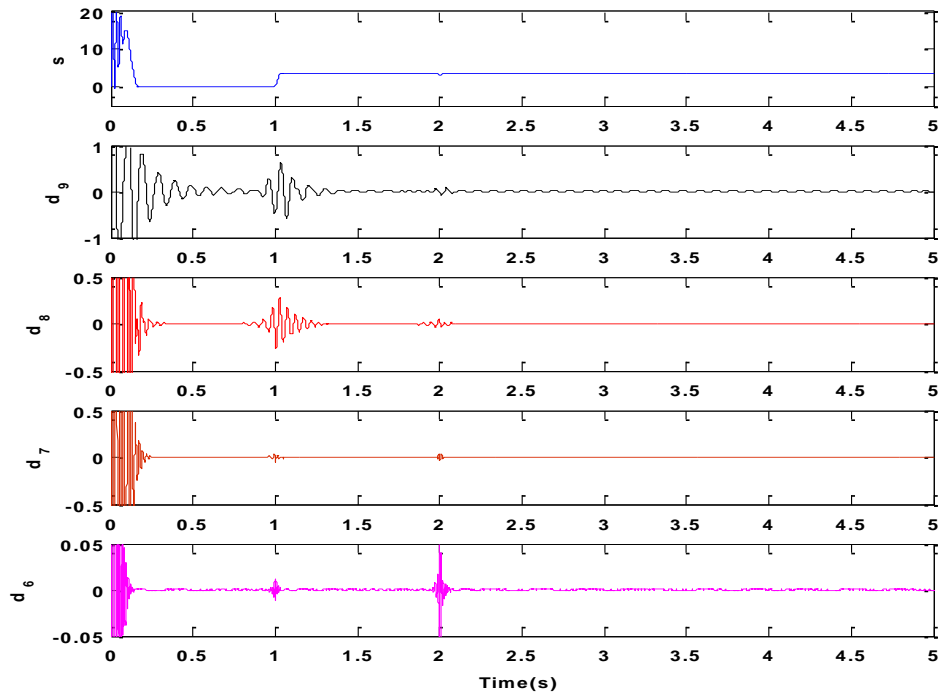


Figure III.12: TOD type multi niveau du couple de la phase i_{as} avec défaut d'une barre (1) cassée au rotor

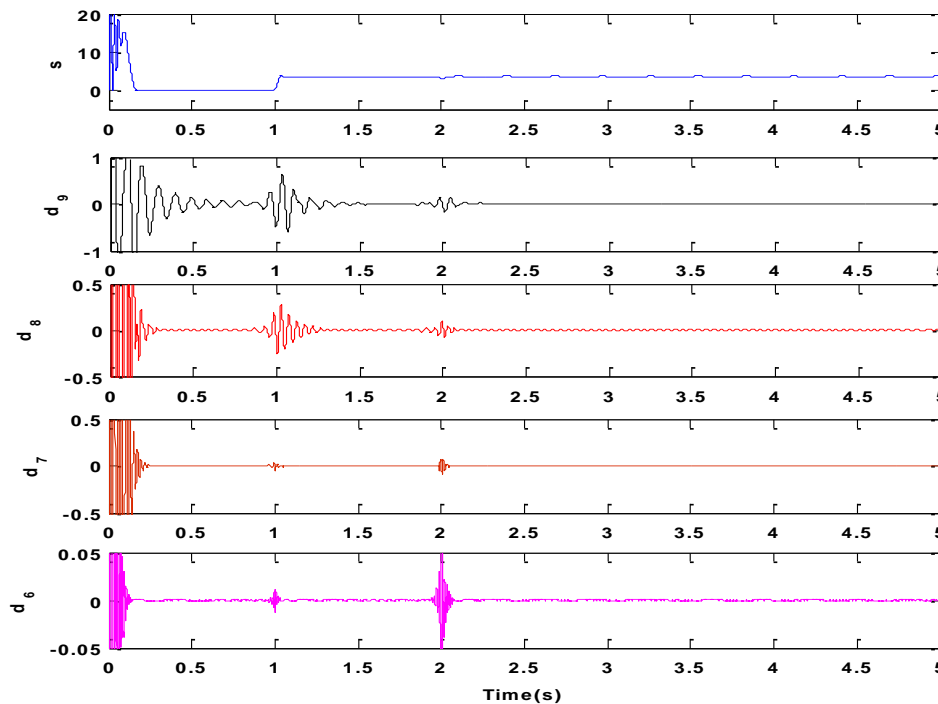


Figure III.13 : TOD type multi niveau du couple de la phase i_{as} avec défaut de deux barres (1, 2) cassées au rotor

Analyse des données de couple électromagnétique en utilisant les signaux de détail et d'approximation (D9-D8-D7-D6-S) obtenus grâce à la décomposition multi-niveaux des courbes de couple électromagnétique.

- **Comparaison avec l'état et sain en charge et la cassure d'une barre et cassure de deux barres :**

La courbe (S) ne présente aucun changement significatif lors de la cassure de la première barre, indiquant une similarité avec l'état normal. Cependant, lors de la cassure des deux barres, une perturbation est observée, ce qui suggère une altération du comportement du couple électromagnétique. Les courbes (D7-D9) ne montrent pas de changement significatif dans les deux cas, à l'exception de l'apparition d'une petite impulsion, ce qui peut indiquer une légère perturbation dans les fréquences de bas et très bas niveau. Les courbes (D8-D6) présentent une légère impulsion lors de la cassure de la première barre, ce qui peut indiquer une perturbation dans les fréquences de bas niveau. Lors de la cassure des deux barres, on observe une légère impulsion suivie d'une perturbation plus prononcée dans la courbe.

Ces observations suggèrent que la cassure d'une ou de deux barres rotoriques peut entraîner des changements dans le comportement du couple électromagnétique, notamment dans les fréquences de bas et très bas niveau. L'apparition d'une perturbation plus prononcée dans la courbe de couple électromagnétique lors de la cassure des deux barres par rapport à une seule peut être attribuée à l'interaction entre les défauts et à leurs effets cumulatifs.

III.4 Analyse de la caractéristique électrique par la technique d'ondelette paquet

Lorsque nous avons analysé les différentes caractéristiques du moteur asynchrone à partir de la vitesse, et couple électromagnétique et courant statoriques, utilisation de l'analyse des ondelettes et nous avons trouvé divers changements dans les courbes obtenues, à ce stade, nous essaierons d'analyser l'indication de l'endroit où les changements apparaissent par l'ondelette paquet afin d'en savoir plus sur les changements lors de la cassure des barres de rotoriques.

III.4.1 Analyse du courant statoriques par technique d'ondelette paquet

La décomposition en paquet d'ondelettes présente une analyse multi résolution elle très fine du signal original. Les tableaux tableau III.1 et tableau III.2 indiquent les bandes de fréquences en Hertz correspondantes à la décomposition en paquet d ondelettes à ondelette mère 44db du courant statorique en 9 niveaux.

0-10000							
0-5000						5000-10000	
0-2500				2500-5000			
0-1250		1250-2500		2500-3750		3750-5000	
0-625	625-1250	1250-1875	1875-2500				
12.5	312.5-625						

Tableau III.1 : Bandes de fréquences résultantes de la décomposition en paquet d'ondelettes

Dans la machine asynchrone à cage fonctionnant sous réseau de 50 Hz, la zone significative de fréquence se trouve au-dessous de 400 Hz et d'après le tableau III.2 on s'intéresse seulement à la bande de fréquence (0-312.5 Hz).

0-312.5							
0-156.25				156.25-312.5			
0-78.125		78.125-156.25		156.25-234.37		234.37-312.5	
0-39.0625	39.0625-78.125	78.125-117.18	117.18-156.25	156.25-195.31	195.31-234.37	234.37-273.4	273.4-312.5
0-19.531	19.531-39.0625	39.0625-58.5	58.5-78.125	78.125-97.62	97.62-117.18	117.18-136.68	136.68-156.25
				156.25-175.75	175.75-195.31	195.31-214.18	214.18-234.37
						234.37-253.87	253.87-273.4
							273.4-292.87
							292.87-312.5

Tableau III.2 : Bandes de fréquences résultantes de la décomposition en paquet dans la bande [0-312.5Hz]

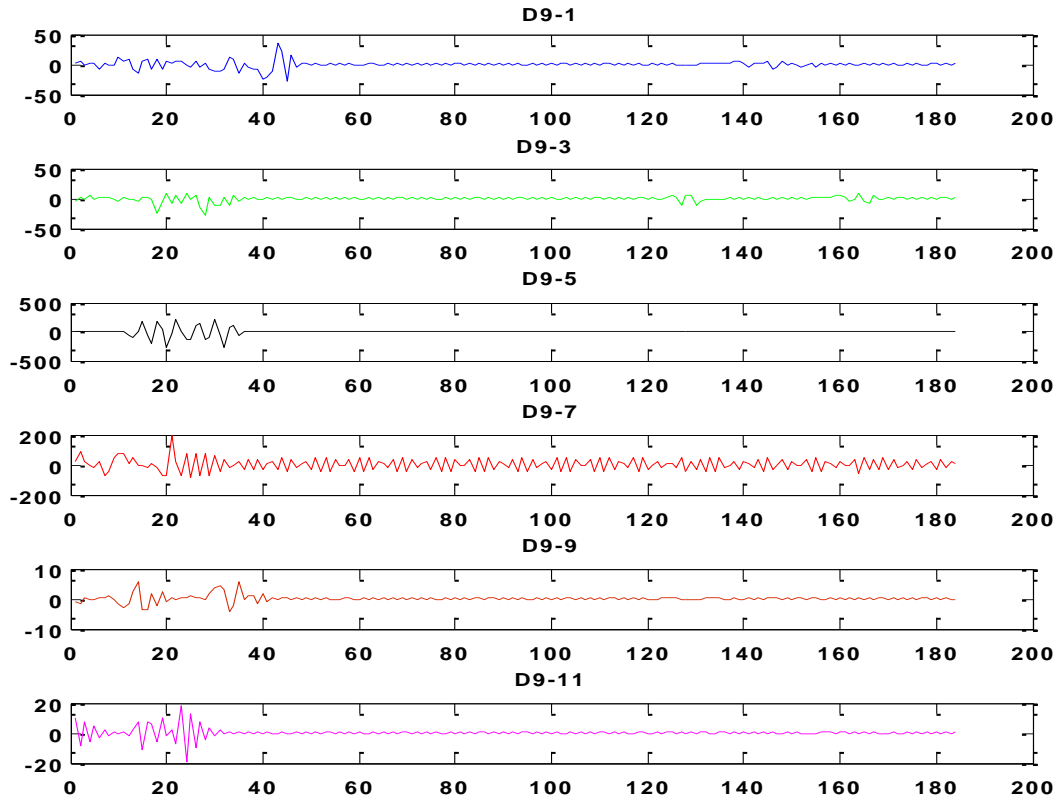


Figure III.14 : L'ondelette paquette multi niveau à fonctionnement en charge

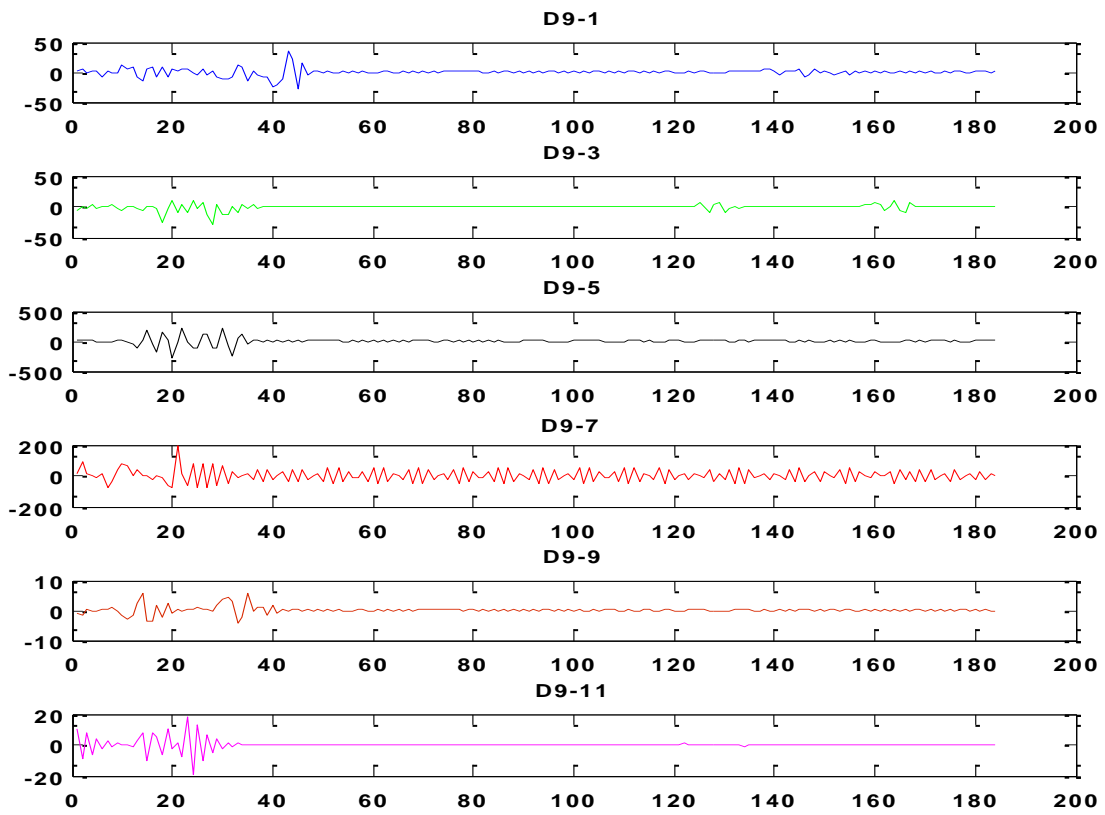


Figure III.15 : L'ondelette paquette type multi niveau du courant de la phase i_{as} avec défaut d'une barre (1) cassée au rotor

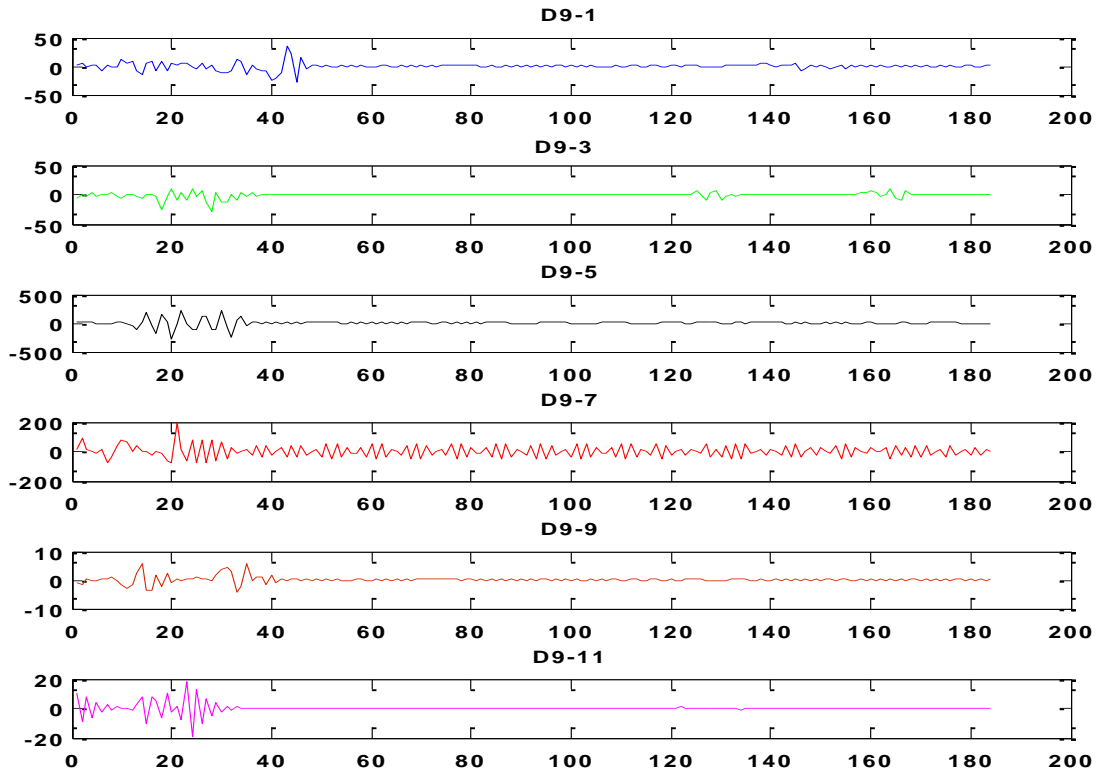


Figure III.16 : L'ondelette paqueté type multi niveau du courant de la phase i_{as} avec défaut de deux barres (1, 2) cassées

Les courbes (D9-1 D9-3 D9-5 D9-7 D9-9 D9-11) représentent les résultats obtenus à partir de notre analyse de courbe d9, (cas sain et lors de la cassure de la première barre et la cassure de la (première avec la deuxième)).

Dans le cas normal, c'est-à-dire le cas sain en charge, nous avons remarqué une perturbation et de légères vibrations dans toutes les courbes, à l'exception de la courbe D9-5. Cependant, nous avons observé la disparition de la perturbation dans les courbe D9-11 lorsque cassure la premier barre et cassure les deux barre (premier et deuxième).

La figure (III.17) présente la variation de l'énergie associée à chaque bande de fréquence obtenue par la décomposition en paquets d'ondelettes pour les signaux de détail et d'approximation qui sont inclus dans la bande de fréquences [0-312.5 Hz].

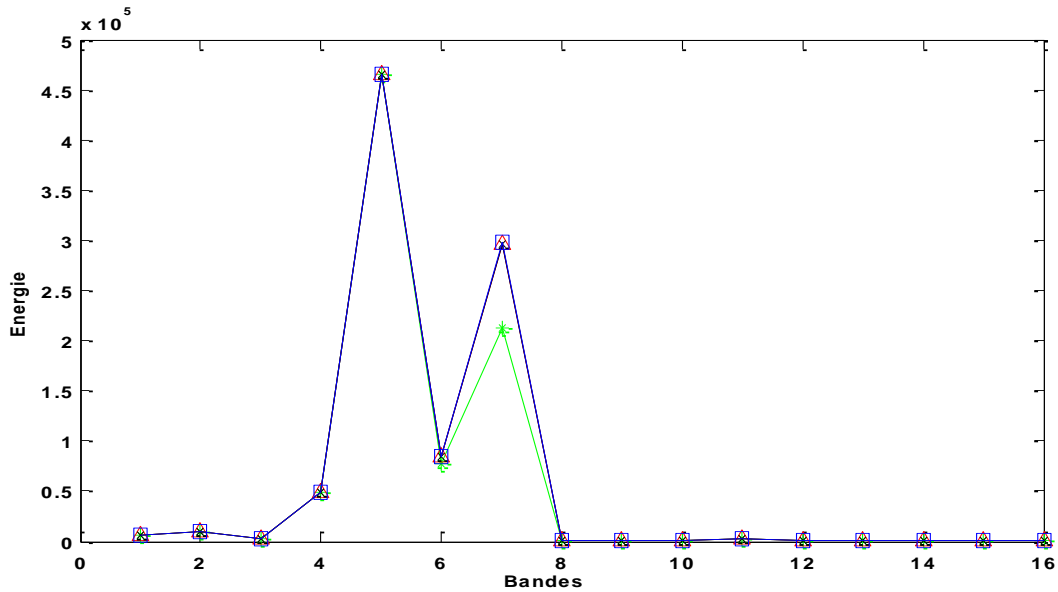


Figure III.17 : Variation de l'énergie dans les 16 bandes de fréquence au 9^{ième} niveau (db44)

*: Machine saine à vide, Δ : Machine saine en charge, \times : Machine avec défaut de cassure d'une barre (1) au rotor, \square : Machine avec défaut de deux barres (1, 2) cassées au rotor

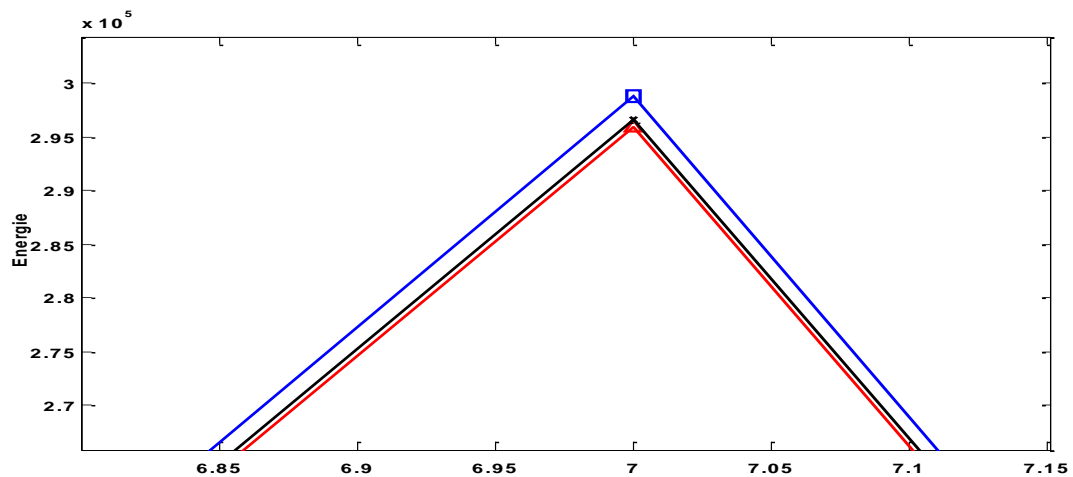


Figure III.18: Zoom de la variation de l'énergie dans les 16 bandes de fréquence au 9^{ième} Niveau (db44)

	Sain à vide	Sain en charge	Cassure d'une barre rotorique	Cassure de deux barres rotoriques
F (x)	7	7	7	7
F (y)	2.123×10^5	2.958×10^5	2.965×10^5	2.988×10^5
F (x)	5	5	5	5
F (y)	4.645×10^5	4.647×10^5	4.647×10^5	4.648×10^5

Tableau III.3 : L'énergie pour différent nombre de barres cassées

Selon la figure (III.17), on observe que l'énergie emmagasinée dans les 16 bandes de fréquence obtenues au 9^{ième} niveau de décomposition en paquets d'ondelettes, dans les cas où la machine présente une défaillance de deux barres cassées, est supérieure à l'énergie dans le cas d'une défaillance d'une barre cassée. Ainsi, les énergies des deux défauts précédents sont supérieures à l'énergie dans le cas de la machine en bon état (à vide et en charge). La transformée en paquets d'ondelettes constitue également un outil très efficace pour détecter la défaillance de la cassure de barre. Cette efficacité est due à l'effet de la transformée en paquets d'ondelettes qui permet une résolution très fine des signaux analysés. La décomposition en paquets d'ondelettes confirme les résultats obtenus par la décomposition en multi-niveau, où la non-stationnarité est détectée dans toutes les bandes de fréquence.

III.4.2 Analyse de la vitesse électrique par technique d'ondelette paquet

Nous analyserons la courbe D8 obtenue à partir de l'analyse de courbe de vitesse électrique, par de l'ondelette paquet (44db) en niveaux 9.

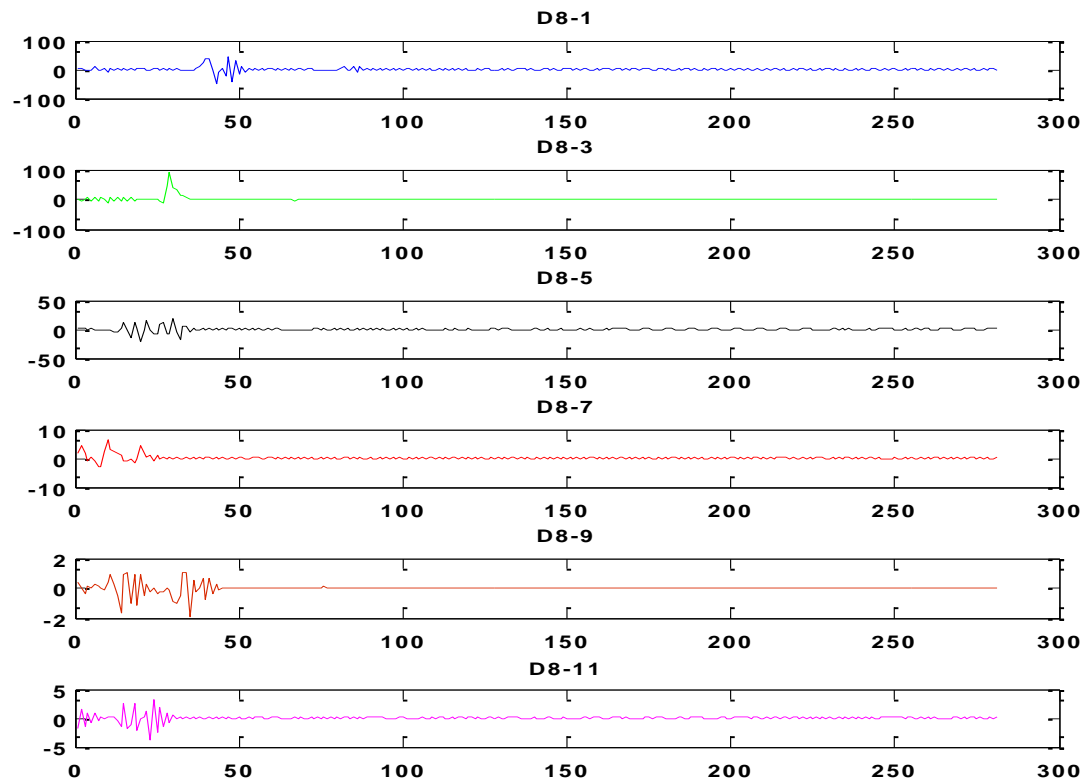


Figure III.19 : L'ondelette paquet type multi niveau de la vitesse de la phase i_{as} en fonctionnement sain en charge

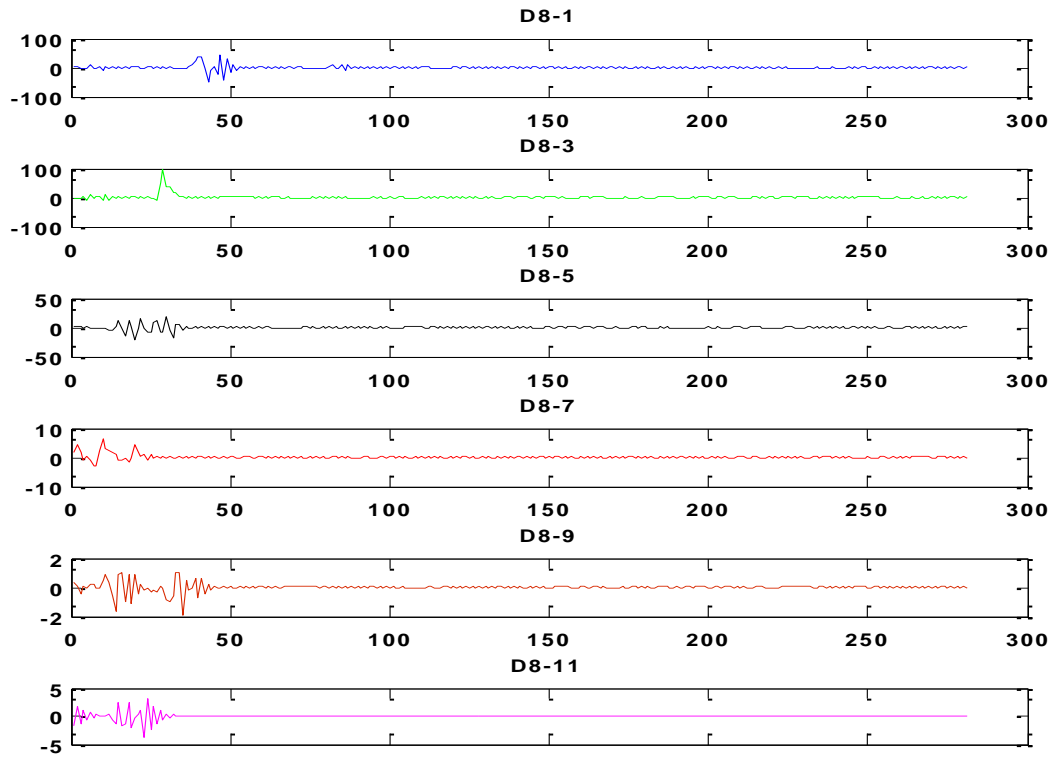


Figure III.20 : L'ondelette paquette type multi niveau de la vitesse de la phase i_{as} avec défaut d'une barre (1) cassée au rotor

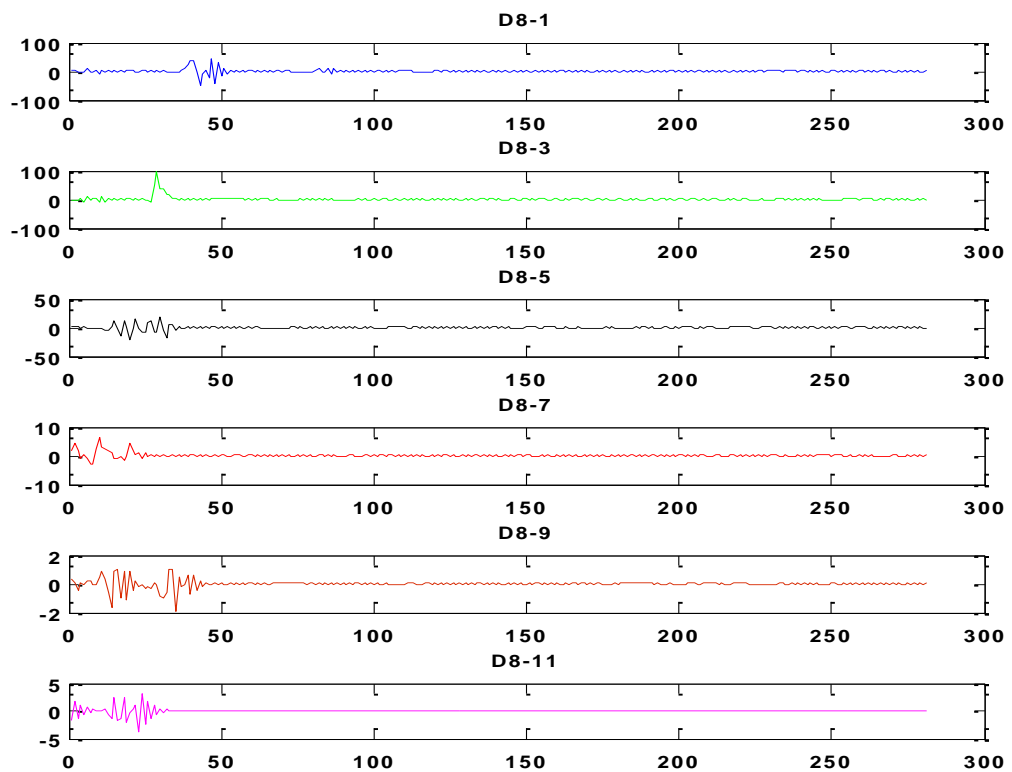


Figure III.21 : L'ondelette paquette type multi niveau de la vitesse de la phase i_{as} avec défaut de deux barres (1, 2) cassées au rotor

Les courbes (D8-1 D8-3 D8-5 D8-7 D8-9 D8-11) représentent les résultats obtenus sur celles-ci à partir de l'analyse de courbe D8 obtenu à partir de l'analyse précédente de la vitesse électrique avec laquelle nous avons trouvé le changement dans chacun des cas étudiés afin de comparer l'état normal du moteur et lorsqu'il y a une cassure de ses barres rotoriques.

Où l'on remarque une perturbation dans les courbes (D8-1 D8-5 D8-7 D8-11) dans l'état normal du moteur et l'absence de toute vibration dans (D8-3 D8-9). Lorsque l'on compare l'état sain du machine avec l'état cassure, on remarque la disparition de la perturbation dans le courbe (D8-11) dans l'état cassure première barre et cassure les deux barre (premier et deuxième).

III.4.3 Analyse du le couple électromagnétique par technique d'ondelette paquet

Nous allons essayer d'analyser la courbe D8 obtenue à partir de l'analyse de la courbe de couple électromagnétique par L'ondelette comme nous l'avons fait la dernière fois par l'ondelette paquet à l'ondelette mère à partir du niveau 9.

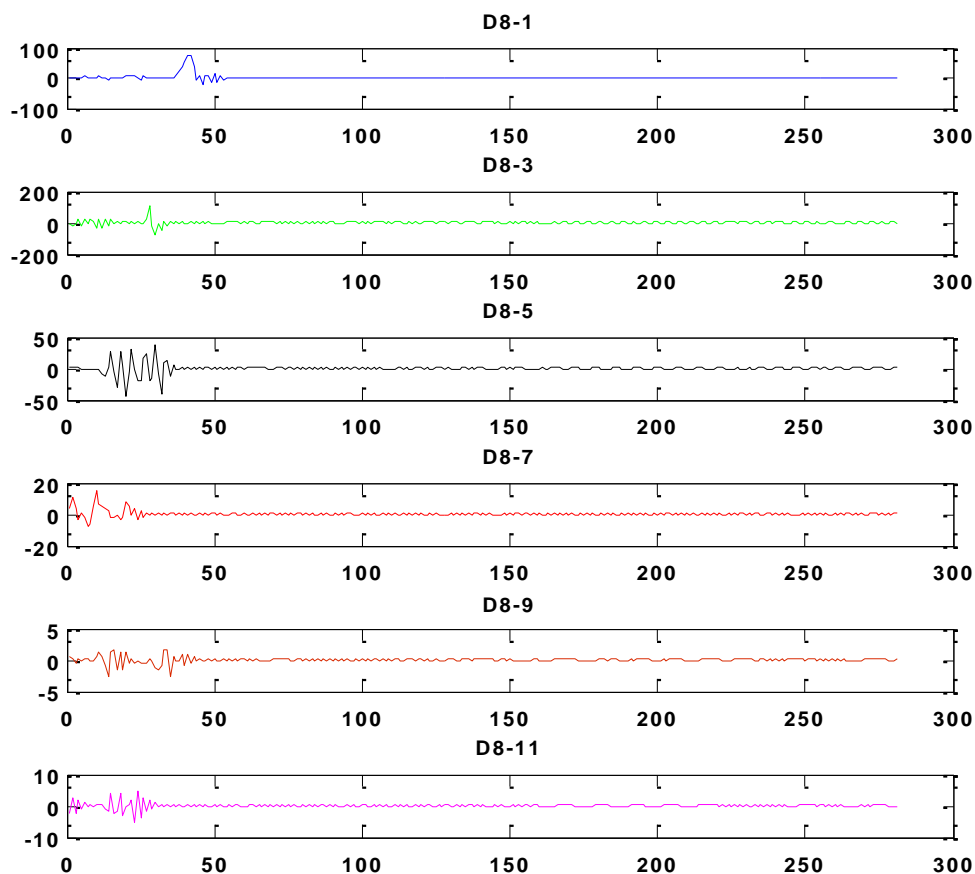


Figure III.22 : L'ondelette paquet type multi niveau du couple de la phase i_{as} en fonctionnement sain en charge

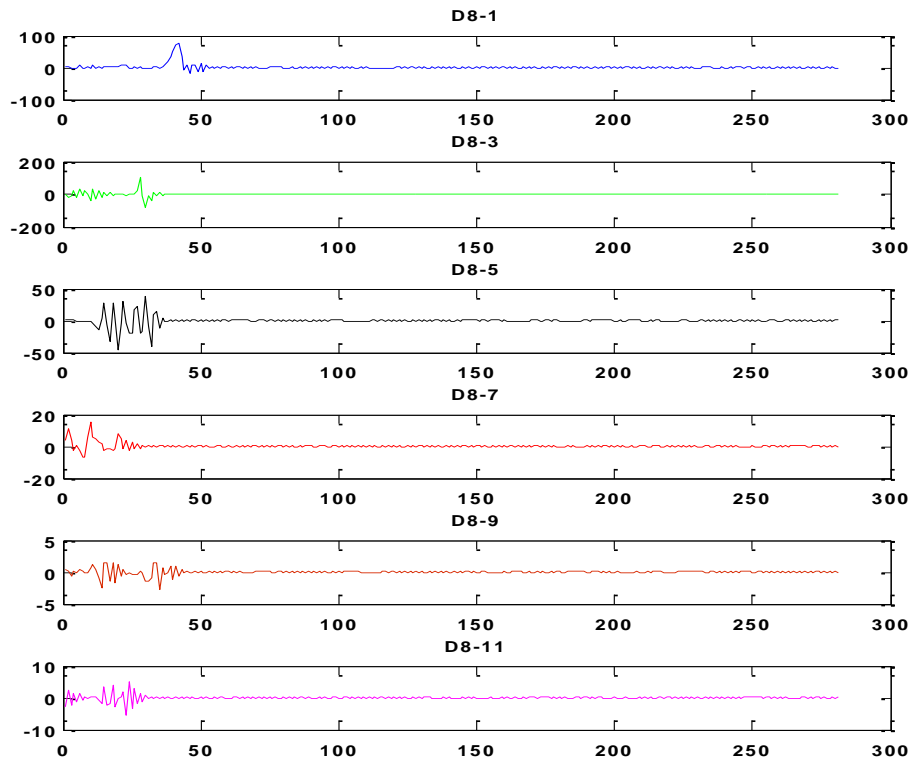


Figure III.23 : L'ondelette paquette type multi niveau du couple de la phase i_{as} avec défaut d'une barre (1) cassée au rotor

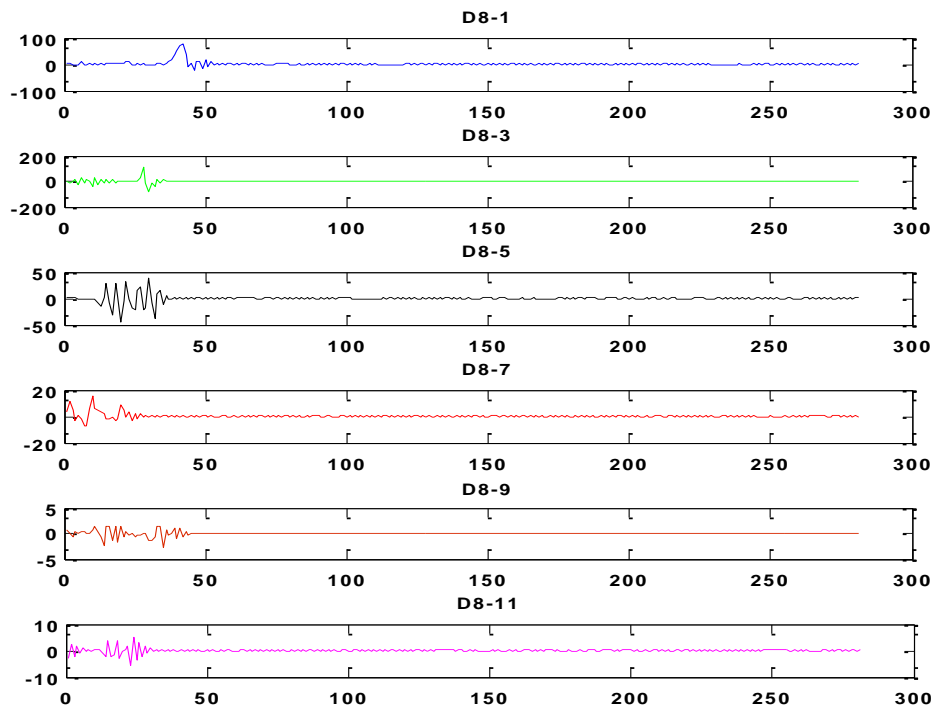


Figure III.24 : L'ondelette paquette type multi niveau du couple de la phase i_{as} avec défaut de deux barres (1, 2) cassées au rotor

les courbe (D8-1/ D8-3/D8-5/D8-7/D8-9/D8-11) resesentent les resultats Ostens a

partir de analyser la courbe D8 , il est obtenu dans l'analyse précédente , par lequel nous avons trouvé le changement dans chaque l'un des cas étudiés pour que nous essayions de comparer l'état normal du moteur , et dans le cas d'une cassure des barres.

On observe l'absence de perturbation dans la courbe (D8-1) mais dans le cas d'une cassure de la première barre , il remarque la courbe (D8-3) la disparition de la vibration, dans le cas d'une cassure des deux barres (premier et deuxième) il remarque la disparition de la vibration dans la courbe (D8-3/D8-9).

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de la simulation de cage d'un moteur asynchrone triphasé dans divers systèmes d'exploitation de santé et lorsqu'il y a une cassure de ses barres rotoriques.

Après avoir étudié et simulé le moteur et extrait les différentes propriétés électriques et mécaniques et après l'avoir analysée par ondelettes, nous avons conclu que la présence d'une cassure dans les barres du rotorique qu'aux fluctuations de couple et de vitesse ainsi que le courant statorique et rotorique.

Mais cette analyse n'était pas suffisante, nous avons donc analysé la courbe et la présence de changement à l'ondelette par un paquet de courbes afin d'approfondir l'étude du comportement du moteur en présence d'une cassure, et nous avons remarqué que l'intensité et l'amplitude de ces oscillations augmentent ensemble, le nombre et l'emplacement de la barre rotorique, nous avons également remarqué que la durée du système augmente en même temps. Nous avons constaté que les effets de la cassure peuvent être inobservables lorsque la machine fonctionne à vide ou lorsque la charge est faible.

Lorsque nous étudions la quantité d'énergie dans la machine dans tous les cas étudiés, nous remarquons que plus le nombre de barres cassées n'est important, plus la quantité d'énergie perdue n'est importante.

Conclusion générale

Conclusion générale

En raison du développement technologique de ces dernières années dans le domaine industriel, l'intérêt des chercheurs et des ingénieurs pour le domaine de la réparation et de la maintenance des moteurs électriques a augmenté, et en raison de l'utilisation fréquente du moteur asynchrone dans le domaine industriel, il est devenu important pour les ingénieurs de trouver les moyens les plus importants de détecter.

Dans le premier chapitre, nous avons passé en revue diverses erreurs dans le moteur asynchrone pour ensuite développer un modèle mathématique pour étudier le moteur, mais ce modèle n'était pas suffisant pour bien étudier le moteur.

Dans le deuxième chapitre, nous avons étudié la transformée d'ondelettes théoriquement, où nous avons passé en revue diverses équations et fonctions ainsi que leurs types et avantages pour enfin mentionner leur importance dans le domaine du diagnostic des défauts électriques, où l'ingénieur analyse diverses caractéristiques du moteur afin d'étudier le comportement du moteur en présence d'une cassure des barres du rotoriques.

Enfin, le troisième chapitre exploite le modèle mathématique du premier chapitre afin de construire un modèle pour simuler le moteur à travers le programme MATLAB, à travers lequel nous avons obtenu diverses propriétés électriques et mécaniques dans tous les cas étudiés (la présence d'une cassure des barres du rotoriques et un état sain) pour les analyser par l'ondelette paquette afin de les étudier et de connaître les changements les plus importants dans le comportement du moteur nous avons extrait les courbes de puissance du moteur dans tous les cas étudiés, où nous avons constaté que la présence d'une cassure des barres entraîne une perte d'énergie, et plus le nombre de des barres rotoriques cassées, plus la quantité d'énergie perdue.

Enfin, nous concluons qu'une cassure des barres du rotoriques provoque des vibrations dans les courbes de vitesse, de couple électromagnétique et de courant électrique et une perte significative de l'énergie du moteur au fil du temps, c'est-à-dire une diminution de son rendement.

Reference
bibliographie

REFERENCE BIBLIOGRAPHIES

- [1] : KHATIR ABDELFAH « Etude comparative des modèles des machines asynchrones utilisés en diagnostic des défauts» Thèse de Magister, Université Ferhat Abbas –Sétif UFAS(Algérie), Soutenu 11 / 04 / 2009.
- [2] : KHATRAOUI ABDERREZAK, ZAID MANSOUR «Diagnostic Des Machines Asynchrones Triphasées», Thèse de MASTER ACADEMIQUE, UNIVERSITE Echahid Hamma Lakhdar D'El-oued soutenu en Mai 2017.
- [3] : LABIOD LAID, BOUTADJINE FARES « Diagnostic des défauts rotoriques des machines asynchrones (Résultats expérimentaux et de simulation) » Thèse de MASTER ACADEMIQUE, UNIVERSITE Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued soutenu Juin 2019
- [4] : KADRINE Abderrahmane « Utilisation du Courant Statorique pour la Détection Des Défauts dans les Machines Electriques » Thèse de MASTER ACADEMIQUE, UNIVERSITE Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued soutenu EN 25- 05 -2016
- [5] : A. H. Bonnett and G. C. Soukup, "Analysis of Rotor Failures in Squirrel-Cage Induction Motors", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 24, No. 6, November/December 1988, pp.1124-1130.
- [6]: A. H. Bonnett and G. C. Soukup, "Cause and Analysis of Stator and Rotor Failures in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28, No 4, July/August 1992, pp. 921-937.
- [7] : M. Sahraoui, "Contribution au Diagnostic d'une Machine Asynchrone Triphasée Cage", Mémoire de Magistère, Université de Biskra, Algérie, 2003.
- [8] : Y. Han, Y. H. Song, "Condition Monitoring Techniques for Electrical Equipment – A Literature Survey", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 1, January 2003, pp. 4-13.
- [9] : J. R. Cameron and al. "Vibration and Current Monitoring for Detecting Airgap

Eccentricity in Large Induction Motors", IEE Proceedings, Vol. 133, Pt. B, No. 3, May 1986, pp. 155-163.

[10] : BENNEDJAI SOUMAYA «Contribution à l'amélioration de la sûreté d'exploitation des moteurs à induction», Thèse Présentée en vue de l'obtention du diplôme de : Doctorat université badjimokhtar Annaba, Année : 2015/2016.

[11] : A. M. Trzynadlowski, E. Ritchie, "Comparative Investigation of Diagnostic Media for Induction Motors : A Case of Rotor Cage Faults," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 47, No. 5, October 2000, pp. 1092-1099.

[12] : R. Maier, "Protection of Squirrel-Cage Motor Utilizing Instantaneous Power and Phase Information", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28, No. 2, March/April 1992, pp. 376-380.

[13] : S. E. Legowski, A. H. M. SadrulUla, A. M. Trzynadlowski, "Instantaneous Power as Medium for the Signature Analysis of Induction Motors". IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, No.4, July/August 1996, pp. 904-909.

[14]: G.B. Kliman and J. Stein. "Methods of Motor Current Signature Analysis", Electric Machines and Power Systems, Vol. 20, No. 3, September 1992, pp. 463-474.

[15] : R. R. Schoen, T.G. Habetler, F. Kamran and R. G. Bartheld, "Motor Bearing Damage Detection Using Stator Current Monitoring", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 31, No. 6, Nov./Dec. 1995, pp. 1274-1279.

[16] : W. T. Thomson, M. Fenger, "Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults", IEEE Industry Application Magazine, July/August 2001, pp. 26-34.

[17] : M. H. Benbouzid, M. Vieira, C. Theys "Induction Motors Faults Detection and Localization Using Stator Current Advanced Signal Processing Techniques", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 14, No.1, Jan. 1999, pp. 14-22.

[18] : A. J. M. Cardoso, S. M. A. Cruz, J. F. S. Carvalho et E. S. Saraiva, "Rotor Cage

Fault Diagnosis in Three Phase Induction Motors by Park's Vector Approach", Rec. 1995 IEEE Ind. Appl. Soc. Annu. Meet. Orlando, Florida USA, Vol. I, pp. 642-646.

[19] : S. M. A. Cruz, A. J. M. Cardoso, " Rotor Cage Fault Diagnosis in Three Phase Induction Motors by Extended Park's Vector Approach", Electric Machines and Power Systems, Vol. 28, pp. 289-299, 2000.

[20] : S. Bachir, S. Tnani, J. C. Trigeassou, G. Champenois, J. S. Michel, "Diagnostic de la Machine asynchrone par Identification Paramétriques. Modélisation et Détection des Défauts Stator et Rotor", Revue Internationale de Génie Electrique, Vol. 5, No. 3-4, 2002, pp. 401-430.

[21] : F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, P. Vas, "Broken Bar Detection in Induction Machines: Comparaison Between Current Spectrum Approach and Parametre Estimation Approach", IEEE Industry Application Conference'94, vol. 1, Denver, USA, Oct. 1994, pp. 95-102.

[22] : M. S. Nait Said, M. H. Benbouzid and A. Benchaib, "Detection of Broken Bars in Induction Motors Using an Extended Kalman Filter for Resistance Sensorless Estimation", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 15, No. 1, March 2000, pp. 66-70.

[23] : BESSAM BESMA «Analyse et détection des défauts dans la machine asynchrone à basedes techniques intelligentes » Thèse de Doctorat LMD en : Automatique Univ Mohmmmed khider Biskra 02/06/2016.

[24] : HUBERT RAZIK « Le Contenu Spectral Du Courant Absorbé Par La Machine Asynchrone En Cas de Défaillance, un Etat de l'art »Faculté des Sciences, Nancy, CEDEX, juin 2002.

[25] : D. G. Dorrell, N. C. Paterson, J. F. Watson, "The Causes and Quantification of Sideband Currents for Use in Rotor Faults Detection Systems for Cage Induction Motors", ICEM'96, Vol 2, Vigo, Spain, 1996, pp. 414-419.

[26] : M. H. Benbouzid, "A Review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium For Faults Detection", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol 47, No. 5, October 2000, pp. 984-993.

[27] : R. R. Schoen, T.G. Habetler, "Effects of Time-Varying Loads on Rotor Fault Detection in Induction Machines", IEEE, Transactions on Industry Applications, Vol. 31, No. 4, July/August, 1995, pp. 900-906.

[28] : BESSOUS NOUREDDINE «Experimental Exploitation for the Diagnosis to the Induction Machine under a Bearing Fault – using MCSA» IEEE 2015.

[29] : MAGHRAOUI ABDELWAHAB, DEBOUCHA ABDELHAKIM "Diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés à cage" mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en genieelectrotechnique UNIV MOHAMED BOUDIAF DE M'SILA 2005 / 2006.

[30] : J. F. Bangura, N. A. Demerdash, "Comarison Between Characterization and Diagnosis of Broken Bars/End-Ring Connectors and Airgap Eccentricities of Induction Motors in ASD's Using a Coupled Finite Element-State Space Method", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 15, No. 1, March 2000, pp. 47-56.

[31] :A. Abed, « contribution à l'étude et au diagnostic de la machine asynchrone», thèse de doctorat, université Henri Poincaré, Nancy-1, Mars 2002.

[32] : E. Ritchie, X. Deng, T. Jokinen, "Dynamic Model of Three Phase Squirrel Cage Induction Motors with Rotor Faults", ICEM'94, Paris France, 1994, pp. 694-698.

[33] : BELHAMDI SAAD « Prise en Compte D'un Défaut Rotorique Dans la Commande d'un Moteur Asynchrone »Thèse de Magister, Université Mohamed Khider Biskra, Soutenue 2005.

[34] : ALLAL ABDERRAHIM «Grandeurs non invasives pour le diagnostic des machines asynchrones » Thèse de Magister en Electrotechnique Univ FERHAT ABBAS –SETIF

05/05/2010.

[35] : BENHAMED ABDELGHANI, BRIK ABDESSATTAR «Diagnostic des défauts rotoriques du moteur asynchrone triphasé par l'utilisation du modèle multi-enroulements», Mémoire de Fin d'Études En vue de l'obtention du diplôme de MASTER ACADEMIQUE, Université EchahidHamma Lakhdar D'El-oued, soutenu en Mai 2017.

[36] : H. A. Toliyat, T. A. Lipo, " Transient Analysis of Cage Induction Machines Under Stator, rotor bars and end – ring Faults", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol 10, N°6, June 1995, pp. 241-247.

[37] : I. Kerszenbaum, C. F. Landy, "The Existence of Large Inter – Bar Currents in Three Phase Squirrel Cage Motors with Rotor – Bar and/or End – Ring Faults", IEEE Transactions on Power Apparatus and System, Vol 103, n°7, July 1984, pp 1854-1862.

[38] : A. Abed, L. Baghli, H. Razik, A. Rezzoug, "Modelling Induction Motors for Diagnostic Purposes", EPE'99 – Lausanne, 1999.

[39] : M. SAHRAOUI, SE. ZOUZOU, A. MENACER, A. ABOUBOU et A. DERGHAL «diagnostic des défauts dans les moteurs Asynchrones triphasés a cage» partie i : modèle Dédié à la simulation des ruptures de barres, courrier du savoir – N°05, Juin 2004, pp. 09-16, Laboratoire de Modélisation des Systèmes Energétiques Département d'Electrotechnique. Université Mohamed KHIDER BP 145, Biskra. Algérie. 200

[40] : H. Keskes, A. Brahama, Z. Lachiri “Broken rotor bar diagnosis in induction machines through stationary waveletpacket transform and multiclass wavelet SVM ” Electric Power Systems Research, Vol 97, pp:151– 157,2013.

[41] : R.Yan, R.X.Gao, X.Chen “Wavelets for fault diagnosis of rotary machines: A review with applications” Signal Processing. Vol 96,pp: 1–15, 2014.

[42] : Chargée de cours à l'Université de Liège, Gembloux Agro-Bio Tech (Unité de Statistique, Informatique et Mathématiques appliquées à la bioingénierie).

- [43] : S. Mallat. A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation. IEEE Trans. on Pattern and Machine Intelligence, 11(7):674–693, 1989.
- [44] : Transformée de Fourier Andrei Doncescu DISCO LAAS CNRS Cours EDSYS 2005.
- [45] : M. Misiti, Y. Misiti, G. Oppenheim, J.M. Poggi “ Wavelet Toolbox for use with MATLAB ” by The MathWorks, 2002.
- [46] : Jonas Gomes, Luiz Velho “From Fourier Analysis to Wavelets” Instituto de Matematica Pura e Aplicada Estrada Dona Castorina, 110 22460-320, Brazil, 1999.
- [47] : D. Gabor “Theory of communication Part 1: The analysis of information” Electrical Engineers - Part III: Radio and Communication Engineering, IEEE Journal of the Institution, Vol 93, N° 26 IEEE, pp: 429–441, 1946.
- [48] : T. Genossar, M. Porat “Can one evaluate the Gabor expansion using Gabor’s iterative algorithm” IEEE Trans on signal processing, Vol.40, No.8, pp : 1852-1861, 1992.
- [49] : S. Mallat “A wavelet tour of signal processing” a Harcourt science and technology company Elsevier (USA), 1999.
- [50] : H-G. Stark “Wavelets and signal processing” University of Applied Sciences, ISBN 3- 540-23433-0, Springer, Germany, 2005.
- [51] : Z.K. Peng, F.L. Chu “Application of the wavelet transform in machine condition monitoring and fault diagnostics: a review with bibliography” Mechanical Systems and Signal Processing journal. Vol.18, pp:199–221, 2004.
- [52] : Brinis Loubna Ondelettes et analyse multir’esolution Mémoire présenté en vue de l’obtention du Diplôme : MASTER en Mathématiques UNIVERSIT... MOHAMED KHIDER, BISKRA Algérie.
- [53] : SAMIA BOURDIM Contribution au diagnostic des générateurs utilisés dans les systèmes éoliens Présentée pour l’obtention du diplôme de DOCTORAT en SCIENCES en Électrotechnique Université Hadj Lakhdar Batna Algérie.

Reference bibliographies

[54] : R. Polikar “The story of wavelets” Rowan University, 1994.

[55] : Michel Misiti, Yves Misiti, « Les ondelettes et leurs applications ». Edition Hermes, Paris 2003.

Annexes

Annexes

P : puissance nominale	450 w
V : tension nominale de linge	127 v
f_s : Fréquence d'alimentation	50Hz
p : nombre de pair de pole	1
D : diamètre moyen	75mm
l : longueur	60mm
e : épaisseur d'entrefer	0.38mm
N_r : Nombre de barre	27
N_s : Nombre de spire par phase	193
r_s : Résistance d'une phase statorique	4.1π
L_{sf} : Résistance de fuite statorique	17.5Mh
R_b : Résistance d'une barre rotorique	$74\mu\Omega$
R_e : Résistance d'un anneau de court-circuit	$74\mu\Omega$
L_b : Inductance de fuite d'une barre rotorique	$0.33\mu\text{H}$
L_e : Inductance de fuite d'anneau de court-circuit	$0.33\mu\text{H}$
J : moment d'inertie	$4.5 \times 10^{-3} \text{Nms}^2$
k_0 : Coefficient de frottement	$5 \times 10^{-6} \text{Nms}$