



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Électrotechnique
Commande électrique

Réf. :

Présenté et soutenu par :

GUEHAIZ Mohamed Al amine

Le : Samedi 6 juillet 2019.

Diagnostic de défaut de barres cassées dans la machine asynchrone à cage par l'utilisation de la transformation en ondelette.

Jury :

Dr. LAALA Widad	MCB	Université de Biskra	Encadreur.
Dr. HADRI Hamida Amel	MCA	Université de Biskra	Président.
Dr. SAHRAOUI Mohamed	MCA	Université de Biskra	Examineur.



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Électrotechnique
Commande électrique

Présenté et soutenu par :

GUEHAIZ Mohamed El amine.

Le : Samedi 6 juillet 2019.

Diagnostic de défaut de barres cassées dans la machine asynchrone à cage par l'utilisation de la transformation en ondelette.

Présenté par :

GUEHAIZ Mohamed El amine

Avis favorable de l'encadreur :

Dr. LAALA Widad *signature*

Avis favorable du Président du Jury

Dr. HADRI Hamida Amel

Signature

Cachet et signature

Résumé

La machine asynchrone à cage devient actuellement l'élément clé de la plupart des équipements industriels, du fait de sa robustesse et son faible coût. Malgré ces avantages, un certains nombres de contraintes de natures très différentes peuvent affecter la durée de vie de cette machine, en occasionnant des pertes économiques considérables. Ceci impose la mise en œuvre d'un système de surveillance.

La surveillance est un moyen pour garantir le bon fonctionnement d'une installation industrielle. Le diagnostic qui est une partie de la surveillance, a pour objectif de détecter et de localiser un défaut, d'une façon précoce, avant qu'il ne conduise à une défaillance totale de l'installation industrielle.

Ce travail rentre dans le cadre de diagnostic des défauts de cassure de barres rotoriques dans les moteurs asynchrones triphasés à cage. Dans ce mémoire, une analyse spectrale de la puissance du MAS a été présentée à l'aide de la transformation de Fourier rapide (TFR). Afin de remédier les problèmes posé par la (TFR), nous avons utilisé une deuxième technique qui est la transformation en ondelettes (TO). Cette dernière nous a permet d'identifié et de diagnostiquer le défaut de cassure de barres en faible charge. Les résultats obtenus sont satisfaisants.

Mots-clés:

- Machine asynchrone à cage.
- Surveillance.
- Diagnostic.
- Défauts.
- Transformée de Fourier rapide (TFR).
- Transformée en ondelettes (TO).
- Cassure de barres rotoriques.

- ملخص -

أصبحت الآلة اللآمتزامنة حاليًا العنصر الرئيسي لغالبية المنشآت الصناعية بسبب متانتها وتكلفتها المنخفضة. على الرغم من هذه المزايا يمكن أن تؤثر العديد من الأسباب ذات الطبيعة المختلفة جدًا على عمر هذه الآلة ، مما يتسبب في خسائر اقتصادية كبيرة للمنشأة الصناعية ، ولذلك يجب تنفيذ نظام المراقبة لحمايتها.

المراقبة هي وسيلة لضمان حسن سير المنشأة الصناعية ، فالغرض من التشخيص الذي هو جزء من المراقبة هو اكتشاف وتحديد الخلل في وقت مبكر ، قبل أن يؤدي إلى فشل تام للمنشأة الصناعية.

يندرج هذا العمل في نطاق تشخيص اعطاب انكسار القضبان في محركات القفص اللآمتزامنة ثلاثية الطور. على هذا القول ، تم تقديم تحليل طيفي لقدرة هذه المحركات باستخدام التحويل الخاص بفوريي السريع (TFR) فمن أجل معالجة المشكلات التي طرحت استخدمنا تقنية ثانية هي التحويل الموجي (TO) ، هذه الأخيرة سمحت لنا بتحديد وتشخيص فشل انكسار القضبان عند التحميل المنخفض. النتائج التي تحصلنا عليها مرضية.

الكلمات المفتاحية :

- آلة القفص اللآمتزامنة.
- المراقبة.
- التشخيص.
- الأعطاب.
- التحويل الخاص بفوريي السريع (TFR) .
- التحويل الموجي (TO) .
- انكسار القضبان.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à ceux qui ont passés leur vie rêvant de voir ce jour-ci, à ceux qui mon entourés d'amour et de tendresse, à:

Au la fleur de ma vie... ma très chère mère en témoignage de ma profonde et ma grande reconnaissance pour sa tendresse, sa patience, son sacrifie tout au long de mes études.

Mon honorable et très cher père qui a sacrifié sa vie qu'on puisse se trouver à ce niveau et qui m'a été source de réussite.

Au mes très chers frères

Au ma très cher sœur

A toute ma famille

A mes très chers amis.

A tous mes professeurs.

A tous ceux qui m'ont nourri de leur savoir et à ceux avec qui je partage de bons souvenirs.

Remerciements

Avant tout je remercie ﷻ qui m'a donné le courage, la patience, l'aide et la volonté de réaliser ce modeste travail dans le stage.

*Je tiens à remercier vivement notre encadreur **Mme. LAALA Widad** qui a sacrifié un grand effort afin de me permettre de mener à bien le présent travail et à qui j'exprime ma gratitude et mon respect.*

*Nous remercions aussi les membres de jury, **Mme. HADRI Hamida Amel** et **Mr. SAHRAOUI Mohamed**. Qui nous ont fait l'honneur d'accepter de juger notre travail.*

Mes remerciements aux enseignants du département d'électrotechnique.

Enfin, je ne serai terminé sans exprimer mes remerciements à ma famille et mes amis.

Liste des tableaux

Tableau I.1	Quelques défauts des machines électriques selon leurs origines.....	10
Tableau III.1	Quelques familles d'ondelette	42
Tableau III.2	Bandes fréquentielles des signaux de décomposition.....	60
Tableau III.3	L'énergie pour l'état sain	63
Tableau III.4	L'énergie pour une barre cassée	64
Tableau III.5	L'énergie pour deux barres cassées	64
Tableau III.6	L'énergie pour trois barres cassées.....	64

Liste des figures

Figure I.1 : Types de maintenance	4
Figure I.2 : Éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil	6
Figure I.3 : Stator du moteur asynchrone	7
Figure I.4 : Stator en cours de bobinage.....	7
Figure I.5 : Dessin structurel de rotor à cage.....	8
Figure I.6 : Dessin réel de rotor à cage.....	8
Figure I.7 : Les composants de paliers	8
Figure I.8 : Image pour l'action de panne	9
Figure I.9 : Carter de moteur asynchrone à cage d'écureuil.....	11
Figure I.10 : Défaut entre spire	12
Figure I.11 : Défaut entre enroulement	12
Figure I.12 : Défaut des conducteurs (cassure des barres)	13
Figure I.13 : Vue de roulement défectueuse (billes écorchées).....	14
Figure I.14 : Représentation temporelle vers fréquentielle	17
Figure II.1 : Structure multi-enroulements du rotor	20
Figure II.2 : Structure adoptée pour modéliser le stator	21
Figure II.3 : Circuit équivalent d'un rotor à cage d'écureuil.....	22
Figure II.4 : La fonction définissant la $i^{ème}$ maille rotorique.....	26
Figure II.5 : Courants statoriques du MAS à l'état sain en régime permanent avec forte charge.....	33
Figure II.6 : Le courant statorique (i_a) du MAS à l'état sain avec forte charge.....	33
Figure II.7 : La vitesse de rotation du MAS à l'état sain avec forte charge.....	34
Figure II.8 : Le couple électromagnétique du MAS à l'état sain avec forte charge	34
Figure II.9 : Le courant statorique (i_a) du MAS pour une barre cassée avec forte charge	35
Figure II.10 : La vitesse de rotation du MAS pour une barre cassée avec forte charge	35
Figure II.11 : Le couple électromagnétique du MAS pour une barre cassée avec forte charge	36

Figure II.12 : Le courant statorique (i_a) pour deux barres cassées avec moyenne charge	36
Figure II.13 : La vitesse de rotation du MAS pour deux barres cassées avec moyenne charge	37
Figure II.14 : ..Le couple électromagnétique du MAS pour deux barres cassées avec moyenne charge.....	37
Figure II.15 : Le courant statorique (i_a) du MAS pour trois barres cassées avec faible charge	38
Figure II.16 : La vitesse de rotation du MAS pour trois barres cassées avec faible charge ...	38
Figure II.17 : Le couple électromagnétique du MAS pour trois barres cassées avec faible charge.....	39
Figure III.1 : Représentation temporelle vers ondelettes	41
Figure III.2 : Arbre de décomposition d'un signal en quatre niveaux.....	48
Figure III.3 : La puissance pour l'état sain avec forte charge	49
Figure III.4 : Les variations de la puissance du MAS pour différentes barres cassées avec forte charge	49
Figure III.5 : Les variations de la puissance du MAS pour différentes barres cassées avec moyenne charge.....	50
Figure III.6 : Les variations de la puissance du MAS pour différentes barres cassées avec faible charge	50
Figure III.7 : Graphique des changements d'amplitude de la puissance du MAS pour différents défauts avec différentes charges	51
Figure III.8 : Spectre de courant statorique (i_a) à l'état sain avec fort charge	51
Figure III.9 : Spectre de courant statorique (i_a) pour une barre cassée avec forte charge.....	52
Figure III.10 : Spectre de courant statorique (i_a) pour deux barres cassées avec forte charge	52
Figure III.11 : Spectre de courant statorique (i_a) pour trois barres cassées avec forte charge	53
Figure III.12 : Spectre (avec zoom) du courant statorique (i_a) pour différentes barres cassées avec forte charge	53
Figure III.13 : Spectre (avec zoom) du courant statorique (i_a) pour différentes barres cassées avec moyenne charge.....	54

Figure III.14 : Spectre (avec zoom) du courant statorique (ia) pour différentes barres cassées avec faible charge	54
Figure III.15 : Spectre de la puissance du MAS à l'état sain avec forte charge.....	55
Figure III.16 : Spectre de la puissance du MAS pour une barre cassée avec forte charge	55
Figure III.17 : Spectre de la puissance du MAS pour deux barres cassées avec forte charge	56
Figure III.18 : Spectre de la puissance du MAS pour trois barres cassées avec forte charge	56
Figure III.19 : Graphique de l'amplitude de l'harmonique de défaut pour différentes barres cassées avec forte charge	57
Figure III.20 : Spectre (avec zoom) de la puissance du MAS pour différentes barres cassées avec forte charge	57
Figure III.21 : Spectre (avec zoom) de la puissance du MAS pour différents barres cassées avec moyenne charge.....	58
Figure III.22 : Spectre (avec zoom) de la puissance du MAS pour différents barres cassées avec faible charge.....	58
Figure III.23 : Spectre (avec zoom) du la puissance du MAS pour une barre cassée avec différentes charges.....	59
Figure III.24 : Spectre (avec zoom) du la puissance du MAS pour deux barres cassées avec différentes charges.....	59
Figure III.25 : Spectre (avec zoom) du la puissance du MAS pour trois barres cassées avec différentes charges.....	60
Figure III.26 : Signaux d'approximation et de détails de la puissance du MAS à l'état sain avec forte charge	61
Figure III.27 : Signaux d'approximation et de détails de la puissance du MAS pour une barre cassée avec forte charge.....	61
Figure III.28 : Signaux d'approximation et de détails de la puissance du MAS pour deux barres cassées avec moyenne charge	62
Figure III.29 : Signaux d'approximation et de détails de la puissance du MAS pour des trois barres cassées avec faible charge	62
Figure III.30 : Énergie de détails pour l'état sain et défectueux avec faible charge	63
Figure III.31 : Les énergies de l'ensemble des signaux de détail d10, d11 et d12 dans l'état sain et l'état défectueux avec différentes charges	64

Liste des Abréviations

f_b	: Fréquence caractéristique du défaut de barres.	(Hz)
f_s	: Fréquence d'alimentation statorique.	(Hz)
f_e	: Fréquence d'échantillonnage.	(Hz)
K	: Constante.	
g	: Glissement.	
i	: Courant électrique.	(A)
i_{d_s}	: Courant longitudinal statorique.	(A)
i_{q_s}	: Courant transversal statorique.	(A)
T	: Période d'échantillonnage.	
N	: Points.	
R_{bk}	: Résistance d'une barre rotorique k .	(Ω)
L_{bk}	: Inductance de fuite d'une barre rotorique k .	(H)
R_{ak}	: Résistance du segment d'anneau de court-circuit k .	(Ω)
L_{ak}	: Inductance de fuite du segment d'anneau de court-circuit k .	(H)
i_{bk}	: Courant circulant dans la barre rotorique k .	(A)
i_{ak}	: Courant dans le segment d'anneau de court-circuit k .	(A)
j_{rk}	: Courant circulant dans la boucle rotorique k .	(A)
$j_{r_{cc}}$: Courant circulant dans l'anneau de court-circuit.	(A)
$[V_s]$: Tension statorique.	(V)
$[R_s]$: Résistance statorique.	(Ω)
$[I_s]$: Courant statorique.	(A)
$[\psi_s]$: Flux statorique.	(Web)
$[J_r]$: Courant de boucle rotorique.	(A)

$[L_s]$: Inductance propre statorique.	(H)
$[R_r]$: Résistance rotorique.	(Ω)
$[L_r]$: Inductance propre de magnétisation de fuite et mutuelle de chaque boucle rotorique.	(H)
$[\psi_r]$: Flux rotorique.	(Web)
$[M_{rs}]$: Inductance mutuelle entre les $(N_r + 1)$ boucle rotorique et les trois phases	(H)
$[M_{sr}]$: Inductance mutuelle.	(H)
θ	: La position du rotor par rapport au stator.	
θ_r	: L'angle électrique du rotor.	($^\circ$)
α_r	: L'angle électrique entre deux barres adjacentes.	($^\circ$)
φ	: La position angulaire le long de la surface intérieure du stator.	
$g^{-1}(\varphi, \theta)$: La fonction inverse de l'entrefer.	
N_j	: La fonction de l'enroulement i .	
N_s	: Nombre de spires par phase.	
N_r	: Le nombre de barres.	
L_m	: Mutuelle inductance entre une phase statorique et une maille rotorique.	(H)
μ_0	: La perméabilité magnétique de l'entrefer.	
r	: Rayon moyen de l'entrefer.	(m)
e	: L'épaisseur de l'entrefer.	(m)
l	: Longueur du rotor.	(m)
C_e	: Couple électromagnétique.	(N.m)
C_r	: Couple résistance.	(N.m)
f_v	: Coefficient de frottement.	
J_T	: Moment d'inertie totale des parties tournant.	(Kg.m ²)
$[X]$: Vecteur d'états.	
$[u]$: Vecteur contenant les grandeurs externes à la machine.	
$\psi(t)$: Fonction de l'ondelette mère.	
a	: Facteur d'échelle.	

b	:	Facteur de translation.
d_j	:	Signaux de détail.
a_n	:	Signaux d'approximation.
l_d	:	Nombre de décompositions.
$E(a_n)$		Énergie de signal de l'approximation.
$E(d_j)$		Énergie de signal de détails.
TFR	:	Transformée de Fourier rapide.
FFT	:	Fast Fourier transformé.
$TFFG$		Transformée de Fourier à fenêtre glissante.
TO	:	Transformée en ondelettes.
TOD	:	Transformée en Ondelette Discrète.
TOC	:	Transformée en Ondelette Continue.
FIR	:	Finité Impulse Réponse.

Sommaire

Introduction générale	1
------------------------------------	----------

Chapitre I : État de l'art.

I.1 Introduction.....	4
I.2 Définitions.....	4
I.2.1 La maintenance	4
I.2.1.1 But de la maintenance	4
I.2.1.2 Types de la maintenance.....	4
I.2.2 La surveillance	5
I.2.3 Le diagnostic	6
I.3 Constitution de moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil.....	6
I.3.1 Le stator	7
I.3.2 Le rotor	7
I.3.3 Les paliers	8
I.4 Le défaut.....	9
I.5 La défaillance.....	9
I.6 La panne	9
I.7 La Supervision	9
I.7.1 La détection.....	9
I.7.2 La localisation	9
I.7.3 La décision	10

I.8	Quelques défauts des machines électriques selon leurs origines	10
I.9	Les défaillances du moteur asynchrone	10
I.9.1	Les défaillances statoriques	10
I.9.1.1	Défaillances du Carter	11
I.9.1.2	Défaillances de la boîte à bornes.....	11
I.9.1.3	Défaillances du circuit magnétique	11
I.9.1.4	Défaillances des conducteurs.....	12
I.9.2	Les défaillances rotoriques	12
I.9.2.1	Défaillances du circuit magnétique	12
I.9.2.2	Défaillances de conducteurs (cassure des barres)	12
I.9.2.3	Défaillances de l'arbre	13
I.9.2.4	Défaillances du ventilateur	14
I.9.3	Les défaillances des paliers.....	14
I.9.3.1	Défaillances des roulements à billes	14
I.9.3.2	Défaillances du du flasque.....	14
I.10	Quelques méthodes du diagnostic	15
I.10.1	Diagnostic par l'analyse des vibrations mécaniques.....	15
I.10.2	Diagnostic par l'analyse du flux magnétique axial de fuite	15
I.10.3	Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites.....	15
I.10.4	Diagnostic par l'analyse du couple électromagnétique.....	15
I.10.5	Diagnostic par l'analyse du courant statorique.....	16
I.10.6	Diagnostic par l'analyse du vecteur de Park	16
I.11	Quelques techniques de traitement de signal utilisée dans le diagnostic	16
I.11.1	Transformée de Fourier rapide (TFR)	16
I.11.2	Transformée de Fourier à fenêtre glissante (TFFG).....	17
I.11.3	Transformée en ondelettes (TO)	18
I.12	Conclusion.....	18

Chapitre II : Modélisation du MAS à l'état sain et défectueux.

II.1 Introduction	20
II.2 Modèle multi-enroulements	20
II.2.1 Hypothèses simplificatrices	20
II.2.2 Structure du stator	21
II.2.3 Structure du rotor	22
II.3 Équations différentielles associées	23
II.3.1 Équations électriques du stator	23
II.3.2 Équations électriques du rotor.....	27
II.3.3 Équation mécanique	30
II.3.4 Système d'équations global	31
II.4 Modélisation de défaut de cassure de barres rotoriques	32
II.5 Résultats de simulation du moteur asynchrone	33
II.5.1 A l'état sain avec forte charge.....	33
II.5.2 A l'état défectueux pour différentes barres cassées avec différentes charges	35
II.5.2.1 A l'état défectueux pour une barre cassée avec forte charge.....	35
II.5.2.1 A l'état défectueux pour deux barres cassées avec moyenne charge.....	36
II.5.2.1 A l'état défectueux pour trois barres cassées avec faible charge.....	38
II.6 Conclusion	39

Chapitre III: Application de la technique des ondelettes au diagnostic de cassure de barres.

III.1 Introduction	41
III.2 Transformée en ondelettes (TO)	41
III.2.1 Transformée en ondelette continue (TOC)	41

III.2.1.1	Définition	41
III.2.1.2	Adaptabilité en temps et en fréquence.....	43
III.2.1.3	Atomes temps-fréquence	43
III.2.1.4	Résolution temps-échelle.....	44
III.2.2	Transformée en ondelette discrète (TOD)	45
III.3	Les avantages de la transformation en ondelettes	47
III.4	Décomposition en multi-niveaux du signal	48
III.5	Application de la technique de traitement de signal utilisé au diagnostic	48
III.5.1	La puissance du MAS à l'état sain avec forte charge.....	49
III.5.2	La puissance du MAS à l'état défectueux pour différentes barres cassées avec différentes charges	49
III.6	Application de la transformation de Fourier rapide (TFR)	51
III.6.1	Spectre de courant statorique (ia) du MAS.....	51
III.6.2	Spectre de la puissance du MAS	55
III.7	Application de la transformation en ondelettes discrète (TOD)	60
III.7.1	Signaux d'approximation et de détails de la puissance du MAS	60
III.8	Énergie des signaux de détails	63
III.9	Conclusion.....	65
	Conclusion générale.....	66
	Bibliographie	67
	Annexe	72

Introduction générale

Durant ce dernier siècle, l'accroissement optimal de la compétitivité mondiale en matière de production dans un contexte international très concurrentiel a poussé les industriels à chercher comment assurer et à maîtriser la disponibilité et la sûreté de fonctionnement de leurs outils de production. Ces exigences en matière de sûreté de fonctionnement ont fait émerger une nouvelle science de l'ingénieur qui est la surveillance des équipements industriels. Cette dernière englobe la détection et le diagnostic des défaillances. La détection d'une défaillance a pour but principal d'améliorer et d'augmenter la disponibilité des systèmes afin de réduire les coûts de la maintenance et d'éviter un arrêt brusque de la production. Par contre le diagnostic de défauts a pour rôle la localisation (déterminer quelle partie du système est affectée) et l'identification de ce défaut (quantification du défaut). Actuellement le domaine de diagnostic est devenu un outil essentiel de la maintenance corrective et par conséquent, les entreprises équipées par des systèmes de surveillance ont tendance de plus en plus à automatiser la procédure de maintenance.

La machine asynchrone, de par sa construction, est la machine la plus robuste et la moins chère du marché. Cette machine est largement utilisée dans la plupart des entraînements électriques dans plusieurs domaines industriels, notamment pour des applications à vitesse constante ou à vitesse variable. Comme toute autre machine, la machine asynchrone n'est pas à l'abri d'un dysfonctionnement. Elle peut être affectée par des défauts électriques ou mécaniques au niveau du stator, ou du rotor, ou les deux en même temps. Les causes des défauts peuvent être dues à un simple problème de fabrication ou à une utilisation non conforme de la machine. Parfois le milieu dans lequel la machine est utilisée peut être responsable de la détérioration de la machine (milieu corrosif, milieu chimique,...). De ce fait, un arrêt brusque dû à une anomalie quelconque peut engendrer des pertes financières (pertes de production, la remise en état de l'outil de production, les retards de livraison) et matériels inévitables. Par conséquent, il est recommandé de détecter de façon précoce un défaut afin d'y remédier dans des délais les plus brefs et minimiser les effets induits (arrêt d'une chaîne de production, pertes de produits, etc...). Ceci a poussé la majorité des industriels à doter leurs

chaînes de production par des systèmes sophistiqués de détection et de diagnostic de défauts. Ces deux dernières fonctions ont pour objectif d'une part l'amélioration de la sécurité des êtres humains et des biens et d'autre part l'augmentation des gains de productivité résultant de l'accroissement de la disponibilité des équipements et d'une gestion efficace des opérations de maintenance. Un système de surveillance n'a pas pour vocation de remplacer l'homme mais pour l'aider dans sa prise de décision finale [1].

Le travail de ce mémoire rentre dans le cadre de diagnostic, il présente la détection des défauts rotorique dans la machine asynchrone triphasée à cage. Les techniques de traitement de signal utilisé dans ce manuscrit sont la transformation de Fourier rapide (TFR) et la transformation en ondelettes (TO). Pour mener cette étude en terme, le mémoire est structuré en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous allons présenter les éléments constitutifs de ce type de machine, suivi de quelques définitions de la maintenance et ses types. Ensuite, nous allons exposer les différents types des défauts de la machine asynchrone associés par quelques méthodes de diagnostic.

Le deuxième chapitre, sera consacré à la simulation du modèle dédié au diagnostic de cassure de barres rotoriques de la machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil connu par le modèle multi-enroulement.

Pour le troisième chapitre, est destiné à l'application de la technique des ondelettes (TO) au diagnostic de défaut rotorique.

Finalement, nous clôturons ce travaille par une conclusion.

CHAPITRE I

ÉTATS DE L'ART

I.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons commencer par présenter certaines notions de base concernant les activités de maintenance et diagnostic puis, nous exposerons brièvement les différents constituants de la machine asynchrone à cage, tout en évoquant les divers défauts qui peuvent affectés ces constituants. Enfin, nous étalerons les méthodes les plus usitées en diagnostic [2].

I.2 Définitions

I.2.1 La maintenance

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

I.2.1.1 But de la maintenance

Le but de la maintenance peut être classé en deux types :

a) Objectifs financiers

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

b) Objectifs opérationnels

- Maintenir l'équipement dans les meilleures conditions possibles.
- Assurer la disponibilité maximale de l'équipement à un prix minimum.
- Augmenter la durée de vie des équipements.

I.2.1.2 Types de la maintenance

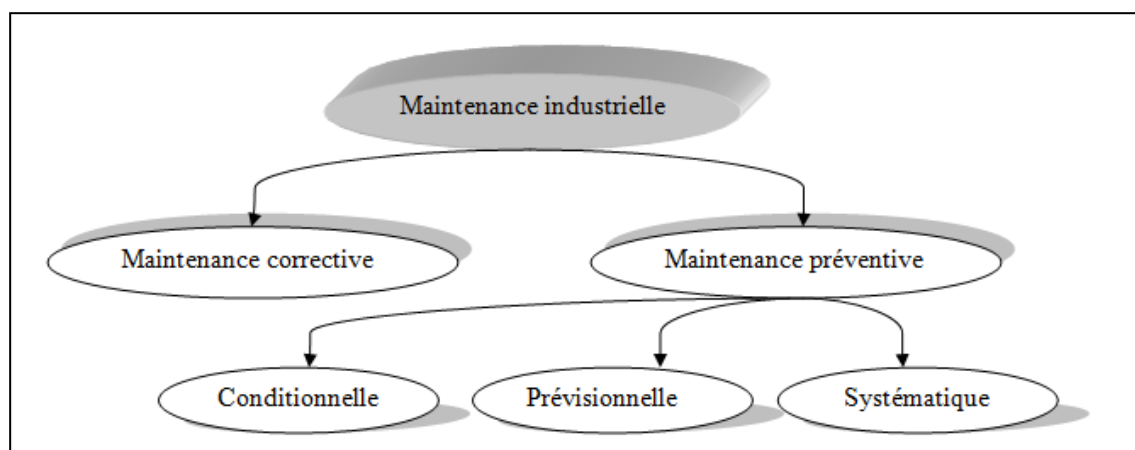


Figure I.1 Types de maintenance.

Il y a deux grandes classes de la maintenance :

- a) Maintenance corrective.
- b) Maintenance préventive : c'est aussi classées à trois classes :
 - ✓ Systématique.
 - ✓ Conditionnelle.
 - ✓ Prévisionnelle.

a) La Maintenance corrective

Qui vise à intervenir à la suite de pannes, cela ne veut pas dire que toutes ces pannes n'ont pas été prévisibles, ce type de maintenance sera facilité par une bonne maintenabilité (aptitudes à maintenir ou à rétablir un dispositif, dans un état, lui permettant d'accomplir sa fonction), il pourra permettre d'améliorer la fiabilité globale en analysant les problèmes rencontré en contrôle techniques ou cercles de qualité ou avec les constructeurs [3].

b) La maintenance préventive

Ce type de maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance. Elle doit permettre d'éviter les défaillances des équipements au cours de l'utilisation. La mise en pratique de ce type de maintenance nécessite la décomposition des sous-systèmes en composants (roulement, circuit magnétique, etc...) [2].

1. La maintenance préventive systématique

Ce type de maintenance comprend l'ensemble des actions destinées à restaurer, en totalité ou partiellement, la marge de résistance des matériels non défaillants. Ces tâches sont décidées en fonction du temps ou de la production, sans considération de l'état des matériels à cet instant [4].

2. La maintenance préventive conditionnelle

La maintenance préventive conditionnelle définit comme " une maintenance préventive subordonnée à un type d'événement prédéterminé (auto diagnostic, information d'un capteur, Mesure d'une usure, révélateur de l'état de dégradation du bien) "

3. La maintenance préventive prévisionnelle (prédictive)

Maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien.

I.2.2 La surveillance

La surveillance industrielle des moteurs est une technique qui éviter la machine en panne tel que la surveillance est analyse l'état du système et fournit des indicateurs, il consiste

deux parties principale, la première est la détection et classer les défaillances avec observation de l'évolution du système et la deuxième est le diagnostic, ce dernier est localisant les éléments défaillants et en identifiant les causes.

I.2.3 Le diagnostic

Le diagnostic est l'identification de la cause probable de la (ou des) défaillance(s) à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test [5].

Les deux principales tâches de diagnostic sont : la détection et la localisation des défauts. La détection consiste à signaler l'existence du défaut, tandis que la localisation a pour objet d'identifier le type de défaut. Donc, le diagnostic a pour objectif de détecter d'une manière précoce un défaut avant qu'il conduise à une défaillance totale dans l'installation industrielle [2].

I.3 Constitution de moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil

La machine asynchrone comprend un stator et un rotor, constitués de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements. Le stator est fixe, on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor est monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieur ou sont fermés sur eux mêmes en permanence, on définit deux types de rotor, bobiné ou à cage d'écureuil. Toutefois, nous admettons que la structure du rotor à cage est électriquement équivalente à celle du rotor bobiné dont les enroulements sont en court-circuit [6].

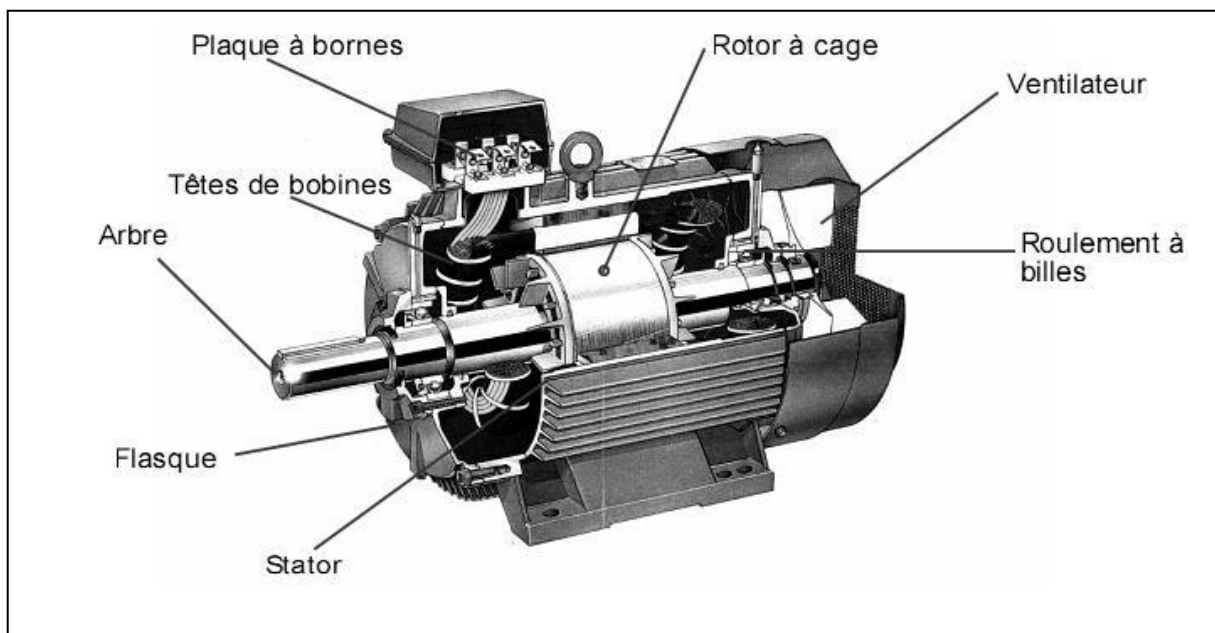


Figure I.2 Éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil [7].

I.3.1 Le stator

Les différents types de moteurs asynchrones ne se distinguent que par le rotor, dans tous les cas le stator reste, au moins dans son principe, le même. C'est une partie fixe, où est connecté l'alimentation électrique. Il est composé de cinq éléments :

- Carter.
- Boite à bornes.
- Circuit magnétique.
- Conducteurs.
- Isolants.

Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilement de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine. Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines. Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer, le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobine permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant la circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre. L'objectif est d'obtenir à la surface de l'entrefer une distribution de courant la plus sinusoïdale possible, afin de limiter les ondulations du couple électromagnétique [8].

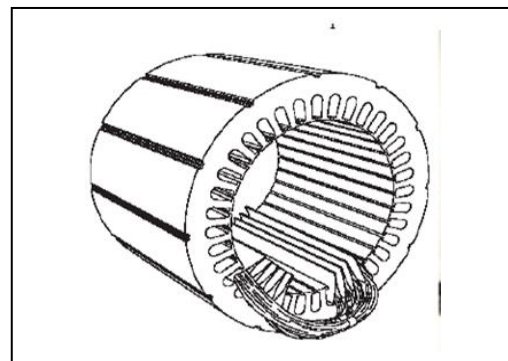


Figure I.3 Stator du moteur asynchrone [9]. **Figure I.4** Stator en cours de bobinage [10].

I.3.2 Le rotor

Dans le rotor à cage, la partie mobile. De manière générale, le rotor est le siège de grandeurs électromagnétiques variables. Il est composé de quatre éléments :

- Circuit magnétique.
- Conducteurs.
- Arbre.
- Ventilateur.

Alors les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche (barres rotoriques) à l'autre. Ces barres conductrices sont régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor. Cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilés sur l'arbre de la machine analogue à celui du moteur à rotor bobiné. Dans le cas de rotors à cage d'écureuil, les conducteurs sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre préformées et frettées dans les tôles du rotor. Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite dans les tôles soient négligeables, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre [6], [11].

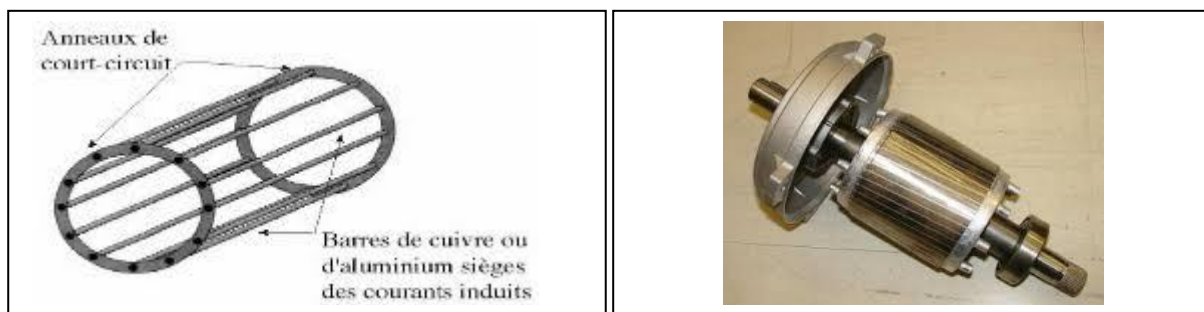


Figure I.5 Dessin structurel de rotor à cage [12]. **Figure I.6** Dessin réel de rotor à cage [13].

I.3.3 Les paliers

Les paliers, qui permettent de supporter et de mettre en rotation l'arbre rotorique. Ils sont constitués de deux composants :

- Flasques.
- Roulement à billes [2].

Les flasques moulés en fonte sont fixés sur le carter statorique grâce à des boulons ou des tiges de serrage. L'ensemble ainsi établi constitue alors la machine asynchrone à cage d'écureuil [14].



Figure I.7 Les composants de paliers [15], [16], [17].

I.4 Le défaut

Le concept de défaut est fondamental dans les opérations de surveillance pour la conduite et maintenance des procédés industriels. On appelle défaut tout écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et la caractéristique théorique. Cet écart est idéalement nul en l'absence de défaut.

I.5 La défaillance

Une défaillance est l'altération ou la cessation de l'aptitude d'un ensemble à accomplir sa ou ses fonctions requises avec les performances définies dans les spécifications techniques. Une défaillance est un dysfonctionnement du système, le processus présente alors un fonctionnement inacceptable du point de vue des performances. Il est clair qu'une défaillance implique l'apparition d'un défaut puisqu'il existe un écart entre la caractéristique mesurée et théorique. Par contre, un défaut n'implique pas nécessairement une défaillance puisque le dispositif peut très bien continuer à assurer sa fonction principale.

I.6 La panne

Une panne est l'inaptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise. Une panne résulte toujours d'une défaillance et d'un défaut (Figure I.8).

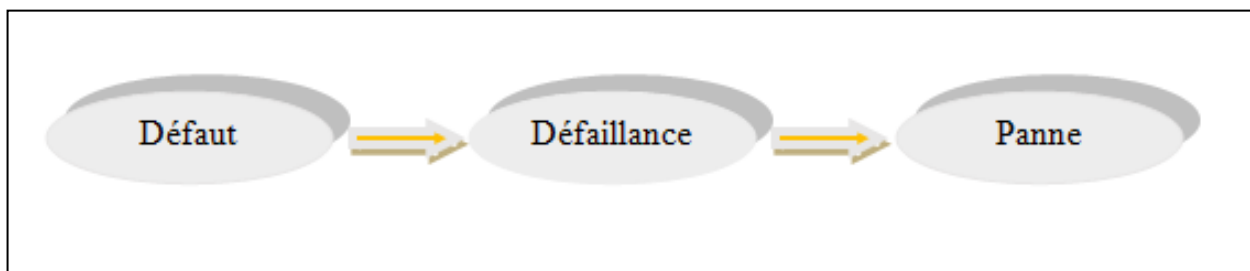


Figure I.8 Image pour l'action de panne.

I.7 La Supervision

La supervision comporte trois fonctions : la détection, la localisation et la décision.

I.7.1 La détection

La détection consiste à reconnaître qu'un dispositif est dans un mode de dysfonctionnement à partir de la connaissance de certaines caractéristiques.

I.7.2 La localisation

La localisation détermine les causes physiques ou fonctionnelles d'une panne.

I.7.3 La décision

Elle consiste en premier lieu à décider quel est le mode de fonctionnement dans lequel on désire placer le dispositif. Ils' agir de définir précisément quelles sont les actions à entreprendre pour atteindre ce mode.

I.8 Quelques défauts des machines électriques selon leurs origines

Tableau I.1 Quelques défauts des machines électriques selon leurs origines.

Défaillance des machines électriques	Interne	Mécanique	Contact entre le rotor et le stator.
			Défaut de roulements.
			Excentricité.
			Mouvement des enroulements et des tôles.
		Electrique	Défaillance au niveau de l'isolation
			Rupture de barre
	Défaillance au circuit magnétique.		
	Externe	Mécanique	Charge oscillante.
			Surcharge de la machine.
			Défaut de montage.
		Electrique	Fluctuation de la tension.
			Sources de tension déséquilibrées.
			Réseau bruité.
		Environnementales	Humidité.
			Température.
Propreté.			

I.9 Les défaillances du moteur asynchrone

Bien que le moteur asynchrone à cage d'écureuil soit réputée robuste, elle peut parfois présenter différents types de défauts. Ces défauts peuvent être soit d'origine électrique, soit d'origine mécanique [18].

I.9.1 Les défaillances statoriques

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator :

I.9.1.1 Défaillances du Carter

Elles sont généralement dues à :

- Positionnement avec un décentrage du carter sur le bâti.
- Mauvaise fabrication (si les bords du carter ne sont pas usinés correctement, les flasques sont alors décentrés par rapport à l'axe de symétrie).

En plus, si les ailettes de refroidissement (sur la surface du carter) sont sous dimensionnées, à cause d'une conception erronée, la machine risque une élévation anormale de sa température au cours du fonctionnement [2].

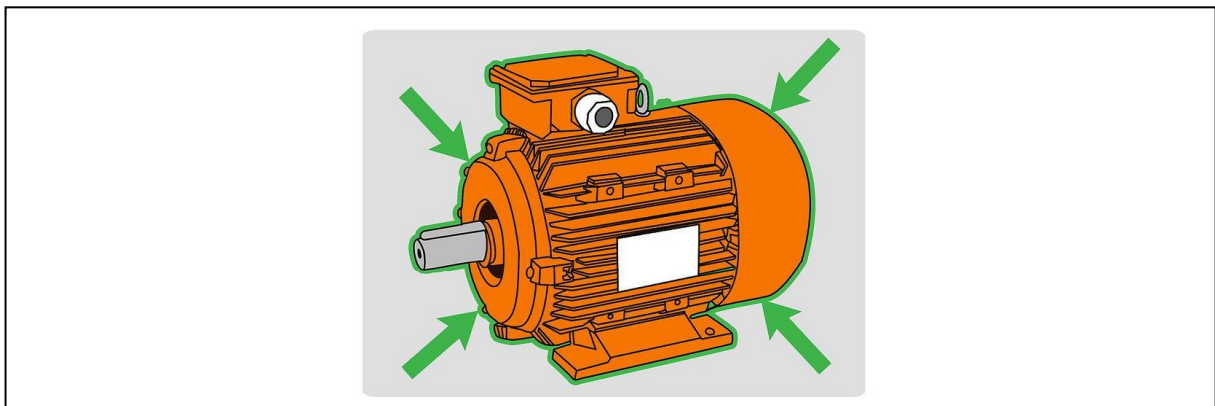


Figure I.9 Carter de moteur asynchrone à cage d'écureuil [19].

I.9.1.2 Défaillances de la boîte à bornes

Les vibrations excessives de différentes origines peuvent conduire à un desserrement des boulons de la boîte à bornes, ce qui mène à une rupture d'une phase en cours de fonctionnement. La contamination par des corps étrangers (poussière, graisse,...), peut aussi induire un arc entre les prises de connexion. Il en résulte une rupture d'une phase ou un court-circuit entre les phases [2].

I.9.1.3 Défaillances du circuit magnétique

Les tôles du circuit magnétique sont normalement isolées entre elles, toutefois elles peuvent être accidentellement se court-circuitées. Ce défaut peut avoir comme origine :

- Un court-circuit des conducteurs qui peut également provoquer un échauffement local intense dans les tôles.
- Les corps étrangers projetés dans l'entrefer peuvent entraîner l'abrasion des tôles et causer des courts-circuits.
- Un défaut sévère d'excentricité statique et/ou dynamique peut conduire à un contact franc entre le stator et le rotor, ce qui pourra détruire le circuit magnétique [2].

I.9.1.4 Défaillances des conducteurs

Les courts-circuits entre spires ou bobines sont les défauts les plus nuisibles et les plus rencontrés au niveau du stator. Ils proviennent souvent d'une dégradation du matériau isolant recouvrant les conducteurs. Cette dégradation est due principalement à un échauffement anormal dans le bobinage. Le courant, dans les spires court-circuitées, atteint des valeurs énormes et l'augmentation de la température qui en suit entraîne la destruction de tous les isolants et par conséquent la défaillance complète de la machine [20].



Figure I.10 Défaillance entre spire [21].



Figure I.11 Défaillance entre enroulement [22].

I.9.2 Les défaillances rotoriques

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du rotor.

I.9.2.1 Défaillances du circuit magnétique

Comme dans le stator, dû généralement à une excentricité statique et/ou dynamique. Il en résulte la création de points chauds. Ces derniers peuvent engendrer des ruptures de barres ou de segments d'anneaux de court-circuit [2].

I.9.2.2 Défaillances de conducteurs (cassure des barres)

La rupture des barres rotorique d'une machine asynchrone est un des défauts les plus couramment étudiés, en raison de sa simplicité de réalisation. Ce défaut induit des modifications dans les courants statorique et entraîne donc l'apparition d'harmonique caractéristiques dans le spectre de ce signal. En effet, lors du défaut d'une rupture de barre, des harmoniques de flux sont produites et induisent des harmoniques de courant dans l'enroulement statorique aux fréquences autour de la fréquence fondamentale f_s telles que [23]:

$$f_b = (1 \pm 2 \cdot K \cdot g) * f_s \quad (I.1)$$

Tel que : $K = (1,2,3,\dots,\dots, \text{etc})$.

g : Le glissement et f_s : La fréquence caractéristique du défaut de barres.

Ce défaut est dû à :

Un nombre important de démarrages successifs ce qui induit des courants énormes dans les barres rotoriques :

- Une excentricité statique et/ou dynamique, le rotor sera soumis à différentes forces qui tendent à faire sortir les barres des encoches.
- La dilatation puis la contraction répétée dans les barres rotoriques.

Une rupture de barres conduit à de fortes oscillations dans le couple et la vitesse accompagnées par des vibrations et des bruits excessifs ainsi qu'une augmentation de la température dans les barres adjacentes de la barre rompue [2].

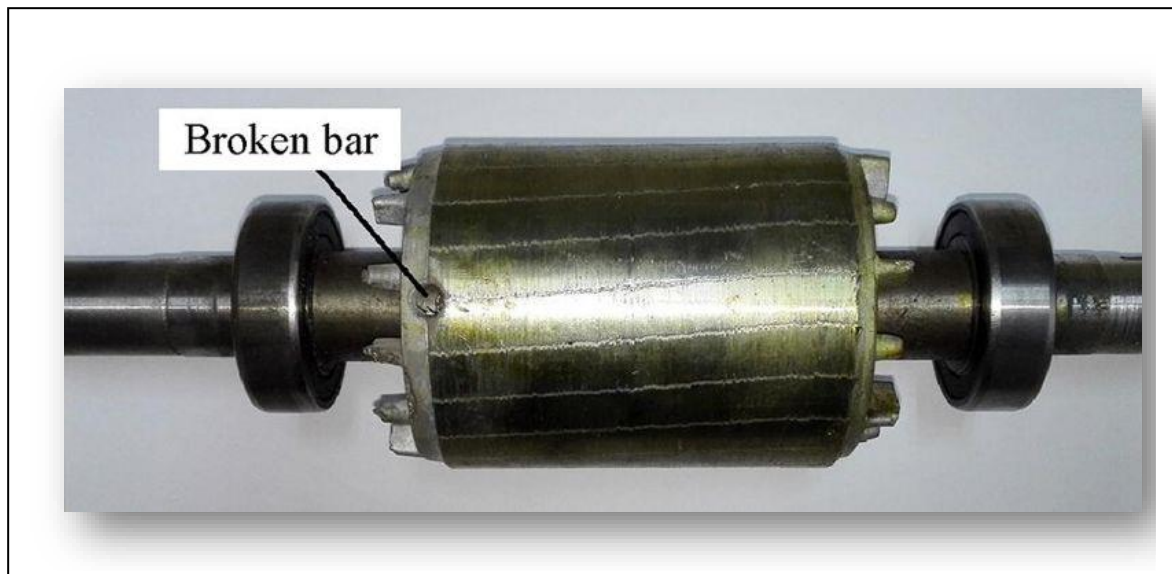


Figure I.12 Défaut des conducteurs (cassure des barres) [24].

I.9.2.3 Défaillances de l'arbre

L'arbre de la machine peut laisser paraître une fissure due à l'utilisation d'un mauvais matériau lors de sa construction. A court ou long terme, cette fissure peut mener à une fracture nette de l'arbre provoquant ainsi un arrêt irrémédiable de la machine asynchrone. Les milieux corrosifs peuvent aussi affaiblir la robustesse de l'arbre de la machine. Par exemple, l'humidité peut provoquer des microfissures et conduire à une destruction complète de la machine. Une excentricité statique, dynamique ou mixte peut induire des efforts considérables sur l'arbre moteur, amenant ainsi une fatigue supplémentaire. Une analyse vibratoire, une analyse par ultrason, une analyse fréquentielle des courants absorbés ou simplement une analyse visuelle de l'arbre de la machine permet de détecter ce type de défaillance [18].

I.9.2.4 Défaillances du ventilateur

Si le ventilateur n'est pas correctement fixé sur l'arbre ou s'il comporte un nombre de pales casées, on aboutit à une augmentation anormale de la température de la machine [2].

I.9.3 Les défaillances des paliers

I.9.3.1 Défaillances des roulements à billes

Les roulements à billes jouent un rôle très important dans tout type de machines électriques tournantes. D'une manière générale, toute insertion en force des roulements à billes sur l'arbre, est susceptible de créer des indentations sur les surfaces de contact, voire une fracture directe. Le champ axial peut induire des courants électriques qui vont circuler au niveau des roulements à billes, ce qui accélère leur détérioration. En plus, la graisse qui permet la lubrification et la bonne rotation des roulements peut, dans certains cas, se rigidifier et causer une résistance à la rotation [2].



Figure I.13 Vue de roulement défectueuse (billes écorchées) [25].

I.9.3.2 Défaillances du flasque

Les défauts créés par les flasques de la machine asynchrone sont le plus généralement causés à l'étape de fabrication. En effet, un mauvais positionnement des flasques provoque un désalignement des roulements à billes, ce qui induit une excentricité au niveau de l'arbre de la machine. Il est possible de détecter ce type de défaillance par une analyse vibratoire ou une analyse harmonique des courants absorbés par la machine [26].

I.10 Quelques méthodes de diagnostic

I.10.1 Diagnostic par l'analyse des vibrations mécaniques

L'analyse vibratoire de la machine asynchrone peut être menée grâce à des accéléromètres placés sur les paliers dans les directions verticales, axiales et radiales. Les vibrations de la machine fournissent des informations sur pratiquement tous les défauts fréquemment rencontrés, notamment ceux mécaniques [27].

Cependant, ces analyses vibratoires comportent certains inconvénients [28] :

- Problème d'accessibilité.
- Difficultés rencontrées dans les connexions mécaniques des accéléromètres pour effectuer les mesures nécessaires au voisinage direct du défaut.

De plus, le coût de ces capteurs reste relativement élevé par rapport aux autres capteurs tels que les capteurs de vitesse ou de courant.

I.10.2 Diagnostic par l'analyse du flux magnétique axial de fuite

La présence d'un défaut quelconque, provoque un déséquilibre électrique et magnétique au niveau du stator et du rotor ce qui affecte la répartition des du champ magnétique dans et hors la machine. Plusieurs auteurs se sont penchés à l'exploitation du flux axial. En fait, si on place une bobine autour de l'arbre de la machine, elle sera le siège d'une force électromotrice induite. Le contenu spectral de cette tension induite, peut être exploité pour détecter les différents défauts statoriques ou rotoriques [2].

I.10.3 Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites

Cette technique, est basée sur l'exploitation du contenu fréquentielle de la tension induite par le flux rotorique dans les enroulements statoriques, pendant la déconnexion du moteur de réseau. La rupture d'une barre va affecter directement la tension induite dans les enroulements statoriques. En utilisant cette approche, les effets de non – idéalité de la source (déséquilibres et présence des harmoniques) ainsi que la non – linéarité des caractéristiques magnétiques de la machine peuvent être évités [2].

I.10.4 Diagnostic par l'analyse du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique développé dans les machines électriques, provient de l'interaction entre le champ statorique et celui rotorique. Par conséquent, tout défaut, soit au niveau du stator ou au rotor, affecte directement le couple électromagnétique. L'analyse

spectrale du signal du couple (mesuré ou estimé), donne des informations sur l'état du moteur [29].

I.10.5 Diagnostic par l'analyse du courant statorique

L'analyse des courants statoriques dans le domaine fréquentiel reste la méthode la plus couramment utilisée car le spectre résultant contient une source de renseignement sur la majorité des défauts électriques et magnétiques pouvant apparaître au sein d'une machine asynchrone [30].

Nous savons que le suivi de l'amplitude des composantes caractéristiques de fréquence dans le spectre du courant permet de se renseigner sur l'état de la cage rotorique. Par exemple le spectre du courant statorique lorsque la machine fonctionne avec un rotor sain et un rotor défaillant (une barre cassée). Nous apercevons une nette augmentation de l'amplitude de ces composantes, ce qui traduit la présence d'un défaut au sein de la cage d'écurieil.

I.10.6 Diagnostic par l'analyse du vecteur de Park

Il y a deux versions de cette méthode : La première, utilise les grandeurs biphasées i_{ds} et i_{qs} , qui sont calculées à partir des trois courants d'alimentation, pour l'obtention de la courbe de lissajou : $i_q = f(i_d)$. Le changement de l'épaisseur et de la forme de cette courbe donne une information sur le défaut [31].

La deuxième version de cette technique est appelée l'Approche Étendue du Vecteur de Park, qui est basée sur l'analyse spectrale du module du vecteur de Park ($\sqrt{(i_d^2(t) + i_q^2(t))}$). Elle présente beaucoup d'avantages quant à la détection des défauts statoriques ou rotoriques et même les défauts de roulement. On peut trouver d'autres variantes de cette technique dans [32].

I.11 Quelques techniques de traitement de signal utilisée dans le diagnostic

I.11.1 Transformée de Fourier rapide (TFR)

Soit le signal $x(t)$ à temps continu. Si X est à énergie finie, sa transformée de Fourier à la fréquence f est la suivante [33] :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-2\pi f t} dt \quad (\text{I.2})$$

Son inverse est donnée par:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) \cdot e^{-2\pi f t} df \quad (\text{I.3})$$

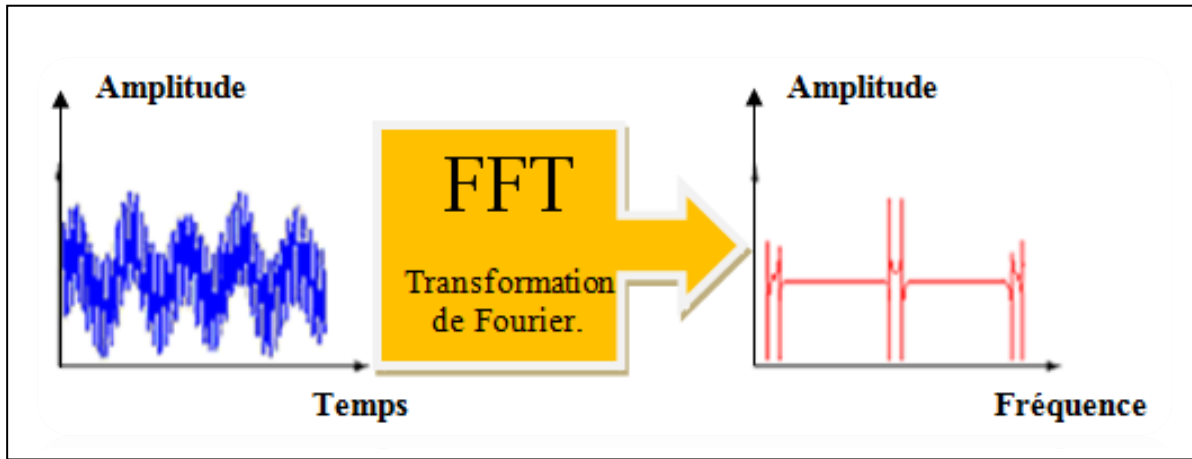


Figure I.14 Représentation temporelle vers fréquentielle.

Sa transformée de Fourier discrète de N points avec une période d'échantillonnage T est donnée par:

$$x\left(\frac{f}{NT}\right) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{k=N-1} x(kT) e^{-\frac{2\pi f kT}{NT}} \quad (\text{I.4})$$

et sa relation inverse est donnée par :

$$x(kT) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{k=N-1} x\left(\frac{f}{NT}\right) e^{-j \frac{2\pi f kT}{NT}} \quad (\text{I.5})$$

La transformée de Fourier rapide (TFR) est un algorithme de calcul rapide de la transformée de Fourier discrète.

I.11.2 Transformée de Fourier à fenêtre glissante (TFFG)

Pour pallier le manque d'information sur le temps dans la transformation de Fourier, la TFFG est donc introduite. Cette méthode, pouvant être adaptée aux signaux non stationnaires, est très proche de l'analyse de Fourier classique. Son principe est de définir une fenêtre qui sera utilisée comme masque sur le signal, dans laquelle on considère que le signal est localement stationnaire, puis on décale cette fenêtre le long du signal afin de l'analyser entièrement [8], [36].

I.11.3 Transformée en ondelettes (TO)

La transformation en ondelettes est un outil récent de traitement de signal [9]. Son principe repose sur la décomposition d'un signal dans une base de fonctions particulières. De ce point de vue, elle est tout à fait comparable à l'analyse de Fourier [34]. Cependant, les ondelettes sont des fonctions oscillantes au sens large, rapidement amorties, contrairement aux fonctions sinusoïdales de l'analyse de Fourier. Par ailleurs, les ondelettes possèdent la propriété de pouvoir être bien localisées en temps ou en fréquence, ce qui les différencie principalement de l'analyse temps-fréquence classique [35]. Plusieurs travaux utilisent la TO pour le diagnostic de défauts dans les machines asynchrones triphasés à cage [2].

I.12 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté quelque notation et définition de base de la maintenance et ses classes ainsi que le diagnostic. D'abord, nous avons exposé les composants de moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil à savoir (stator, rotor et palier). Ensuite, nous avons étalé quelques défauts qui peuvent affecter la machine. Finalement, nous avons passé en revue quelques méthodes de diagnostic associé à quelques méthodes de traitement de signal comme (TFR, TO et TFFG).

A fin qu'on puisse appliquer des méthodes de traitement de signal cite plus haut pour le diagnostic de défaut de cassure de barres, un modèle dédié au diagnostic de barre cassée connu sous le nom de modèle multi-enroulement sera présenté dans le prochain chapitre.

CHAPITRE II

MODÉLISATION DU MAS À L'ÉTAT SAIN ET DÉFECTUEUX

II.1 Introduction

La machine asynchrone, malgré ses avantages, peut présenter des défauts structurels variés, qu'ils soient de nature mécanique, électrique ou chimique, au niveau du stator ou du rotor. Parmi ces défauts, nous pouvons citer la rupture totale ou partielle des barres rotoriques.

La mise au point d'une procédure de diagnostic, à base de modèles analytiques pour les machines asynchrones, nécessite la synthèse d'un modèle capable de tenir compte de sa structure et rendre compte du comportement transitoire de celle-ci.

Pour ce faire, il faut s'orienter vers le modèle multi-enroulements afin de pouvoir représenter individuellement les barres rotoriques pour une description mieux adaptée aux défauts.

La modélisation décrite dans ce chapitre, a pour objet de représenter les barres et les anneaux de court-circuit individuellement pour une machine asynchrone à cage [14].

II.2 Modèle multi-enroulements

II.2.1 Hypothèses simplificatrices

Pour pouvoir nous concentrer sur la simulation des ruptures de barres et d'anneaux de court-circuit, nous avons modélisé le rotor par des mailles reliées entre elles électriquement et couplées magnétiquement, elles sont formées par deux barres adjacentes et les portions d'anneaux qui les relient (figure II.1). Chaque barre et segment d'anneau sont caractérisés par une résistance et une inductance (Figure II.3) [14].

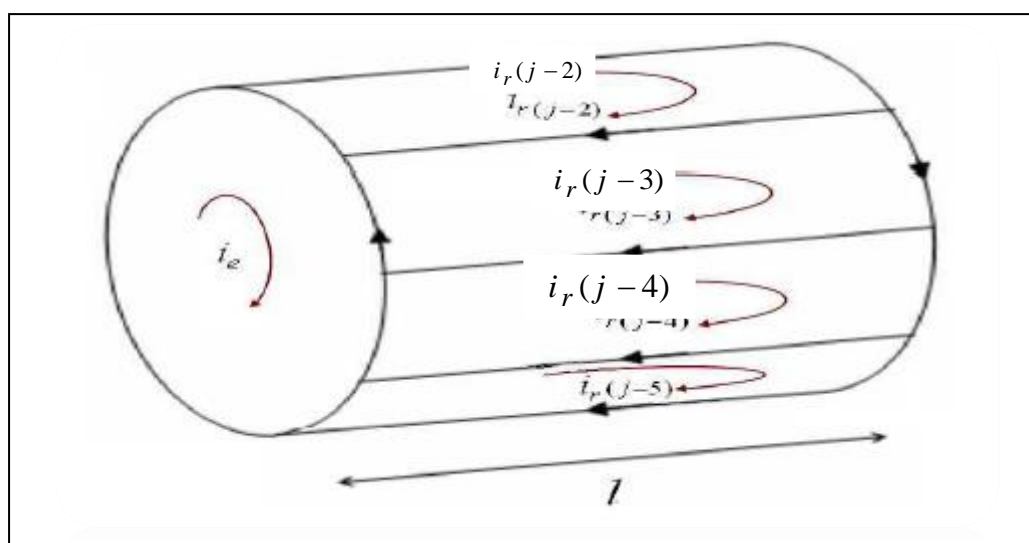


Figure II.1 Structure multi-enroulements du rotor [14].

Dans l'approche proposée, on suppose que :

1. le circuit magnétique est linéaire (perméabilité relative du fer très grande devant 1) :
Cette hypothèse permet d'introduire le concept d'inductance propre et mutuelle entre les bobinages statoriques et rotoriques.
2. l'effet de peau est négligeable.
3. les barres rotoriques sont isolées les unes des autres : cette hypothèse permet d'éliminer les courants d'inter-barres et leurs effets au sein de la cage rotorique.
4. les pertes fer de la machine, les effets capacitifs et les effets thermiques sont négligeables dans la construction du modèle de la machine asynchrone à cage d'écureuil.

Le modèle prendra en compte les harmoniques d'espace du bobinage statorique les plus importants ainsi que l'inclinaison des barres rotoriques [30].

II.2.2 Structure du stator

Le stator de la machine étudiée est un stator triphasé de m encoches statoriques. Une phase statorique est composée de plusieurs bobines logées dans les encoches du stator.

Ces bobines statoriques sont placées de sorte à obtenir une distribution de la force magnétomotrice la plus sinusoïdale possible le long de l'entrefer. La figure (II.2) donne une représentation de la modélisation choisie pour les trois phases statoriques de la machine asynchrone. La valeur des inductances est fonction du nombre de bobines ainsi que du type de bobinage mis en place dans les encoches statoriques (concentrique, imbriqué, ...), celle des résistances dépend essentiellement de la longueur, de la section et du type de cuivre utilisé [37].

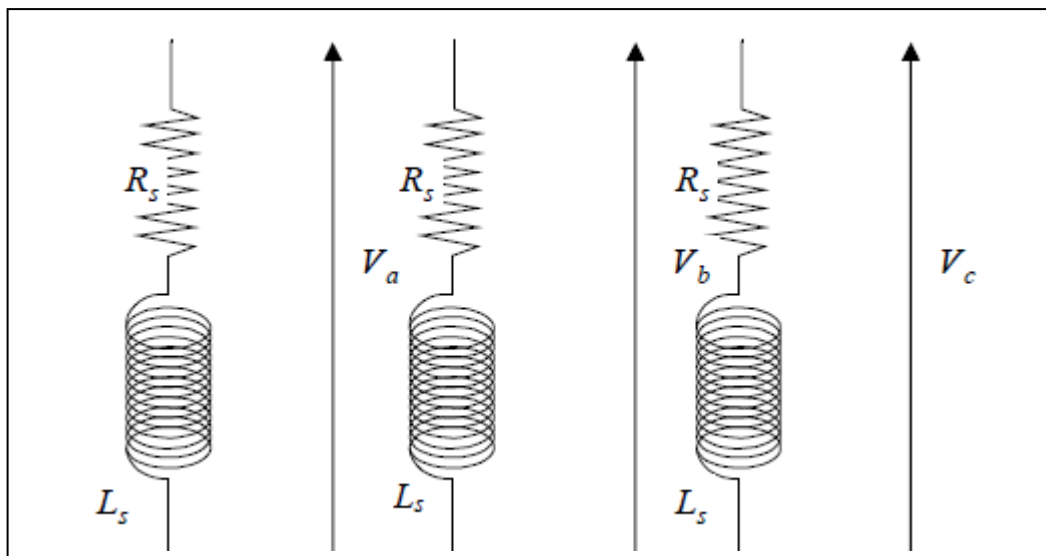


Figure II.2 Structure adoptée pour modéliser le stator [37].

II.2.3 Structure du rotor

La cage d'écuriel de la machine asynchrone se compose de N_r encoches rotoriques qui peuvent être soit ouvertes soit fermées sur l'entrefer. La cage rotorique peut se décomposer en (N_r+1) circuits électriques rotoriques indépendants. En effet, si on considère deux barres rotoriques adjacentes ainsi que les segments d'anneau de court-circuit les reliant, nous obtenons une boucle rotorique fermée qui peut être étudiée sous forme de circuit électrique. Un des anneaux de court-circuit crée par conséquent une boucle supplémentaire ce qui porte le nombre de boucles totales à (N_r+1) . On associe à chacune de ces boucles un courant, ce qui amène à calculer $(N_r + 1)$ courants rotoriques. Chaque barre rotorique est modélisée par une inductance en série avec une résistance, tout comme chaque segment d'anneau de court-circuit [38]. La figure (II.3) donne la forme des circuits électriques adoptée pour la modélisation de la cage d'écuriel rotorique. Pour permettre une compréhension adéquate du modèle de la cage d'écuriel de la machine, on nomme :

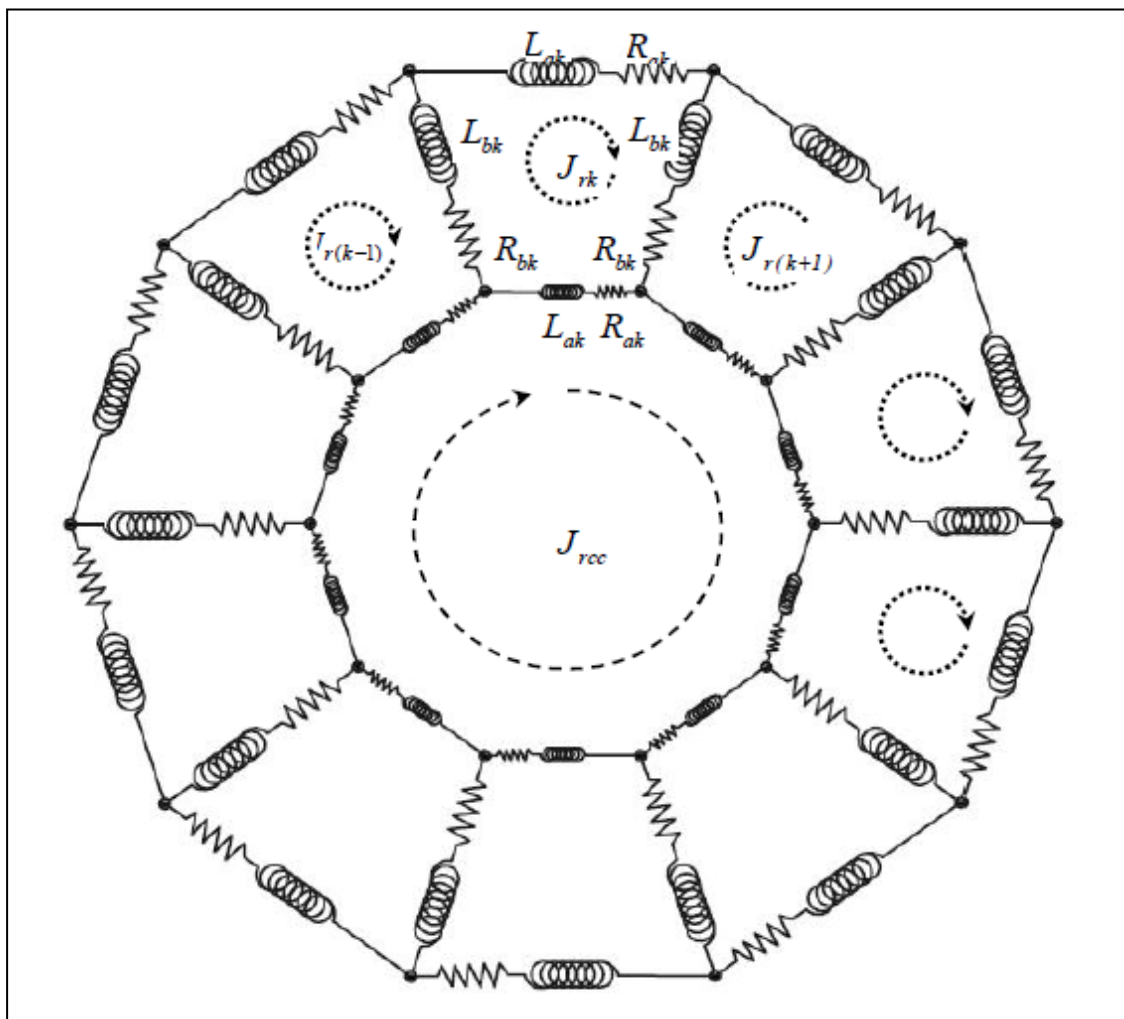


Figure II.3 Circuit équivalent d'un rotor à cage d'écuriel [37].

R_{bk} : Résistance d'une barre rotorique k .

L_{bk} : Inductance de fuite d'une barre rotorique k .

R_{ak} : Résistance du segment d'anneau de court-circuit k .

L_{ak} : Inductance de fuite du segment d'anneau de court-circuit k .

i_{bk} : Courant circulant dans la barre rotorique k .

i_{ak} : Courant dans le segment d'anneau de court-circuit k .

j_{rk} : Courant circulant dans la boucle rotorique k .

j_{rcc} : Courant circulant dans l'anneau de court-circuit.

II.3 Équations différentielles associées

II.3.1 Équations électriques du stator [37]

Ces équations différentielles vont permettre d'associer le vecteur de tension, le vecteur de courant ainsi que le vecteur de flux pour les trois phases statoriques s_a , s_b et s_c . En appliquant la loi d'Ohm sur les trois phases statoriques, on obtient:

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d[\psi_s]}{dt} \quad (\text{II.1})$$

Où $[V_s]$ représente le vecteur de tension, $[I_s]$ le vecteur de courant et $[\psi_s]$ le vecteur de flux tel que :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{s_a} \\ V_{s_b} \\ V_{s_c} \end{bmatrix}, \quad [I_s] = \begin{bmatrix} I_{s_a} \\ I_{s_b} \\ I_{s_c} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [\psi_s] = \begin{bmatrix} \psi_{s_a} \\ \psi_{s_b} \\ \psi_{s_c} \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

La matrice des résistances $[R_s]$, où sont regroupées les résistances de chacune des phases statoriques, se met sous la forme suivante :

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_{s_a} & 0 & 0 \\ 0 & R_{s_b} & 0 \\ 0 & 0 & R_{s_c} \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

$[R_s]$: Vecteur de résistance statorique.

Les trois phases statoriques sont non seulement couplées magnétiquement entre elles mais également avec les circuits électriques rotoriques. Par conséquent, les courants de boucles rotoriques notés ici $[J_r]$ interviennent dans les équations des trois flux statoriques comme le montre l'équation (II.4).

$$[\psi_s] = [L_s][I_s] + [M_{sr}][J_r] \quad (\text{II.4})$$

La matrice inductance $[L_s]$ se compose des inductances propres, de magnétisation, de fuites et mutuelles des trois phases statoriques. Elle peut se mettre sous la forme :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{s_a s_a} & M_{s_a s_b} & M_{s_a s_c} \\ M_{s_b s_a} & L_{s_b s_b} & M_{s_b s_c} \\ M_{s_c s_a} & M_{s_c s_b} & L_{s_c s_c} \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

Telque :

$$\begin{cases} L_{s_a s_a} = L_{m_{s_a s_a}} + L_{f_{s_a s_a}} \\ L_{s_b s_b} = L_{m_{s_b s_b}} + L_{f_{s_b s_b}} \\ L_{s_c s_c} = L_{m_{s_c s_c}} + L_{f_{s_c s_c}} \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

$L_{m_{s_i s_i}}$: Inductance de magnétisation des enroulements statoriques.

$L_{f_{s_i s_i}}$: Inductance de fuite statorique.

$M_{s_i s_j} = -L_{m_{s_i s_j}} / 2$: L'inductance de magnétisation pour un enroulement ayant N_s

spires par phase est donnée par :

$$L_{m_{s_i s_j}} = \frac{\mu \cdot l \cdot r}{g} \cdot N_s^2 \cdot \frac{\pi}{4} \quad (\text{II.7})$$

La matrice des inductances mutuelles $[M_{sr}]$ entre les trois phases statoriques et les (N_r+1) boucles rotoriques se met sous la forme matricielle suivante :

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} M_{s_a r_1} & M_{s_a r_2} & \cdots & M_{s_a r_k} & \cdots & M_{s_a r_{N_r}} & M_{s_a r_{cc}} \\ M_{s_b r_1} & M_{s_b r_2} & \cdots & M_{s_b r_k} & \cdots & M_{s_b r_{N_r}} & M_{s_b r_{cc}} \\ M_{s_c r_1} & M_{s_c r_2} & \cdots & M_{s_c r_k} & \cdots & M_{s_c r_{N_r}} & M_{s_c r_{cc}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

Le vecteur $[J_r]$ regroupe les $(N_r + 1)$ courants de boucles rotoriques :

$$[J_r] = \begin{bmatrix} j_{r_1} & j_{r_2} & \cdots & j_{r_k} & \cdots & j_{r_{N_r}} & j_{r_\alpha} \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

Les équations des trois phases statoriques de la machine étant maintenant décrites, les équations associées aux circuits électriques de la cage rotorique sont maintenant exprimées.

La mutuelle inductance entre deux bobines quelconques i, j de la machine est calculée en supposant que la perméabilité du fer est infinie [39, 40, 41].

$$M_{s_i s_j}(\theta) = \mu_0 \cdot l \cdot r \cdot \int_0^{2\pi} g^{-1}(\varphi, \theta) \cdot N_i(\varphi, \theta) \cdot N_j(\varphi, \theta) d\varphi \quad (\text{II.10})$$

Avec :

θ : La position du rotor par rapport au stator.

φ : La position angulaire le long de la surface intérieure du stator.

$g^{-1}(\varphi, \theta)$: La fonction inverse de l'entrefer, dans le cas où l'entrefer est constant et petit par rapport au rayon du stator, la fonction est constante et égale à $(1/g)$.

$N_j(\varphi, \theta)$: La fonction de l'enroulement i , elle représente la distribution spatiale de la force magnétomotrice le long de l'entrefer pour un courant unitaire circulant dans l'enroulement i .
Si l'entrefer est uniforme et très petit par rapport au rayon de rotor, la fonction inverse $g^{-1}(\varphi, \theta)$ devient simplement une constante, et peut être pris hors de l'intégrale. Dans ce cas, pour trouver l'inductance mutuelle, il faut définir les fonctions d'enroulements.

Les fonctions d'enroulements statoriques sont:

$$\begin{aligned} N_a &= \frac{N_s}{2} \cos(\theta) \\ N_b &= \frac{N_s}{2} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ N_c &= \frac{N_s}{2} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (\text{II.11})$$

La fonction définissant la $i^{\text{ème}}$ maille rotorique :

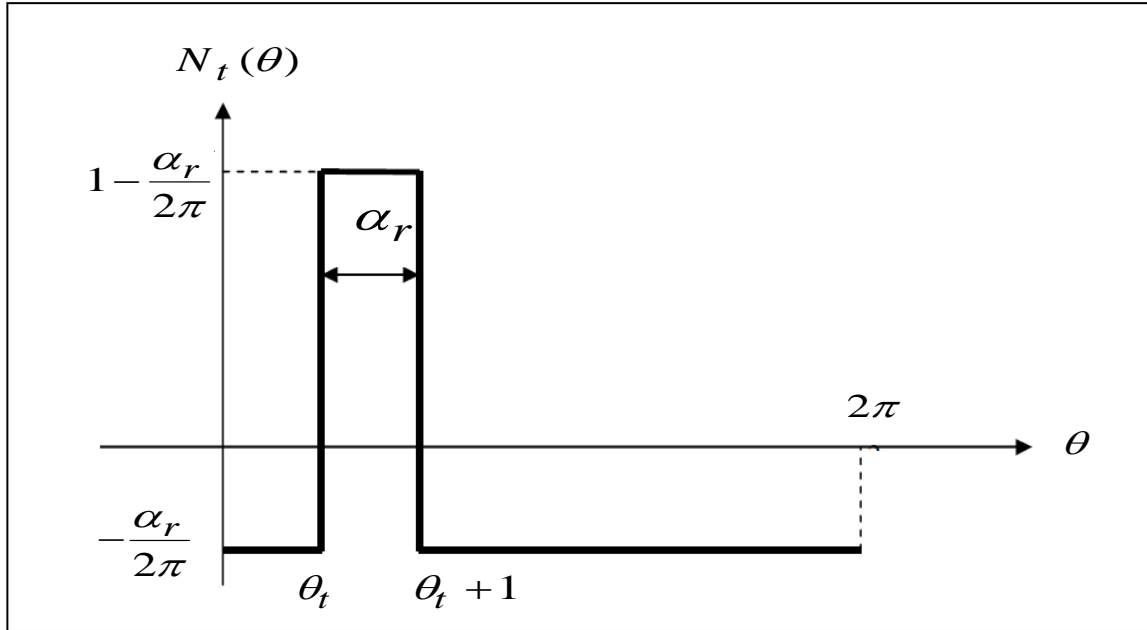


Figure II.4 La fonction définissant la $i^{\text{ème}}$ maille rotorique [37].

L'inductance mutuelle entre la phase a et la $i^{\text{ème}}$ maille rotorique est la suivante :

$$M_{s_a r_i} = \frac{\mu_0 \cdot l \cdot r}{e} \int_0^{2\pi} N_a(\theta) \cdot N_i(\theta) d\theta \cdot \frac{\mu_0 \cdot l \cdot r}{e} \frac{N_s}{2} [\sin \alpha_r \cos \theta_i - (1 - \cos \alpha_r) \sin \theta_i] \quad (\text{II.12})$$

Puisque chaque maille rotorique est placée symétriquement le long de la périphérie du rotor, θ_i peut être exprimé en termes de l'angle arbitraire rotorique θ_r et l'angle α_r comme suit :

$$\theta_i = \theta_r + (i - 1)\alpha_r \quad (\text{II.13})$$

En utilisant les expressions trigonométriques, l'inductance mutuelle peut être écrite par :

$$M_{s_i r_i} = L_m \cos(\theta_r + (i - 1)\alpha_r + \delta) \quad (\text{II.14})$$

Avec :

$$L_m = \frac{4L_{ms}}{\pi N_s} \sin(\delta), \quad \alpha_r = \frac{2\pi}{N_r} \quad \text{et} \quad \delta = \frac{\alpha_r}{2}$$

N_s : Nombre de spires par phase.

N_r : Le nombre de barres.

Tel que :

L_m Mutuelle inductance entre une phase statorique et une maille rotorique quand leurs axes coïncident.

θ_r : L'angle électrique du rotor.

α_r : L'angle électrique entre deux barres adjacentes.

μ_0 : La perméabilité magnétique de l'entrefer.

r : Rayon moyen de l'entrefer.

e : L'épaisseur de l'entrefer.

l : Longueur du rotor.

Évidemment, dans la machine à cage dont l'extrémité complète, le courant d'anneau $j_{r_{cc}}$ serait égal à zéro. Les N_r mailles des courants rotoriques sont couplées entre elles et avec les enroulements statoriques à travers les mutuelles inductances. Cependant, la maille de courant de l'anneau de court-circuit n'est pas couplée avec les enroulements statoriques.

II.3.2 Équations électriques du rotor [37]

Tout comme pour les équations du stator de la machine asynchrone, les équations des circuits électriques rotoriques peuvent se mettre sous une forme matricielle. On relie les tensions de chacune des boucles rotoriques avec les courants et les flux, grâce à l'équation :

$$[\psi_r] = [L_r][J_r] + [M_{rs}][I_s] \quad (\text{II.15})$$

Le vecteur $[\psi_r]$ donné dans l'équation précédente, se décompose de la façon suivante :

$$[\psi_r] = \begin{bmatrix} \psi_{r_1} & \psi_{r_2} & \cdots & \psi_{r_k} & \cdots & \psi_{r_{N_r}} & \psi_{r_{cc}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

Il est à noter que dans le cas particulier de la machine asynchrone à cage d'écureuil, le vecteur de tension $[V_r]$ est nul.

Les résistances des $(N_r + 1)$ boucles rotoriques sont regroupées dans la matrice $[R_r]$ qui est décrite par l'équation (II.18). Les boucles rotoriques étant magnétiquement couplées aux phases statoriques, le vecteur flux $[\psi_r]$ dépend non seulement des courants de boucles rotoriques mais aussi des courants de chacune des phases statoriques si bien que :

$$[\psi_r] = [L_r][J_r] + [M_{rs}][I_s] \quad (\text{II.17})$$

Où la matrice inductance $[L_r]$, décrite par l'équation (II.21), se compose des inductances propres de magnétisation, de fuite et mutuelles de chaque boucle rotorique.

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_{rt_1} & -R_{rb_1} & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & -R_{b_{N_r}} & -R_{a_1} \\ -R_{rb_1} & R_{rt_2} & -R_{rb_2} & \cdots & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & 0 & -R_{a_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -R_{b_{k-1}} & R_{rt_k} & -R_{rb_k} & \cdots & 0 & 0 & -R_{a_k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -R_{rb_{N_r}} & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & -R_{rb_{N_r-1}} & R_{rt_{N_r}} & R_{a_{N_r}} \\ -R_{a_1} & -R_{a_2} & -R_{a_3} & \cdots & -R_{a_{k-1}} & -R_{a_k} & -R_{a_{k+1}} & \cdots & -R_{a_{N_r-1}} & -R_{a_{N_r}} & \sum_{k=1}^{N_r} -R_{a_k} \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

$$\begin{cases} R_{rt_1} & = & R_{rb_{N_r}} & +R_{rb_1} & +2R_{a_1} \\ \vdots & = & & \vdots & \\ R_{rt_k} & = & R_{rb_{N_k-1}} & +R_{rb_k} & +2R_{a_k} \\ \vdots & = & & \vdots & \\ R_{rt_{N_r}} & = & R_{rb_{N_r-1}} & +R_{rb_{N_r}} & +2R_{a_{N_r}} \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

Sachant que :

$$\begin{cases} R_{rb_1} & = & R_{rb_2} & = & R_{rb_3} & = & \cdots & = & R_{rb_{N_r}} & = & R_b \\ R_{ra_1} & = & R_{ra_2} & = & R_{ra_3} & = & \cdots & = & R_{ra_{N_r}} & = & R_a \end{cases}$$

Ce qui donne :

$$\begin{cases} R_{rt_1} & = & R_{rt_2} & = & R_{rt_3} & = & \cdots & = & R_{rt_{N_r}} & = & R_0 \\ R_0 & = & 2(R_b + R_a) \end{cases}$$

La matrice résistance $[R_r]$ devient :

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_0 & -R_b & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & -R_b & -R_a \\ -R_b & R_0 & -R_0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & 0 & -R_a \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -R_b & R_0 & -R_b & \cdots & 0 & 0 & -R_a \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -R_b & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & -R_b & R_0 & R_a \\ -R_a & -R_a & -R_a & \cdots & -R_a & -R_a & -R_a & \cdots & -R_a & -R_a & \sum_{k=1}^{N_r} -R_a \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

La matrice inductance rotorique est exprimée comme suit:

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{r1} & M_{r1r2} - L_{fb1} & M_{r1r3} & \cdots & M_{r1rk} & \cdots & M_{r1r_{N_r-1}} & M_{r1r_{N_r}} - L_{fb_{N_r}} & -L_{a1} \\ M_{r2r1} - L_{fb1} & L_{r2} & M_{r2r3} - L_{fb1} & \cdots & M_{r2rk} & \cdots & M_{r2r_{N_r-1}} & M_{r2r_{N_r}} & -L_{a2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{rk r1} & M_{rk r2} & M_{rk r3} & \cdots & L_{rk} & \cdots & \cdots & 0 & -L_{ak} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{r_{N_r} r1} - L_{fb_{N_r}} & M_{r_{N_r} r2} & M_{r_{N_r} r3} & \cdots & M_{r_{N_r} rk} & \cdots & M_{r_{N_r} r_{N_r-1}} - L_{fb_{N_r-1}} & L_{r_{N_r}} & -L_{a_{N_r}} \\ -L_{a1} & -L_{a2} & -L_{a3} & \cdots & -L_{ak} & \cdots & -L_{a_{N_r-1}} & -L_{a_{N_r}} & \sum_{k=1}^{N_r} -L_{ak} \end{bmatrix} \quad (II.21)$$

$$\begin{cases} L_{rr1} = L_{mb1} + L_{b_{N_r}} + L_{b1} + 2L_{a1} \\ \vdots = \vdots \\ L_{rrk} = L_{mbk} + L_{b_{k-1}} + L_{bk} + 2L_{ak} \\ \vdots = \vdots \\ L_{rr_{N_r}} = L_{mb_{N_r}} + L_{b_{N_r-1}} + L_{b_{N_r}} + 2L_{a_{N_r}} \end{cases} \quad (II.22)$$

Sachant que :

$$\begin{cases} L_{b1} = L_{b2} = L_{b3} = \cdots = L_{b_{N_r}} = L_b \\ L_{a1} = L_{a2} = L_{a3} = \cdots = L_{a_{N_r}} = L_a \\ L_{rr1} = L_{rr2} = L_{rr3} = \cdots = L_{rr_{N_r}} = L_0 \\ L_0 = L_{mbk} + 2(L_a + L_b) \end{cases}$$

La matrice mutuelle rotor-rotor devient :

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_0 & M_{r1r2} - L_{fb1} & M_{r1r3} & \cdots & M_{r1rk} & \cdots & M_{r1r_{N_r-1}} & M_{r1r_{N_r}} - L_{fb_{N_r}} & -L_a \\ M_{r2r1} - L_{fb1} & L_0 & M_{r2r3} - L_{fb1} & \cdots & M_{r2rk} & \cdots & M_{r2r_{N_r-1}} & M_{r2r_{N_r}} & -L_a \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{rk r1} & M_{rk r2} & M_{rk r3} & \cdots & L_0 & \cdots & \cdots & 0 & -L_a \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{r_{N_r} r1} - L_{fb_{N_r}} & M_{r_{N_r} r2} & M_{r_{N_r} r3} & \cdots & M_{r_{N_r} rk} & \cdots & M_{r_{N_r} r_{N_r-1}} - L_{fb_{N_r-1}} & L_0 & -L_a \\ -L_a & -L_a & -L_a & \cdots & -L_a & \cdots & -L_a & -L_a & \sum_{k=1}^{N_r} -L_a \end{bmatrix} \quad (II.23)$$

$[M_{rs}]$: décrite par l'équation (II.24), se compose des inductances mutuelles entre les $(N_r + 1)$ boucles rotoriques et les trois phases statoriques.

$$[M_{rs}] = \begin{bmatrix} M_{r_1s_a} & M_{r_1s_b} & M_{r_1s_c} \\ M_{r_2s_a} & M_{r_2s_b} & M_{r_2s_c} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{r_k s_a} & M_{r_k s_b} & M_{r_k s_c} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{r_{N_r} s_a} & M_{r_{N_r} s_b} & M_{r_{N_r} s_c} \\ M_{r_{cc} s_a} & M_{r_{cc} s_b} & M_{r_{cc} s_c} \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

Notons qu'à travers la réciprocité des inductances mutuelles entre les phases statoriques et les boucles rotoriques, nous avons $[M_{rs}] = [M_{rs}]^T$.

D'après la fonction d'enroulement, on peut calculer les inductances mutuelles rotoriques en utilisant l'expression suivante :

$$L_{m_{bii}} = \frac{\mu_0 \cdot l \cdot r}{g} \int_0^{2\pi} N_i^2(\theta) d\theta \frac{\mu_0 \cdot l \cdot r}{g} \alpha_r \left(1 - \frac{\alpha_r}{2\pi}\right) \quad (\text{II.25})$$

$$L_{m_{bij}} = \frac{\mu_0 \cdot l \cdot r}{g} \int_0^{2\pi} N_i(\theta) N_j(\theta) d\theta \frac{\mu_0 \cdot l \cdot r}{g} \left(-\frac{\alpha_r^2}{2\pi}\right) \quad (\text{II.26})$$

$$L_{m_{bii}} = L_{m_{bij}} + \frac{\mu_0 \cdot l \cdot r}{g} \alpha_r \quad (\text{II.27})$$

Les équations électriques des (Nr+1) boucles rotoriques étant décrites, on aborde la description des équations mécaniques de la machine asynchrone.

II.3.3 Équation mécanique [14]

Selon l'application à laquelle est désigné le moteur, il est possible de définir l'équation mécanique du mouvement associé par :

$$J_T \cdot \frac{d\Omega_r}{dt} + f_v \cdot \Omega_r = C_e - C_r \quad (\text{II.28})$$

Où C_e est le couple électromagnétique, C_r le couple résistant, f_v le coefficient de frottement visqueux et J_T le moment d'inertie total des parties tournantes.

Si $[L_{ss}]$ et $[L_{rr}]$ sont constantes, et $[L_{sr}] = [L_{rs}]$, le couple électromagnétique sera défini par :

$$C_e = \frac{1}{2} [I_s]^T \frac{d[L_{sr}]}{d\theta_r} [I_r] \quad (\text{II.29})$$

II.3.4 Système d'équations global

Nous pouvons regrouper ces équations dans une représentation matricielle unique pour aboutir à [42]:

$$\begin{bmatrix} [V] \\ -C_r \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left([R] + \Omega_r \frac{d[L]}{d\theta_r} \right) & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2} [I]^T \frac{d[L]}{d\theta_r} & f_v & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [I] \\ \Omega_r \\ \theta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [L] & 0 & 0 \\ 0 & J_T & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I} \\ \dot{\Omega}_r \\ \dot{\theta}_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.30})$$

Et une forme condensée :

$$[U] = [B] \cdot [X] + [A] \cdot \begin{bmatrix} \dot{X} \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$

Où le vecteur $\begin{bmatrix} \dot{X} \end{bmatrix}$ peut être écrit comme suit :

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \end{bmatrix} = [A]^{-1} \cdot [U] - [A]^{-1} \cdot [B] \cdot [X] \quad (\text{II.32})$$

Nous faisons, ainsi, apparaître le vecteur d'état $[X]$ et le vecteur $[U]$ contenant les grandeurs externes à la machine tel que :

$$[U] = \begin{bmatrix} [V] \\ -C_r \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.33})$$

$$[X] = \begin{bmatrix} [I] \\ \Omega_r \\ \theta_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.34})$$

Avec la définition des matrices $[A]$ et $[B]$ donnée par:

$$[A] = \begin{bmatrix} \left([R] + \Omega_r \frac{d[L]}{d\theta_r} \right) & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2} [I]^T \frac{d[L]}{d\theta_r} & f_v & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.35})$$

$$[B] = \begin{bmatrix} [L] & 0 & 0 \\ 0 & J_T & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.36})$$

On se retrouve ainsi face à un système d'équations différentielles régissant le fonctionnement de la machine. Pour parvenir à la solution, une méthode numérique doit être mise en œuvre, la méthode explicite de Runge-Kutta s'avère la plus utilisée dans ces cas. Bien avant ça, nous devons définir les matrices $[A]$ et $[B]$ de manière à traduire l'état interne de la machine, à savoir, état sain ou état de défaut.

II.4 Modélisation de défaut de cassure de barres rotoriques

Une cassure d'une barre peut être totale ou bien partielle. Partant de la structure multi-enroulements, la cassure partielle d'une barre est souvent modélisée par élévation de sa résistance à des taux reflétant le degré de sévérité voulu. Une cassure totale se traduit par l'annulation complète de la branche équivalente dans la structure multi-enroulements diminuant ainsi le nombre de mailles rotoriques à flux radiaux à $(Nb-1)$. Les mailles résultantes ne sont plus identiques ce qui impose une restructuration du modèle d'état [3].

Une forte augmentation de la résistance des barres rotoriques peut aussi modéliser leur cassure totale [43].

II.5 Résultats de simulation du moteur asynchrone

II.5.1 A l'état sain avec forte charge

Les paramètres du moteur utilisé pour la simulation sont présentés dans l'annexe.

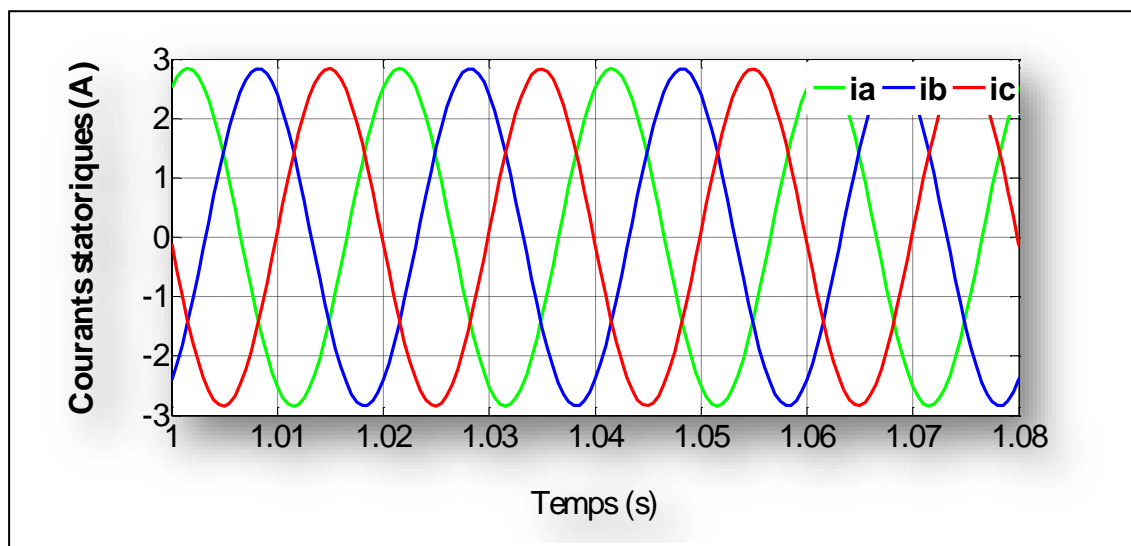


Figure II.5 Courants statoriques du MAS à l'état sain en régime permanent avec forte charge.

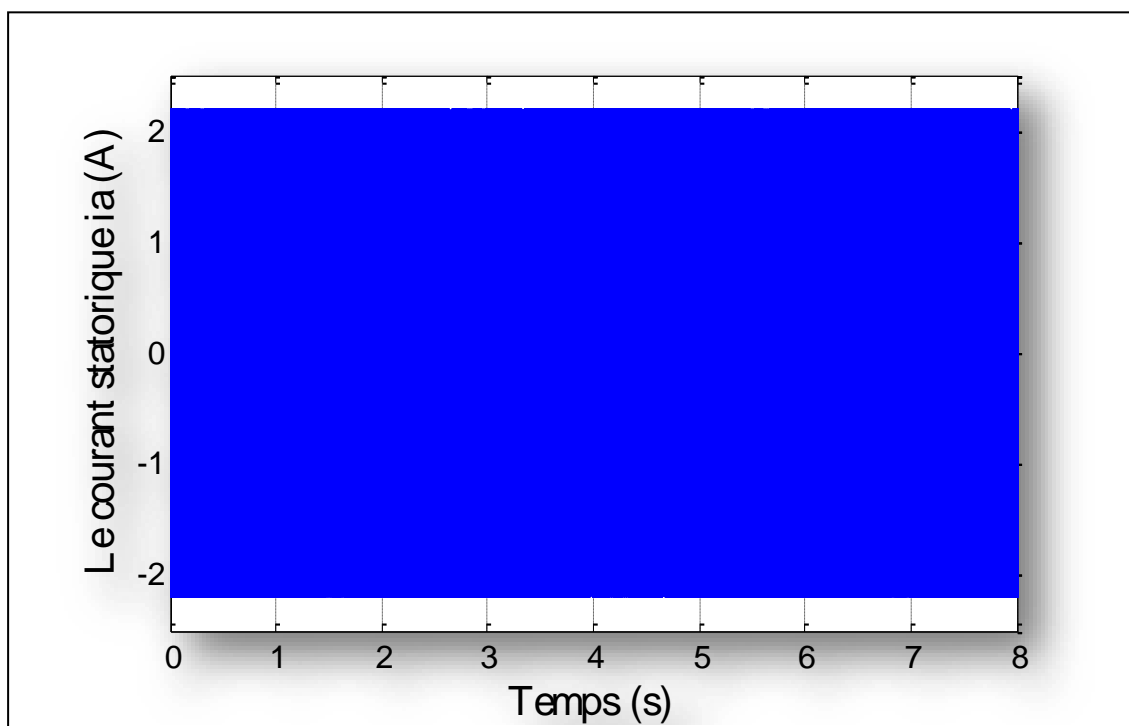


Figure II.6 Le courant statorique (i_a) du MAS à l'état sain avec forte charge.

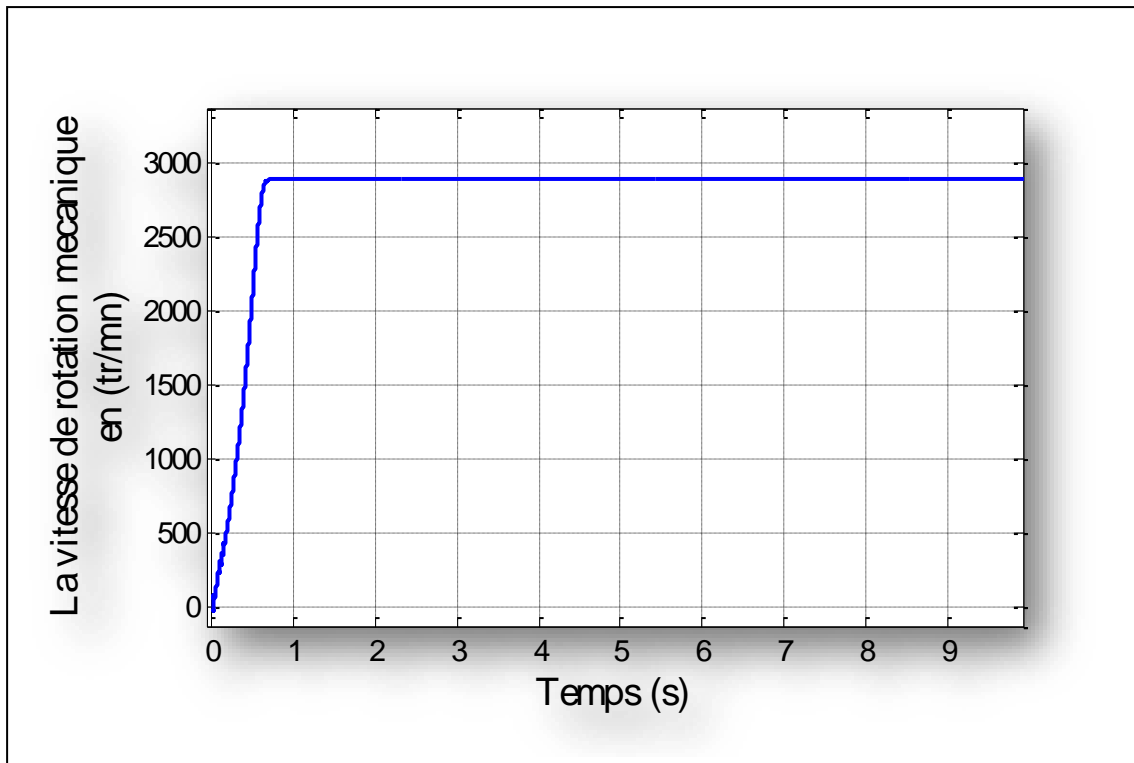


Figure II.7 La vitesse de rotation du MAS à l'état sain avec forte charge.

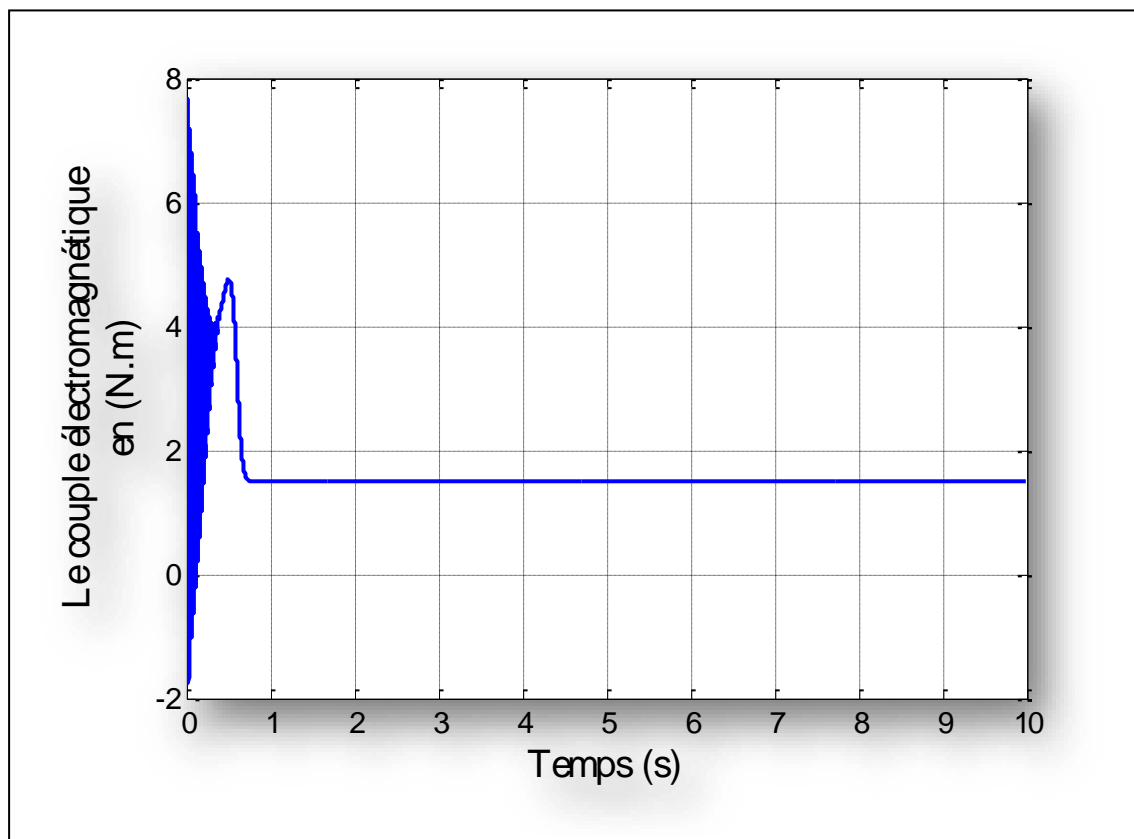


Figure II.8 Le couple électromagnétique du MAS à l'état sain avec forte charge.

II.5.2 A l'état défectueux pour différentes barres cassées avec différentes charges

II.5.2.1 A l'état défectueux pour une barre cassée avec forte charge

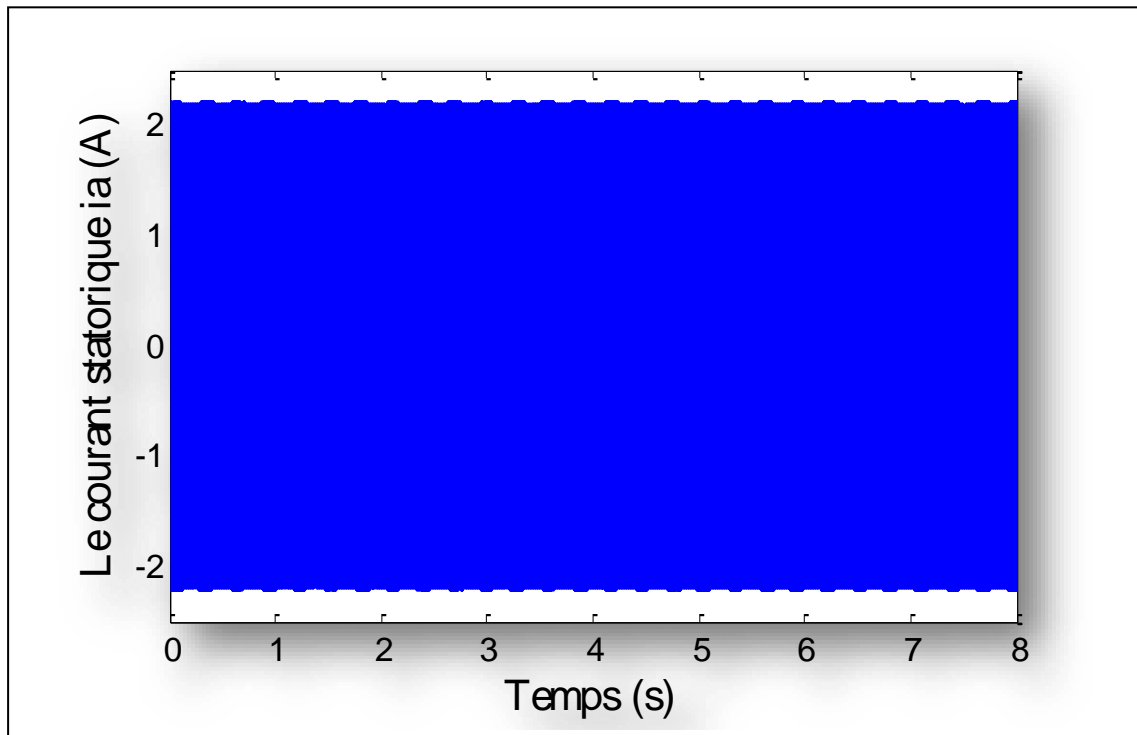


Figure II.9 Le courant statorique (i_a) du MAS pour une barre cassée avec forte charge.

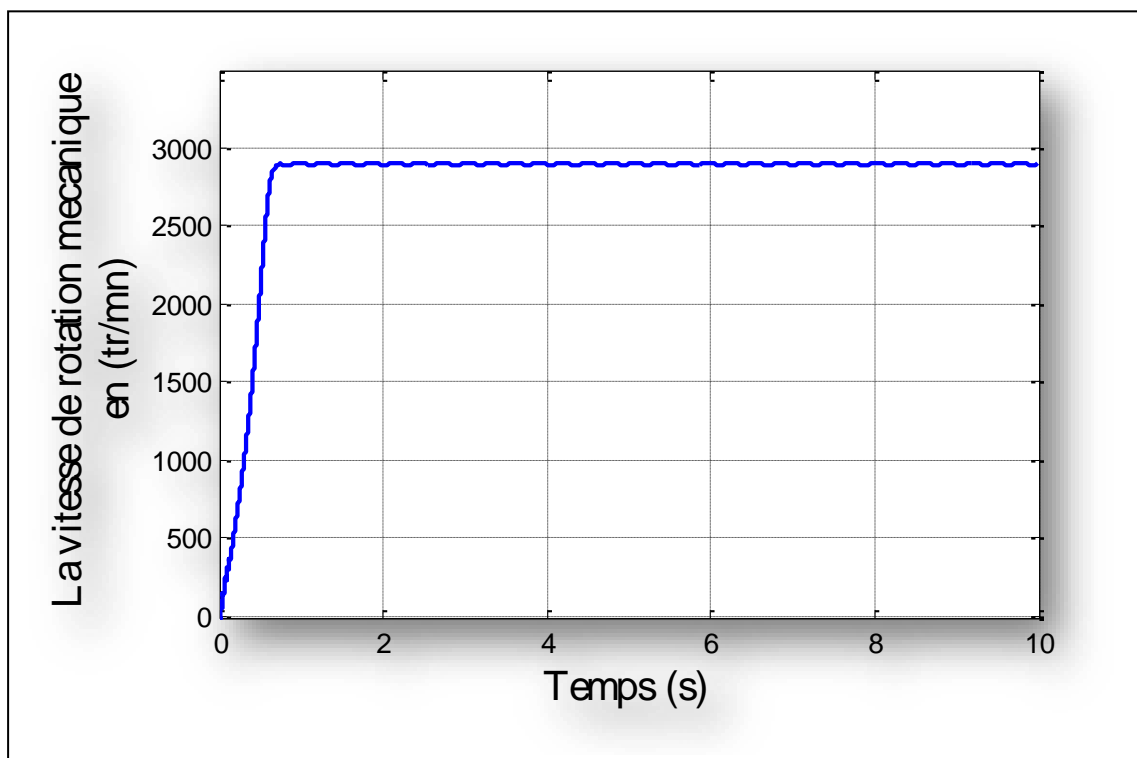


Figure II.10 La vitesse de rotation du MAS pour une barre cassée avec forte charge.

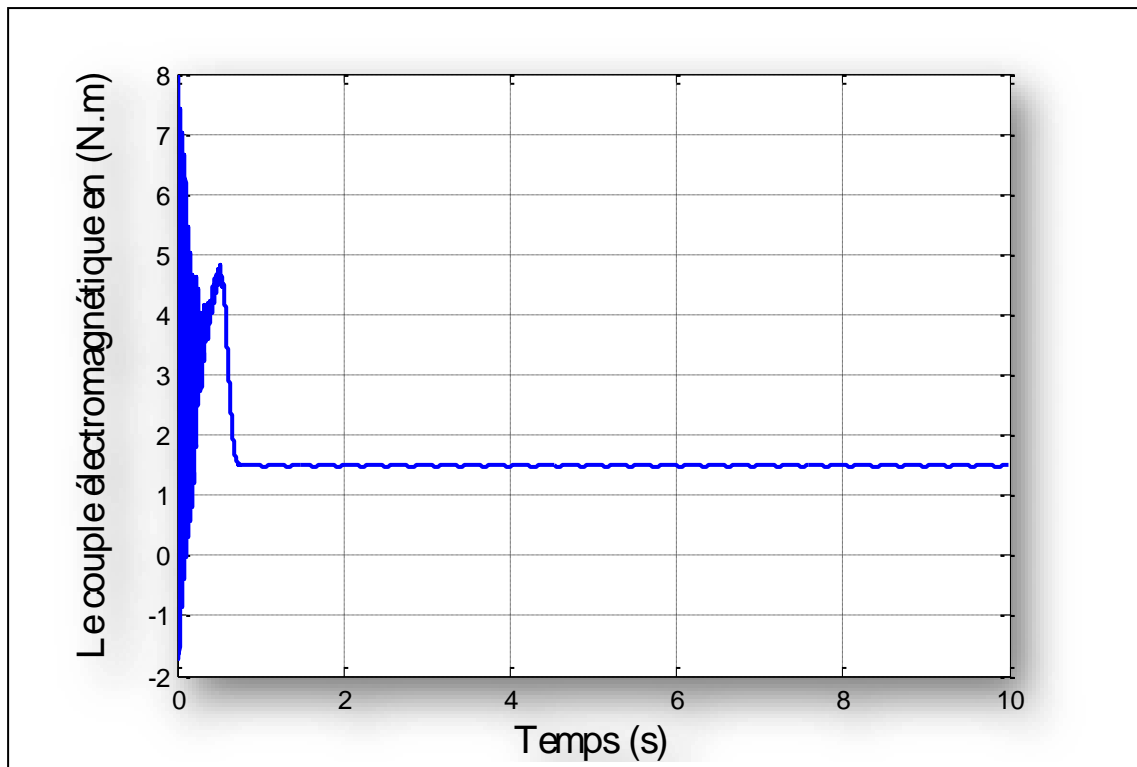


Figure II.11 Le couple électromagnétique du MAS pour une barre cassée avec forte charge.

II.5.2.2 A l'état défectueux pour deux barres cassées avec moyenne charge

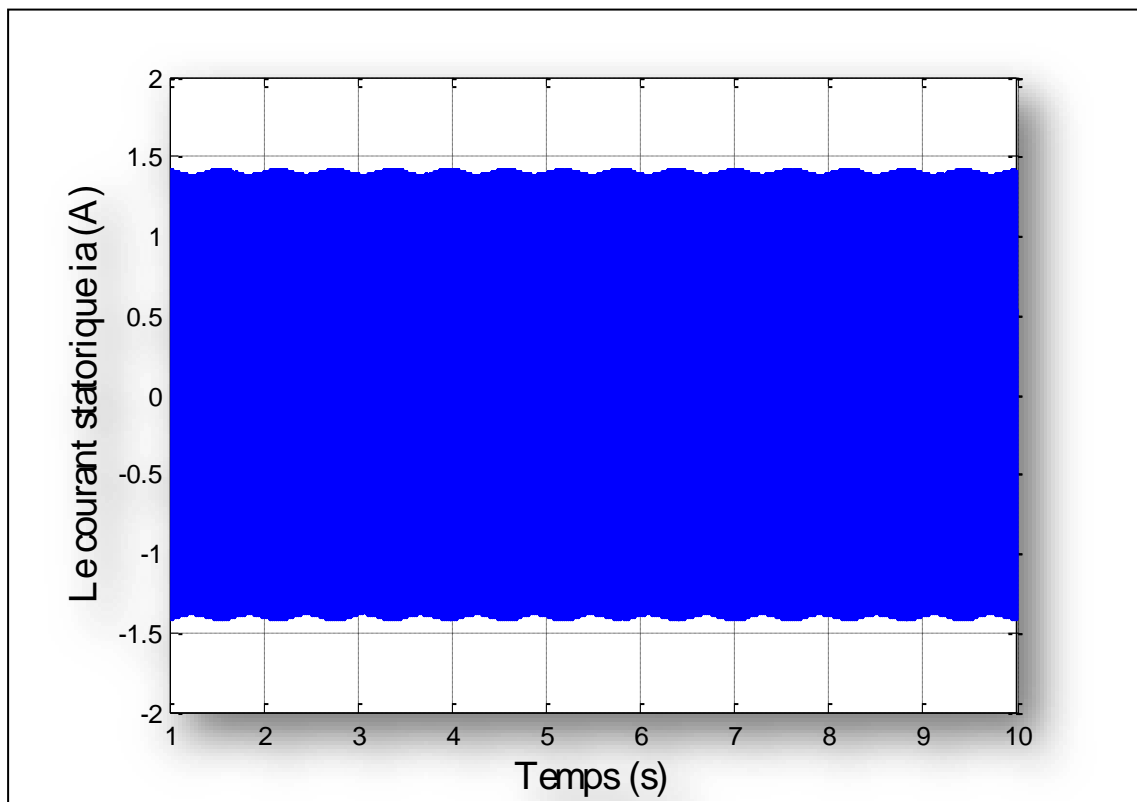


Figure III.12 Le courant statorique (i_a) pour deux barres cassées avec moyenne charge.

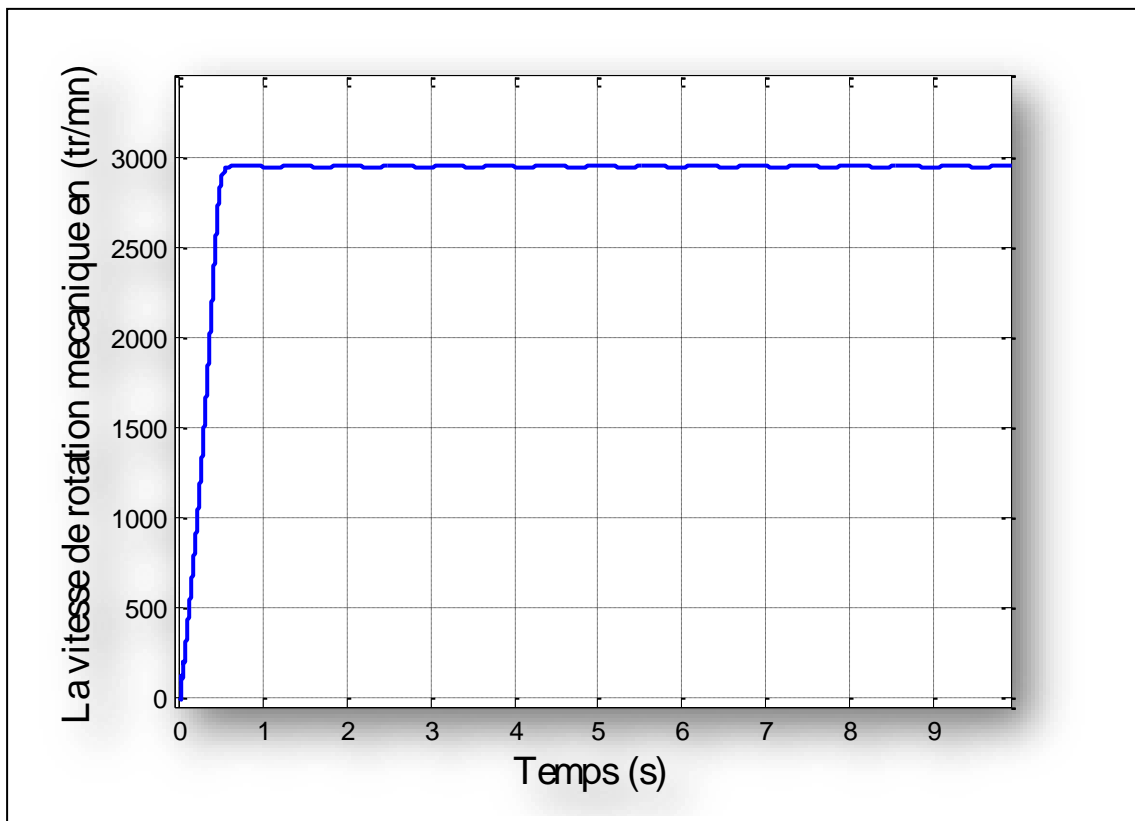


Figure III.13 La vitesse de rotation du MAS pour deux barres cassées avec moyenne charge.

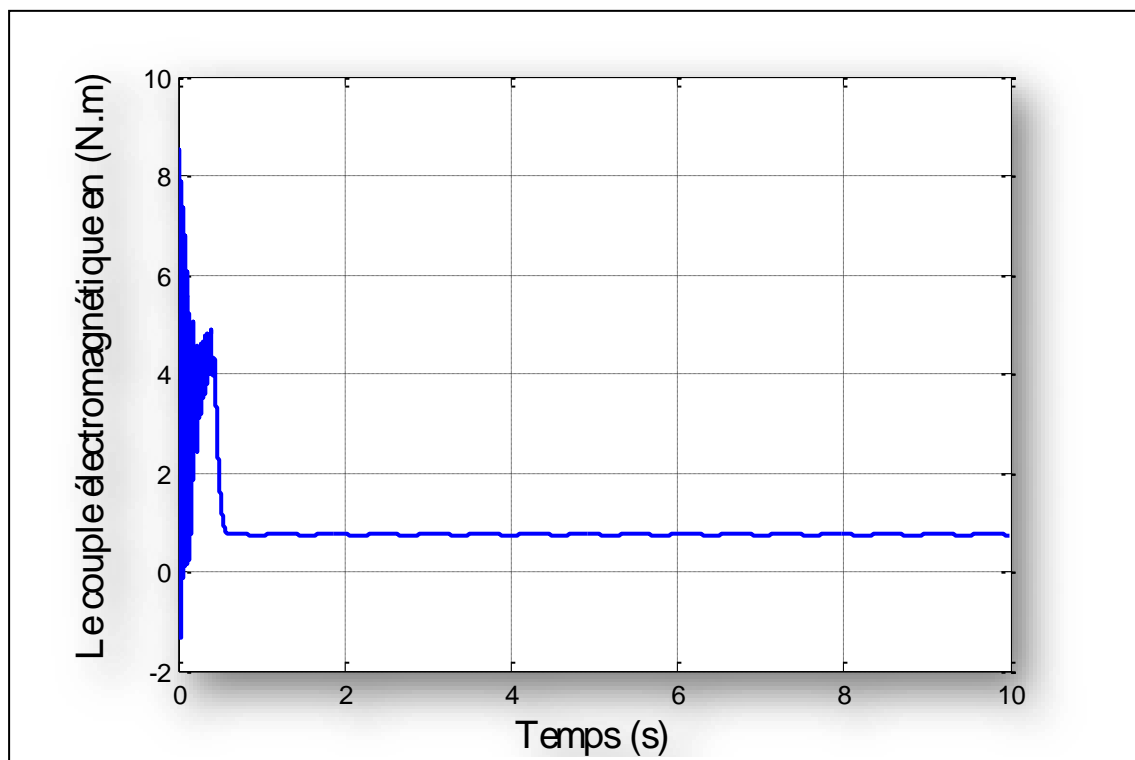
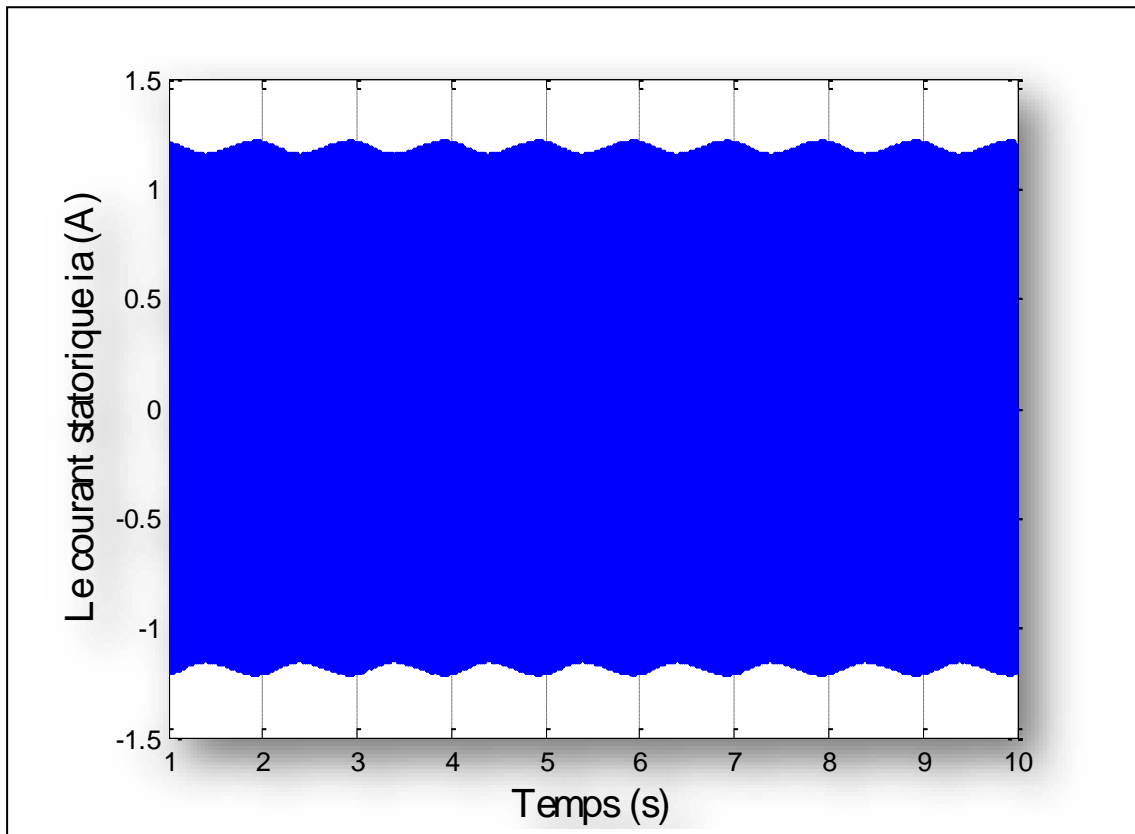
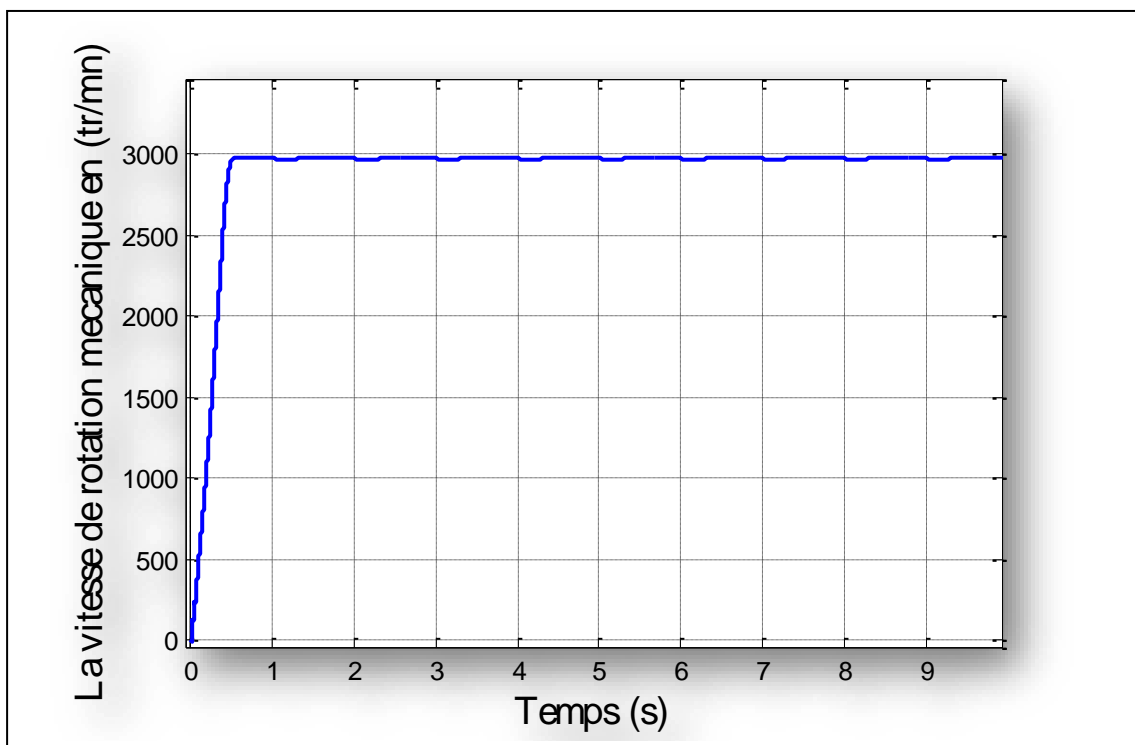


Figure III.14 Le couple électromagnétique du MAS pour deux barres cassées avec moyenne charge.

II.5.2.3 A l'état défectueux pour trois barres cassées avec faible charge**Figure III.15** Le courant statorique (i_a) du MAS pour trois barres cassées avec faible charge.**Figure III.16** La vitesse de rotation du MAS pour trois barres cassées avec faible charge.

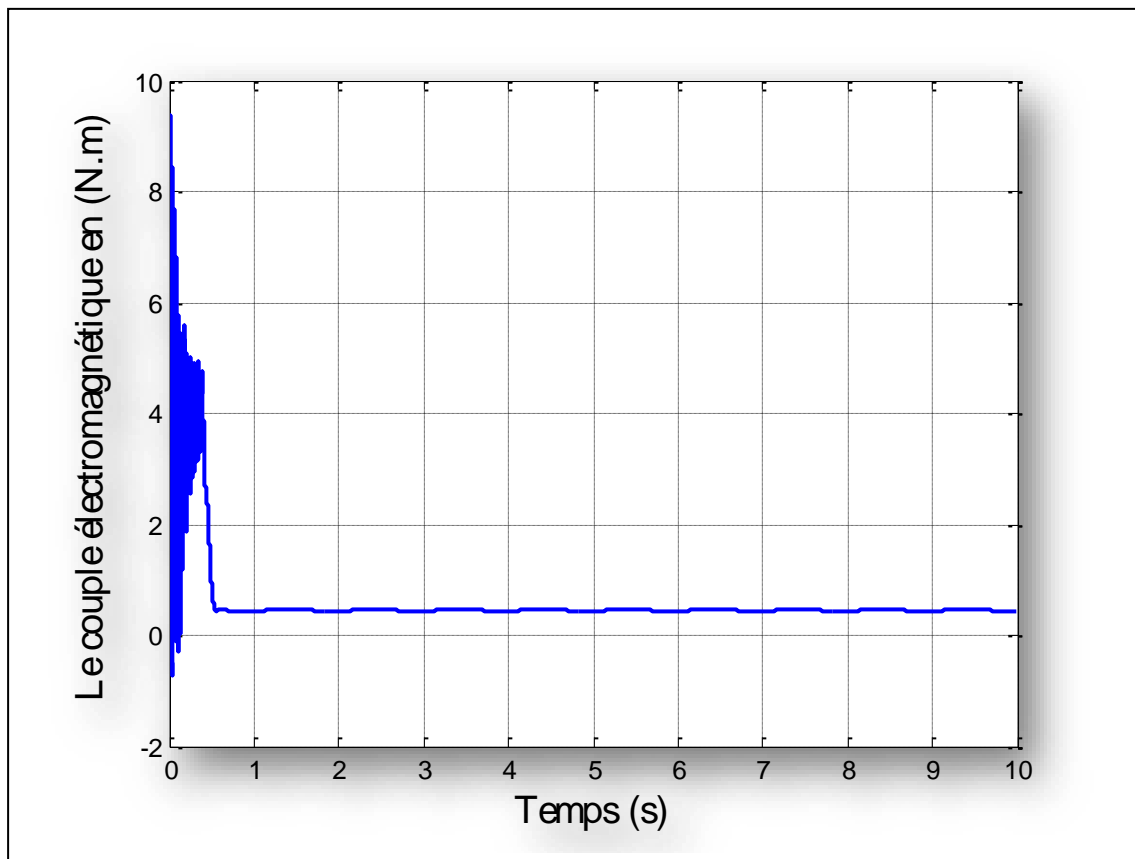


Figure III.17 Le couple électromagnétique du MAS pour trois barres cassées avec faible charge.

Dans les figures (III.9-17). On remarque la présence des ondulations des signaux à l'état défectueux par rapport aux signaux à l'état sain avec différentes charges.

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un modèle permettant la simulation de la machine asynchrone triphasée à cage. Ce modèle nous permet de bien modéliser les défauts de cassure de barres rotoriques. Le chapitre suivant sera consacré au développement la technique d'ondelette (TO) pour faire le diagnostic de cassure de barres dans les machines asynchrones triphasé à cage.

CHAPITRE III

APPLICATION DE LA

TECHNIQUE DES

ONDELETTES AU

DIAGNOSTIC DE CASSURE

DE BARRES

III.1 Introduction

Ce troisième chapitre est destiné au diagnostic de défauts de barres cassées par l'utilisation de la transformation d'ondelette (TO). Après avoir exposé une brève explication sur la technique d'ondelette continue (TOC) et discrète (TOD), nous avons appliqué cette dernière méthode pour le diagnostic de défauts de barres cassées de MAS. Pour ce faire, nous avons utilisé la puissance apparente comme signal de diagnostic. L'énergie relative aux signaux de détails adéquats issus de cette décomposition montre l'efficacité de cette méthode pour le diagnostic de défauts.

III.2 Transformée en ondelettes (TO)

La transformation en Ondelette est un outil récent de traitement de signal. Son principe repose sur la décomposition d'un signal dans une base de fonctions particulières. De ce point de vue, elle est tout à fait comparable à l'analyse de Fourier. Cependant, les ondelettes sont des fonctions oscillantes au sens large, rapidement amorties, contrairement aux fonctions sinusoïdales de l'analyse de Fourier. Par ailleurs, les ondelettes possèdent la propriété de pouvoir être bien localisées en temps ou en fréquence, ce qui les différencie principalement de l'analyse Temps-fréquence classique.

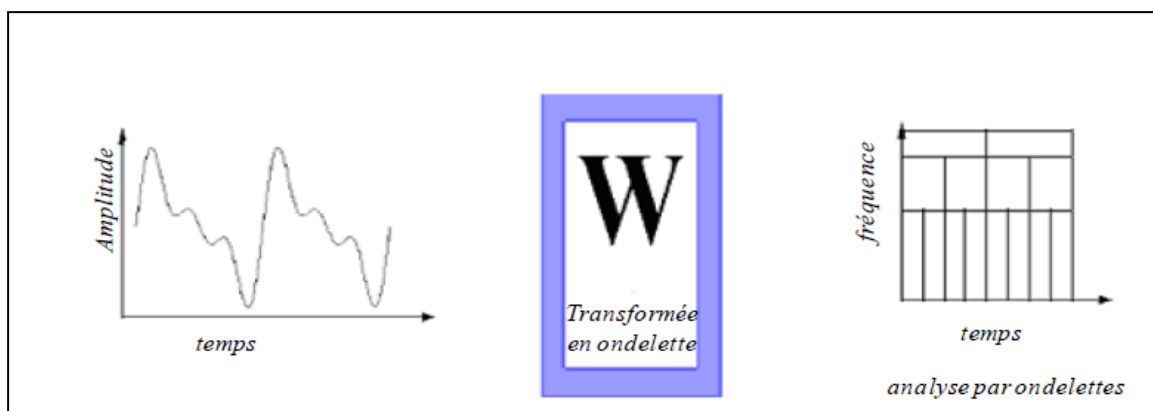


Figure III.1: Représentation temporelle vers ondelettes

III.2.1 Transformée en ondelettes continue (TOC)

III.2.1.1 Définition

La transformation en ondelettes continue (TOC), réalise une projection sur une base de fonctions dont la construction diffère de celle de la Transformation de Fourier à Court Terme et auxquelles on réserve classiquement le terme d'ondelettes. Les ondelettes sont construites à

partir d'une " ondelette mère " $\psi(t)$ à l'aide d'un opérateur de translation temporelle et d'un opérateur de changement d'échelle.

Une ondelette $\psi(t)$ est une fonction de moyenne nulle :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (\text{III.1})$$

Cette dernière est dilatée avec un paramètre d'échelle a , et translatée par b :

$$\psi_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (\text{III.2})$$

Parmi des grandes familles des ondelettes, on trouve :

Tableau III.1 Quelques familles d'ondelettes.

Nom des familles d'ondelettes	Nom court en Matlab
Ondelette de Haar	Haar
Ondelette de Daubechies	Db
Symlets	Sym
Coiflets	Coif
Ondelettes biorthogonales	Bior
Ondelette de Meyer	Meyr
Approximation discrète de l'ondelette de Meyer	Dmey
Ondelettes de Battle et Lemarié	Dmey
Ondelettes gaussiennes	Gaus
Chapeau mexicain	Mexh
Ondelette de Morlet	Morl
Ondelettes gaussiennes complexes	Cgau
Ondelettes de Shannon complexes	Shan
Ondelettes B-spline fréquentielles complexes	Fbsp
Ondelettes de Morlet complexes	Cmor

III.2.1.2 Adaptabilité en temps et en fréquence

Si un signal $x(t)$ est la somme de plusieurs composantes dont les dérivées de fréquence instantanée sont très différentes, il est impossible de visualiser de façon concentrée toutes les composantes avec la TFFG. Dans ce cas, il serait nécessaire que la taille de la fenêtre soit variable suivant la position dans le plan temps-fréquence, et c'est justement le principe de la transformation en ondelettes. Les composantes d'un même signal n'évoluent pas forcément de la même manière, leur comportement varie selon qu'elles soient en hautes ou en basses fréquences. Naturellement, une composante de type basse fréquence nécessite par essence un temps d'observation suffisamment long pour pouvoir être correctement analysée. A l'inverse, une composante de type haute fréquence évolue rapidement et nécessite un temps d'observation plus réduit pour être analysée. C'est justement l'adaptabilité de l'analyse de la transformation en ondelettes qui permettra d'analyser différemment ces composantes. Il existe un grand nombre d'ondelettes offrant une grande diversité d'analyse. Il existe également diverses transformées continues ou discrètes. Ainsi, la transformation en ondelettes permet une représentation temps-échelle ou temps-fréquence du signal dans un même plan [14].

III.2.1.3 Atomes temps-fréquence

C'est comme une alternative à la transformation de Fourier à fenêtre glissante (TFFG) que la transformation en ondelettes continue [44] a été développée afin de pallier les difficultés de résolution temps-fréquence. Morlet en 1983 [45], pour l'étude en haute résolution des signaux sismiques, propose une transformation où la taille de la fenêtre est variable, ceci grâce à un paramètre d'échelle.

Cette transformation en ondelettes est une décomposition atomique dont les atomes sont issus d'une même fonction, l'ondelette mère, par opérations de translation et dilatation. Cette ondelette, appelée ainsi car représentant des oscillations, comme une onde, mais limitée en temps d'où le nom de la petite onde. Elle doit être bien localisée en temps et en fréquence. On conduit l'analyse en ondelettes de la même manière que l'analyse par la TFFG. Le signal est multiplié par une fonction semblable à la fonction de fenêtrage de la TFFG. La fenêtre modulée $h(t) e^{j 2\pi f t}$ de la TFFG a été remplacée par une ondelette $\frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$. La translation est liée à la localisation de la fenêtre, à mesure que cette fenêtre est décalée sur l'étendue du signal. L'échelle peut s'interpréter comme l'inverse d'une fréquence $1/f$. De

même que la TFFG, la transformation en ondelette permet de mesurer les variations temporelles des composantes spectrales de $x(t)$. Cependant, il existe une grande différence entre les deux transformations. Pour analyser des composantes transitoires de durées différentes, la TO décompose les signaux sur une famille d'ondelettes translatées et dilatées. La largeur de la fenêtre est donc modifiée pour chacune des composantes spectrales individuellement, ce qui se traduit par une résolution temps-fréquence différente de celle de la TFFG. Ce dernier point est la caractéristique la plus significative de la transformation en ondelettes. Une famille d'atomes temps-échelle s'obtient à partir d'une ondelette unique, en la dilatant d'un facteur d'échelle a et en la translatant de b .

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (\text{III.3})$$

La transformation en ondelettes de $x \in L^2(\mathbb{R})$ au temps t et à l'échelle a se calcule en projetant $x(t)$ sur la famille d'ondelettes, $\psi_{a,b}(t)$ $t \in \mathbb{R}$ et $a \in \mathbb{R}^+$. La représentation temps-échelle obtenue est appelée transformation en ondelettes continue (TOC), sa définition est :

$$T_x(b,a) = (x, \psi_{a,b}) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (\text{III.4})$$

Sa version fréquentielle est donnée par :

$$T_x(b,a) = |a|^{1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) \psi^*(af) e^{j2\pi fb} df \quad (\text{III.5})$$

III.2.1.4 Résolution temps-échelle

Contrairement au comportement rigide de la TFFG, la transformation en ondelettes adopte un comportement dynamique, lié au zoom adaptatif de l'échelle a , pour suivre les singularités et les irrégulières du signal analysé. Avec une ondelette ψ réelle, les variations brutales du signal $x(t)$ produisent de grands coefficients d'ondelettes et la singularité locale est liée à la décroissance de $T_x(b,a)$ 2 lorsque a tend vers 0 [46].

La notion de représentation temps-échelle ou espace-échelle permet de voir la transformation en ondelettes comme un microscope mathématique, le zoom étant l'échelle et l'optique, l'ondelette. Le paramètre échelle est très similaire à la notion d'échelle pour les

cartes géographiques. En tant qu'opération mathématique, les grandes échelles, ou basses fréquences, dilatent le signal et correspondent à des vues plus globales non détaillées du signal. Les petites échelles, ou hautes fréquences, correspondent à des vues détaillées et donnent des informations détaillées sur un motif caché dans le signal.

III.2.2 Transformée en ondelettes discrète (TOD)

Pour mettre en œuvre la transformation en ondelette sur des signaux numériques, une discrétisation des paramètres de résolution a et position b est nécessaire. Cette discrétisation du plan temps fréquence correspond à la construction d'une grille non uniforme définie par les paramètres de l'équation (III.6). b_0 Dépend de l'ondelette choisie.

$$(b, a) = (nb_0 a_0^m, a_0^m), b_0 > 0, a_0 > 1, m \in \mathbb{Z} \quad (\text{III.6})$$

L'idée essentielle de cette discrétisation est la suivante. Une fois choisi un grossissement a_0^m et étudié le processus à une position donnée, nous déplaçons à une autre position. Si le grossissement est important (analyse des détails à petite échelle), les déplacements se font par petits incréments. Au contraire, si le grossissement est faible (analyse à plus grande échelle), les déplacements peuvent être plus rapides. Ceci est automatiquement accompli si l'incrément de déplacement est inversement proportionnel au grossissement. Un atome de cette transformée discrète se définit alors comme décrit dans l'équation (III.7).

$$\psi_{m,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \psi\left(\frac{t - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) = a_0^{\frac{m}{2}} \psi(a_0^{-m} t - nb_0) \quad (\text{III.7})$$

La transformation en ondelette discrète de $x(f)$, calculée à partir de $\psi_{m,n}(f)$, est donnée par l'équation :

$$T_{dx}(m,n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \int x(t) \psi(a_0^{-m} t - nb_0) \quad (\text{III.8})$$

Dans la formalisation de l'analyse multi-résolution, deux choix de discrétisation sont possibles. Le premier consiste en une décomposition continue où a est comprise entre 0 et 1, b est suffisamment petit. Dans ce cas, il sera nécessaire d'étudier les fréquences en fonction de coefficients de dilatation imposés par une évolution en puissance de m , avec m le niveau de détails. Le second choix ($a_0 = 2, b_0 = 1$) correspond à un échantillonnage dyadique du plan temps-fréquence (transformée en ondelettes discrète TOD) [47].

La TOD n'est envisageable qu'à la condition que les ondelettes soient orthogonales. L'orthogonalité signifie que l'information capturée par une ondelette est totalement décorrelée de celle capturée par une autre. Cela permet de ne garder que l'information nécessaire et suffisante afin d'assurer la réversibilité. Une ondelette mère orthogonale et sa fonction d'échelle permettent d'effectuer une analyse multi-résolution orthogonale : les espaces de détail et d'approximation sont alors orthogonaux, c'est-à-dire que la projection des vecteurs de la base de l'un des espaces sur l'autre donne zéro. Chaque ondelette et sa fonction d'échelle associée sont également orthogonales [48].

Une des raisons du succès de la transformation en ondelette est son implantation matérielle efficace. La méthode la plus répandue pour implanter une transformation en ondelette est l'utilisation de bancs de filtre sous forme d'une structure pyramidale, technique qui provient des travaux de Mallat [49]. Deux filtres FIR (Finité Impulse Réponse) calculent à chaque niveau les coefficients d'ondelette (les détails) et les coefficients d'échelle (les approximations), ils possèdent alors des caractéristiques respectivement passe-haut et passe-bas. Pour garder le même nombre d'échantillons en sortie et en entrée, les produits de convolution issus des filtres sont sous-échantillonnés par un facteur deux. Seule la sortie du filtre passe-bas, c'est-à-dire l'approximation, est de nouveau traitée par les deux filtres. La transformation inverse peut être obtenue en faisant tourner l'algorithme à l'envers et en utilisant une autre paire de filtres FIR. Les quatre filtres (deux pour la décomposition et deux pour la reconstruction) associés au sous-échantillonnage forment un banc de filtres conjugués en quadrature.

Étant donné un signal discret $x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, la TOD le décompose en différents signaux de détail d_j et d'approximation a_n . Les fréquences correspondants aux signaux de détail d_j et d'approximation a_n sont données par :

$$f(d_j) \in [2^{-(j+1)}f_e, 2^{-j}f_e] \text{ Hz}, f(a_n) \in [0.2^{-(j+1)}f_e] \text{ Hz} \quad (\text{III.9})$$

Les signaux d'approximation et de détail donnent l'évolution temporelle des composantes de fréquence du signal original x , qui sont contenues dans ses bandes de fréquence. Le processus de filtrage n'est pas idéal ce qui conduit à un certain chevauchement entre les bandes de fréquences adjacentes. Selon l'application de la TOD, cet effet peut entraîner une distorsion si certaine composante de fréquence du signal est proche de la limite d'une bande. L'utilisation des fonctions d'ondelettes avec des filtres d'ordre élevé peut surmonter ce problème en diminuant la largeur de la bande de chevauchement.

Avant l'application de la TOD, le type de l'ondelette mère et le nombre de niveaux de la décomposition doivent être préalablement sélectionnés. Le choix de l'ondelette mère est lié aux coefficients des filtres utilisés dans le processus de filtrage de la TOD [50].

Au cours des dernières décennies, plusieurs familles d'ondelettes avec différentes propriétés mathématiques ont été développées. L'ondelette mère peut être choisie en fonction du compromis entre la précision des résultats et le temps de calcul.

Le nombre de niveaux de la décomposition est déterminé par la fréquence d'échantillonnage f_e et les composantes basses fréquences à extraire. A cet effet, la condition donnée en l'équation (III.10) doit être vérifiée. Cette condition implique que la limite inférieure de la bande de fréquence qui contient la composante caractéristique de défaut est inférieure à cette fréquence de défaut.

$$l_d > \frac{\log\left(\frac{f_e}{f_b}\right)}{\log(2)} - 1 \quad (\text{III.10})$$

Les énergies correspondants aux signaux de détail d_j et d'approximation a_n peuvent être calculées par l'équation (III.11) et l'équation (III.12), respectivement [51]:

$$E(a_n) = \sqrt{\frac{1}{N_l} \sum_{i=1}^{N_1} (a_n)^2 [i]} \quad (\text{III.11})$$

$$E(d_j) = \sqrt{\frac{1}{N_l} \sum_{i=1}^{N_1} (d_j)^2 [i]} \quad (\text{III.12})$$

III.3 Les avantages de la transformation en ondelettes

Le fait que la transformation en ondelettes utilise des fonctions bien localisées dans le plan temps-fréquence lui donne beaucoup d'avantages [47] :

- ❖ La résolution en fréquence de la transformation dépend du facteur de dilatation par le principe de Heisenberg, on peut donc choisir arbitrairement celle-ci suivant ce que l'on désire analyser.
- ❖ Pour des signaux physiques présentant des variations très rapides et des discontinuités, l'analyse en ondelettes est adaptée car l'ondelette va détecter ces variations et les analyser. Cette particularité rend l'analyse en ondelettes complémentaire à l'analyse de

Fourier. En effet, avec l'analyse de Fourier, les discontinuités d'un signal ne sont pas facilement analysables.

- ❖ La localisation en temps est précieuse pour beaucoup d'applications.
- ❖ La transformation en ondelette peut représenter complètement et efficacement un signal quelconque avec peu de coefficients.

III.4 Décomposition en multi-niveaux du signal

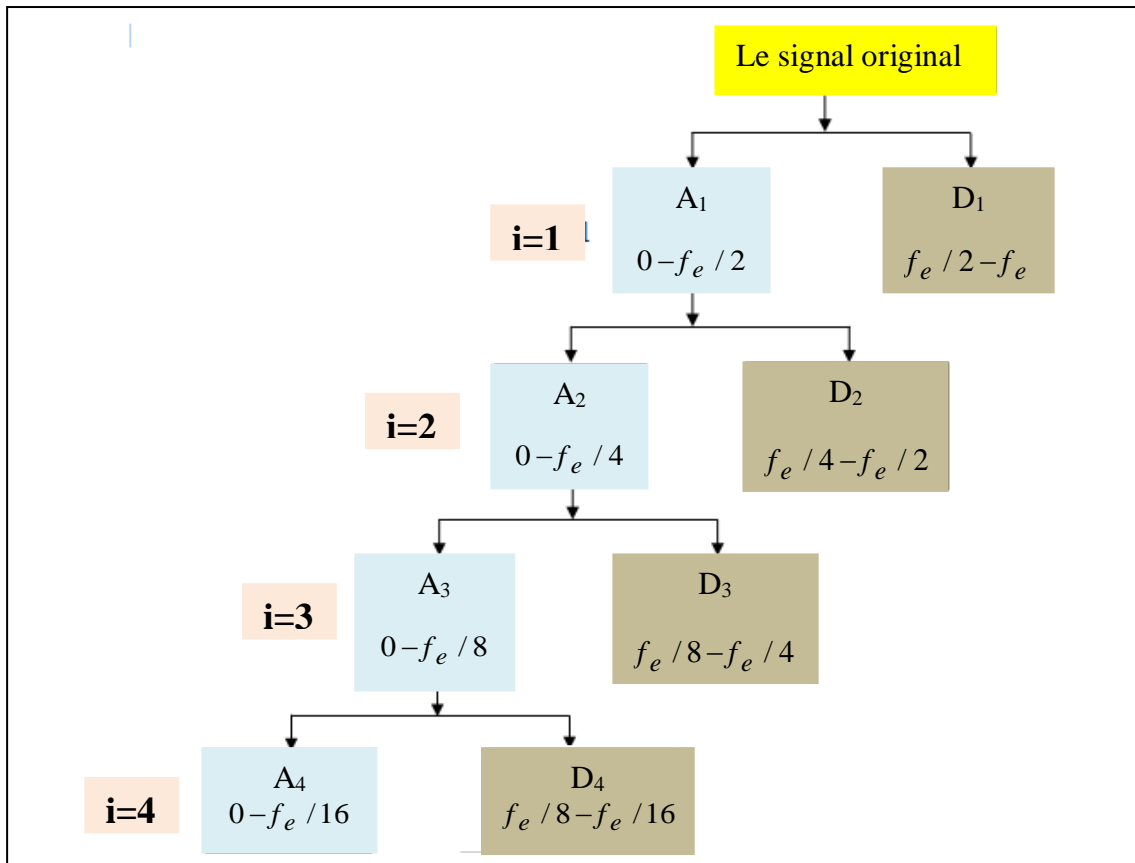


Figure III.2 Arbre de décomposition d'un signal en quatre niveaux.

III.5 Application de la technique de traitement de signal utilisé au diagnostic

Cette partie débute par la présentation des résultats de simulation issus du modèle de la machine asynchrone à cage. On commence par exposer les résultats de défauts d'une, de deux et de trois barres cassées. On appliquera la TFR pour mettre en évidence les harmoniques des défauts. Ensuite, on procède à l'application des ondelettes sur le signal de la puissance. La décision sur l'état de rotor peut être obtenue par le biais des énergies relatives aux détails issus de la décomposition par TO.

III.5.1 La puissance du MAS à l'état sain avec forte charge

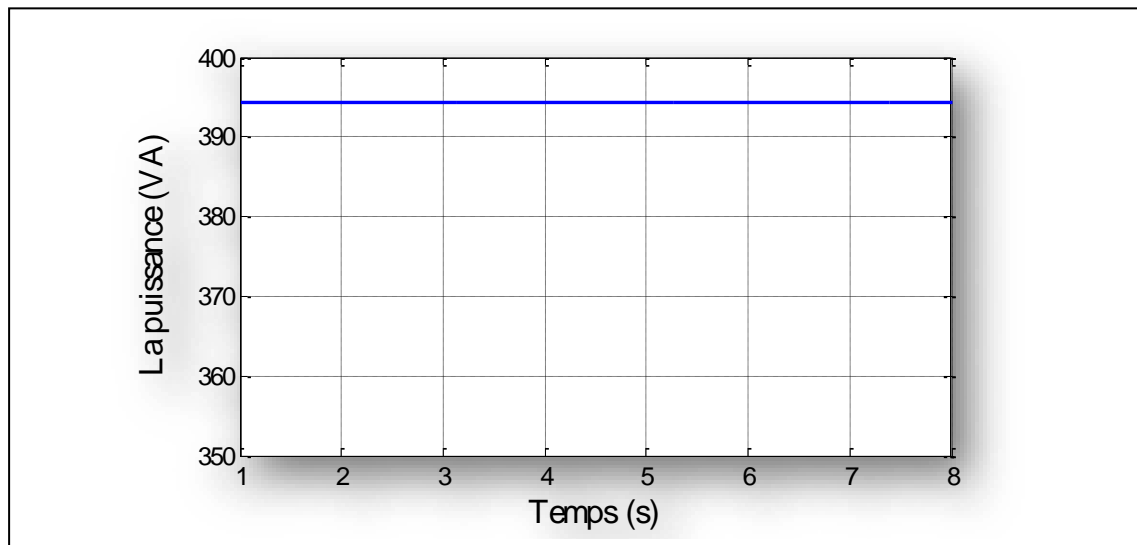


Figure III.3 La puissance pour l'état sain avec forte charge.

La figure (III.3) montre la puissance pour l'état sain avec forte charge qui varie par rapport au temps. On remarque que le tracé de la puissance est une ligne continue c'est-à-dire la puissance dans le régime permanent est constante.

III.5.2 La puissance du MAS à l'état défectueux pour différentes barres cassées avec différentes charges

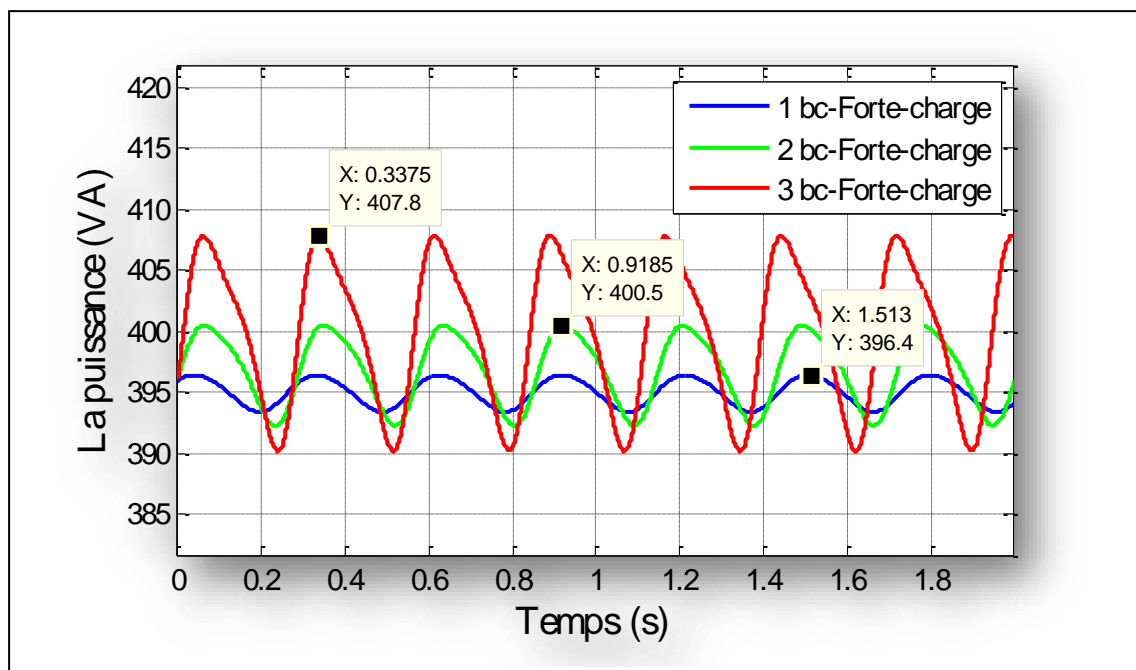


Figure III.4 Les variations de la puissance du MAS pour différentes barres cassées avec forte charge.

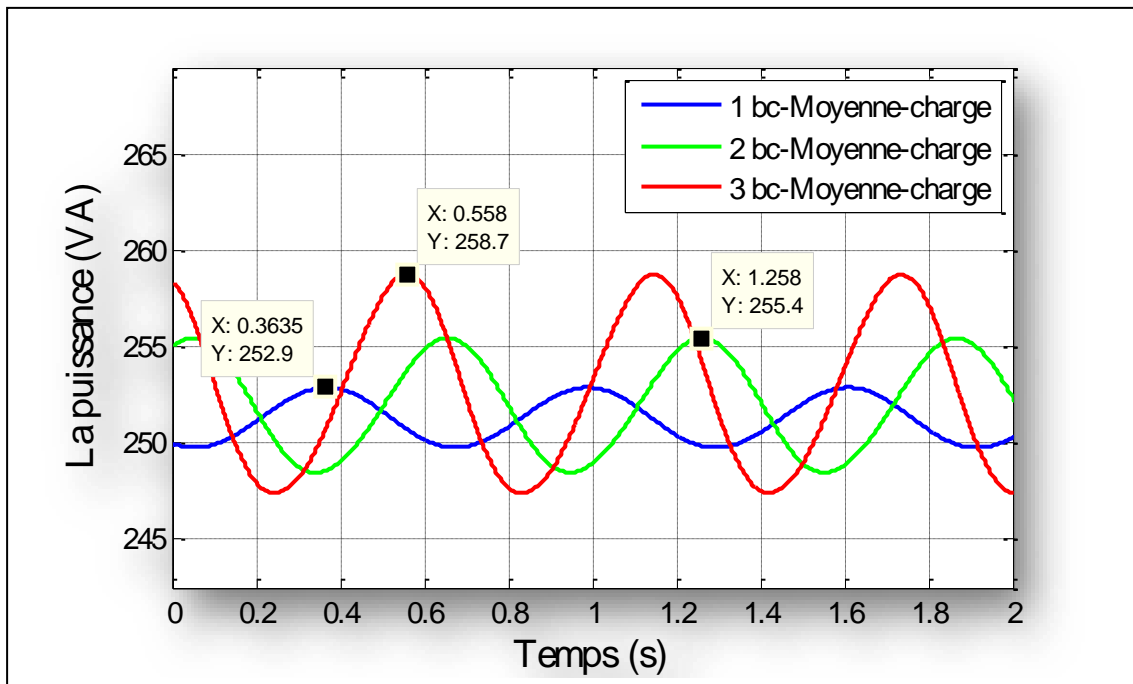


Figure III.5 Les variations de la puissance du MAS pour différentes barres cassées avec moyenne charge.

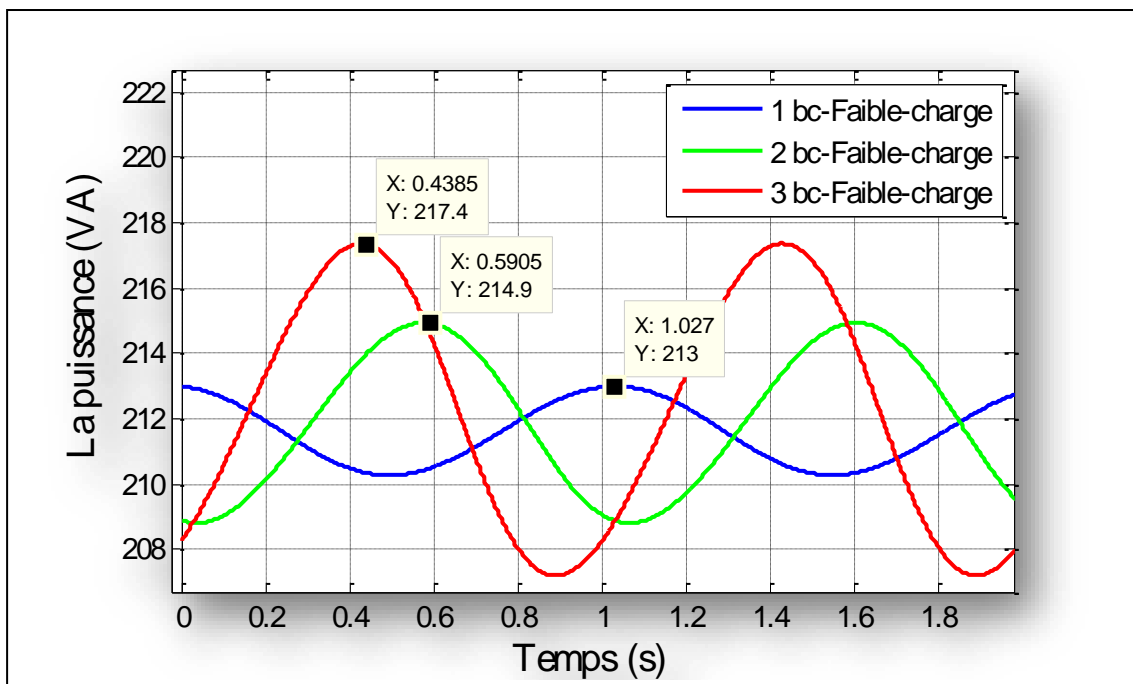


Figure III.6 Les variations de la puissance du MAS pour différentes barres cassées avec faible charge.

Les figures (III.4-6) montrent la puissance du MAS à l'état défectueux pour différentes barres cassées et avec différentes charges. On remarque une variation ondulé de la

puissance à l'état défectueux par rapport à l'état sain, l'amplitude de l'ondulation est proportionnelle à sévérité du défaut et de l'intensité de la charge alors que le nombre des ondulations est proportionnelle à l'importance de la charge.

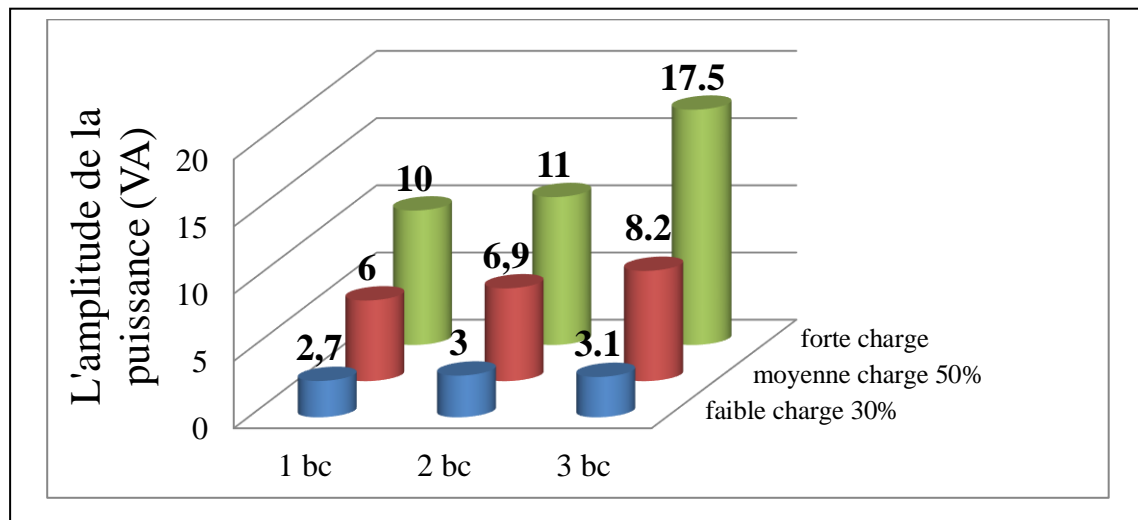


Figure III.7 Graphique des changements d'amplitude de la puissance du MAS pour différents défauts avec différentes charges.

La figure (III.7) montre l'amplitude de la puissance du MAS à l'état défectueux pour différentes barres cassées et avec différentes charges. L'amplitude de la puissance de MAS est proportionnelle à sévérité du défaut et de l'intensité de la charge.

III.6 Application de la transformation de Fourier rapide (TFR)

III.6.1 Spectre de courant statorique (i_a) du MAS

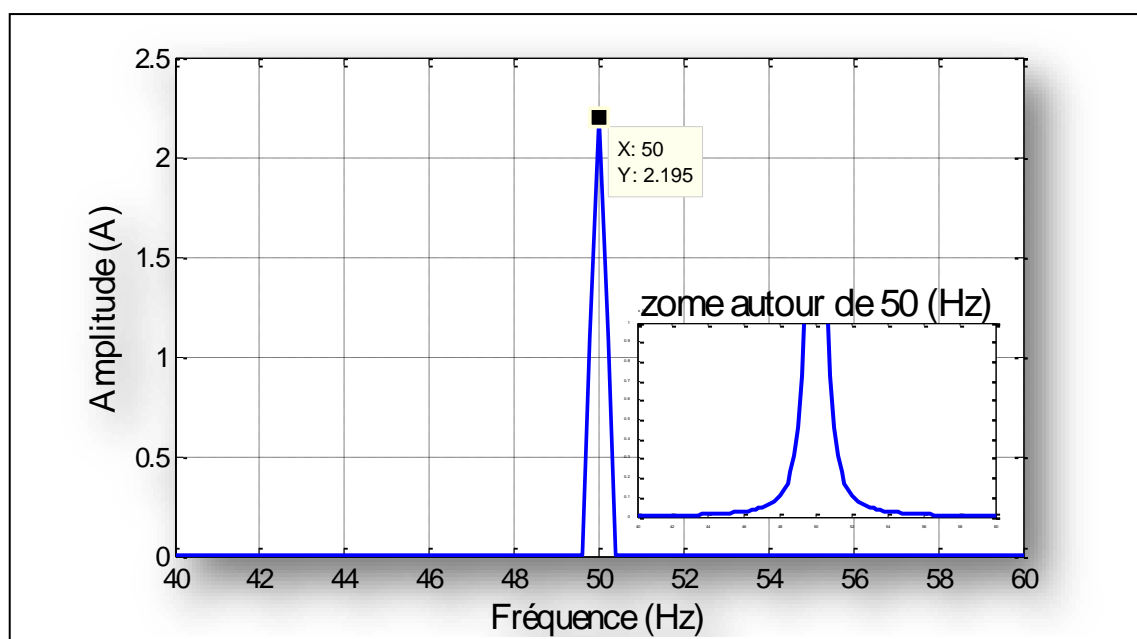


Figure III.8 Spectre de courant statorique (i_a) à l'état sain avec fort charge.

La figure (III.8) représente le spectre de courant statorique (i_a) à l'état sain avec forte charge. On remarque que le spectre de courant statorique (i_a) ne contient pas des harmoniques autour de la fréquence fondamentale 50 Hz.

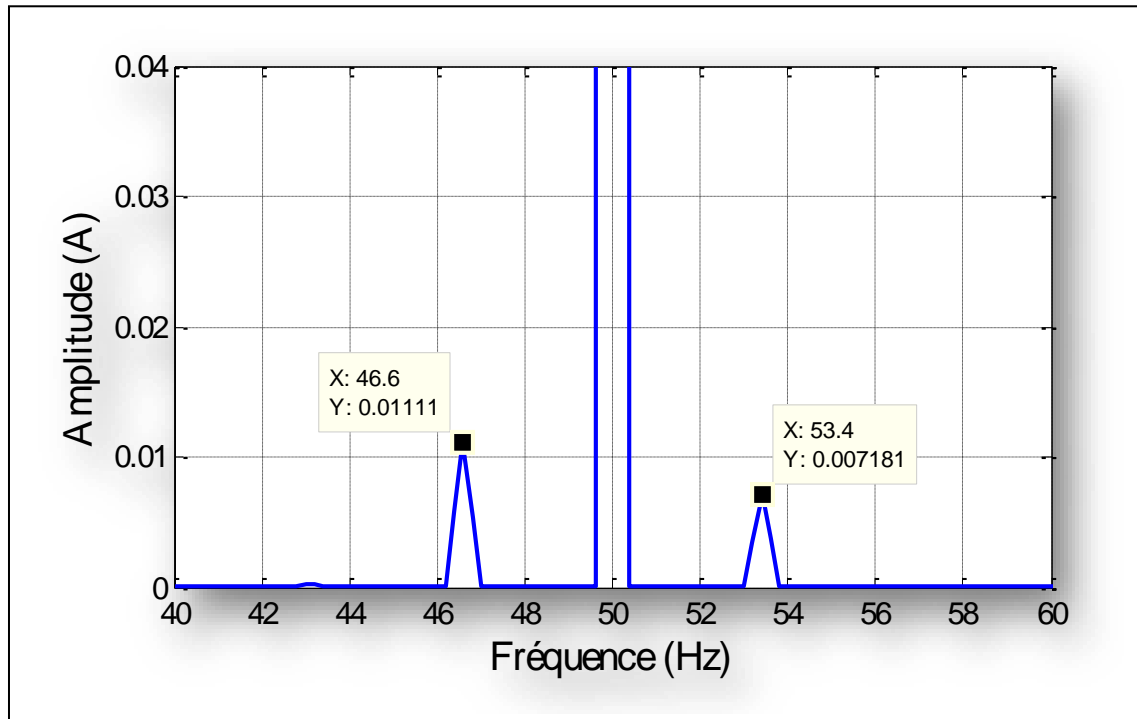


Figure III.9 Spectre de courant statorique (i_a) pour une barre cassée avec forte charge.

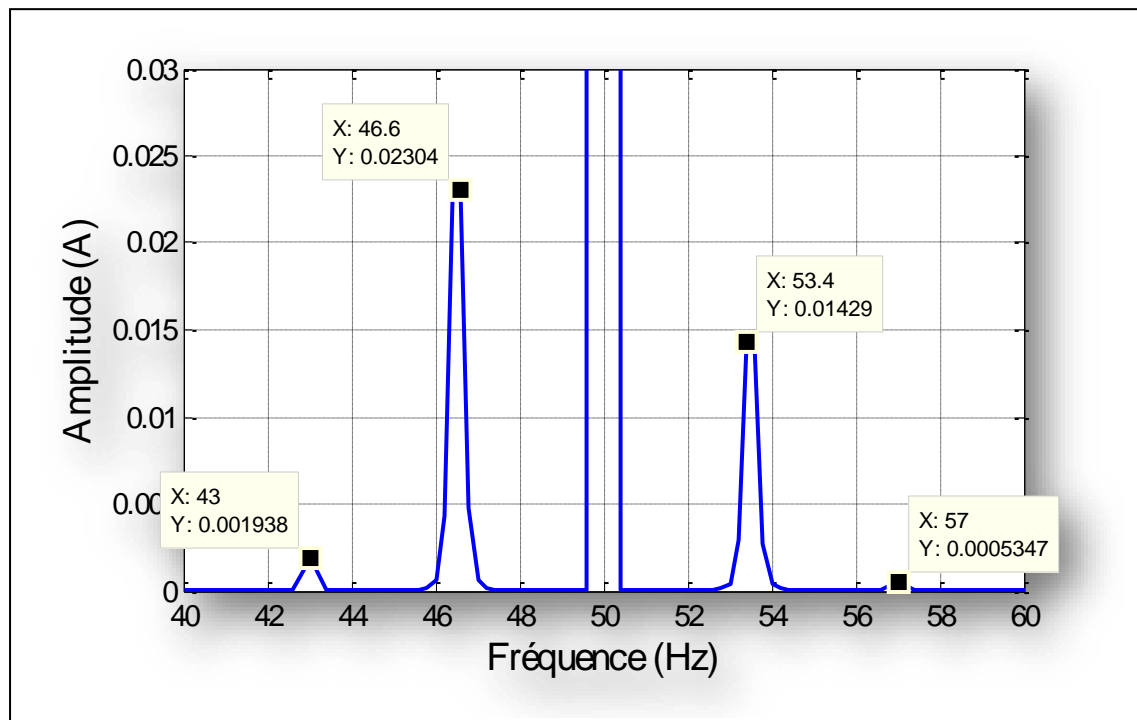


Figure III.10 Spectre de courant statorique (i_a) pour deux barres cassées avec forte charge.

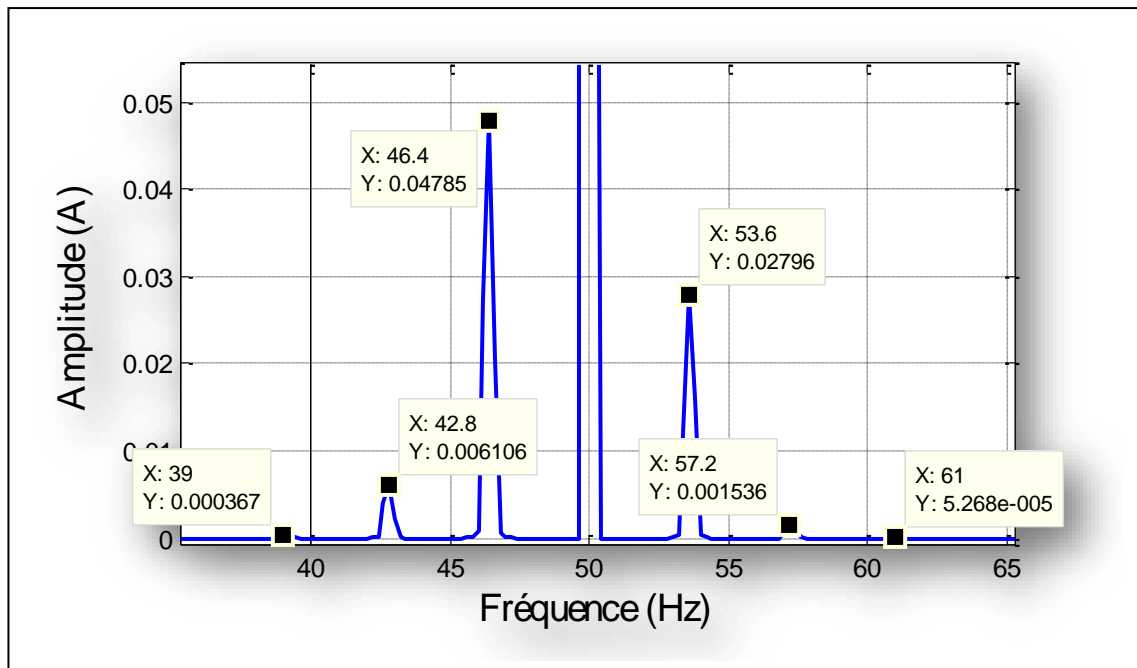


Figure III.11 Spectre de courant statorique (ia) pour trois barres cassées avec forte charge.

Les figures (III.9-11) montrent le spectre de courant statorique ia (A) à l'état défectueux pour différentes barres cassées et avec différents charges. On constate que les amplitudes des harmoniques indicatrices de défaut des barres cassées augmentent avec la sévérité de défaut et aussi avec l'augmentation de la charge.

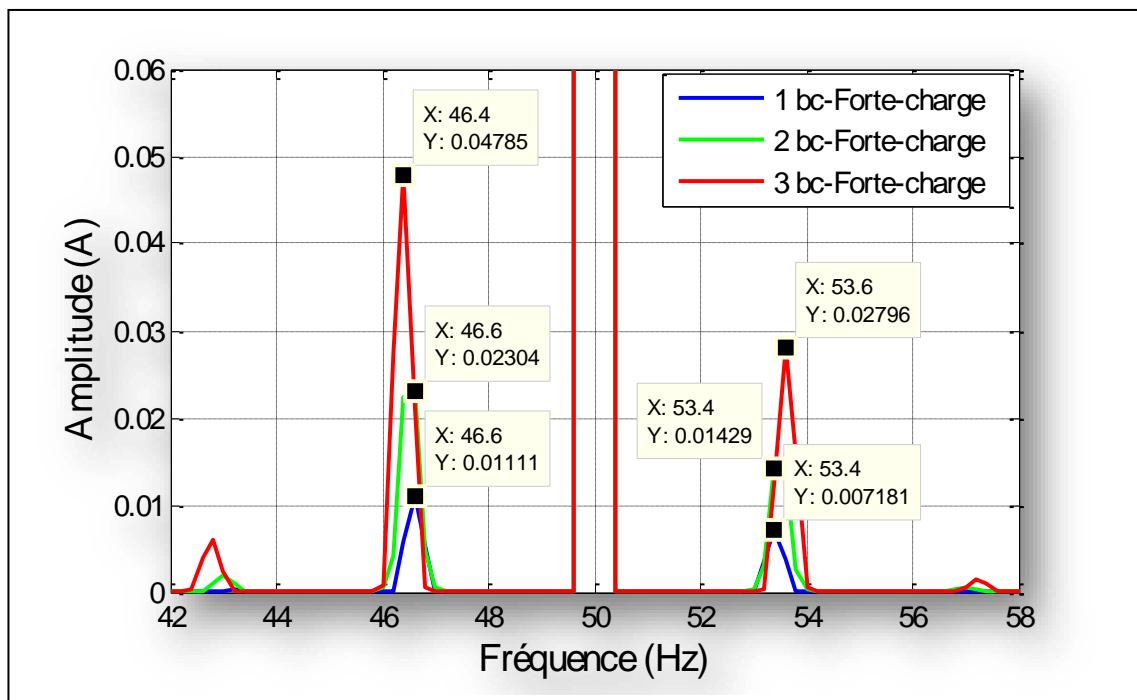


Figure III.12 Spectre (avec zoom) du courant statorique (ia) pour différentes barres cassées avec forte charge.

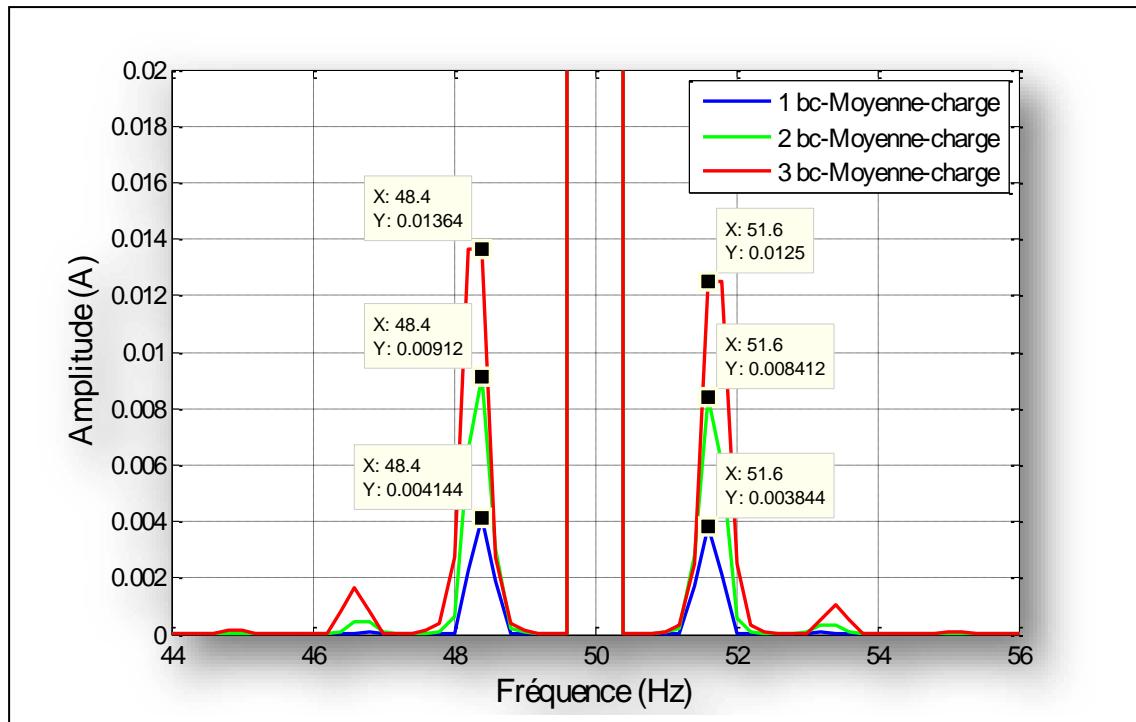


Figure III.13 Spectre (avec zoom) du courant statorique (ia) pour différentes barres cassées avec moyenne charge.

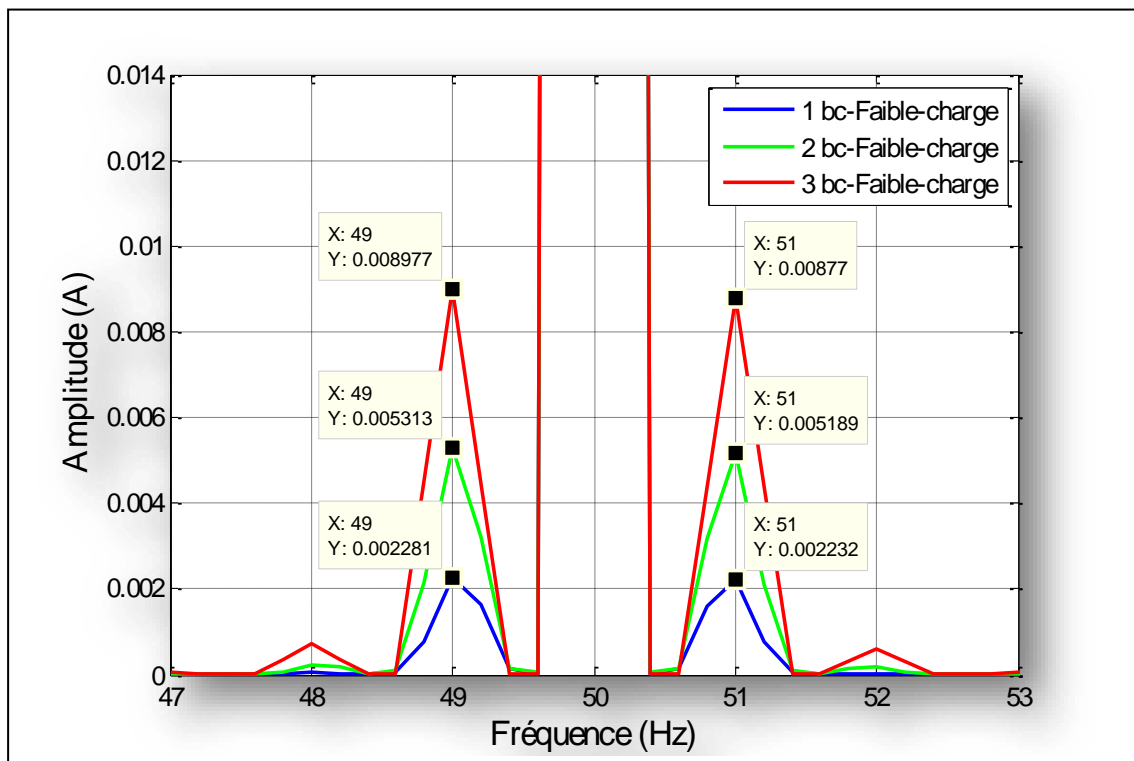


Figure III.14 Spectre (avec zoom) du courant statorique (ia) pour différentes barres cassées avec faible charge.

Les figures (III.12-14) montrent le spectre du courant statorique (ia) pour différents défauts avec différentes charges. La superposition des trois spectres montre de manière remarquable l'effet de la charge sur les fréquences et l'amplitude des harmoniques de défauts. En effet, plus la charge augmente plus la fréquence de défaut s'éloigne de la fondamentale et son l'amplitude augmente.

III.6.2 Spectre de la puissance du MAS

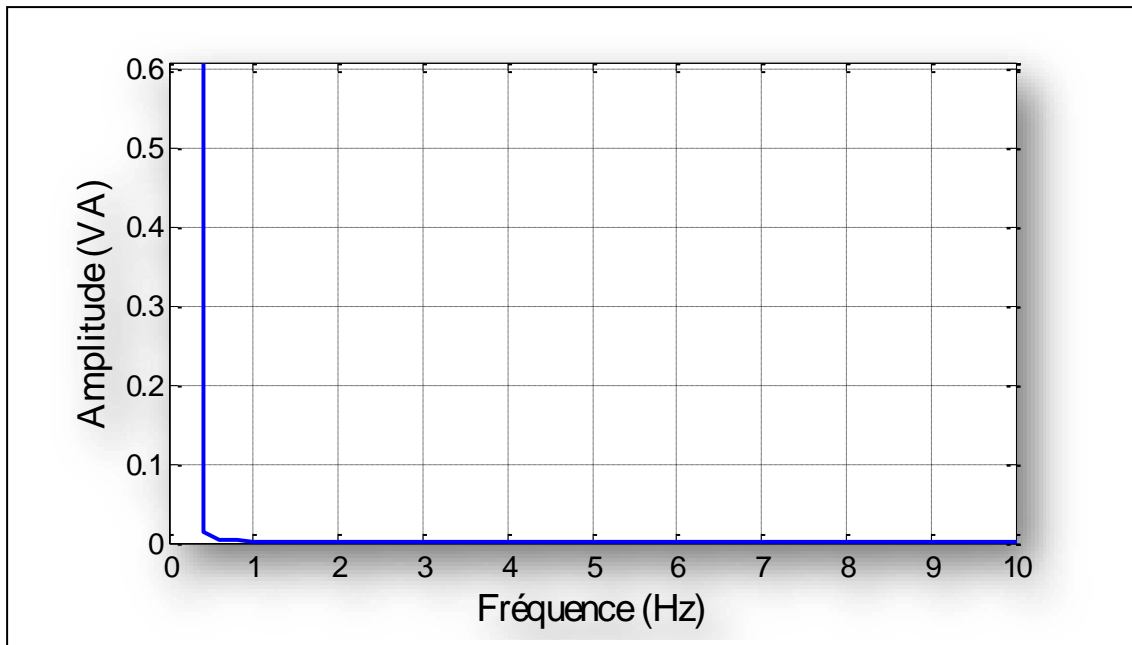


Figure III.15 Spectre de la puissance du MAS à l'état sain avec forte charge.

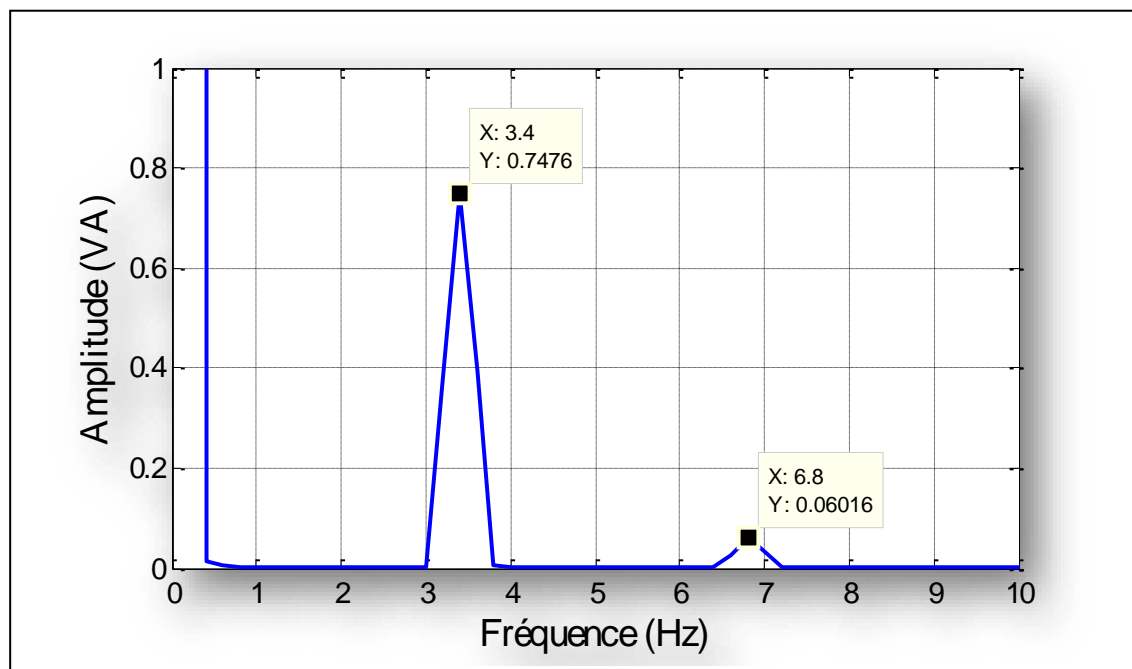


Figure III.16 Spectre de la puissance du MAS pour une barre cassée avec forte charge.

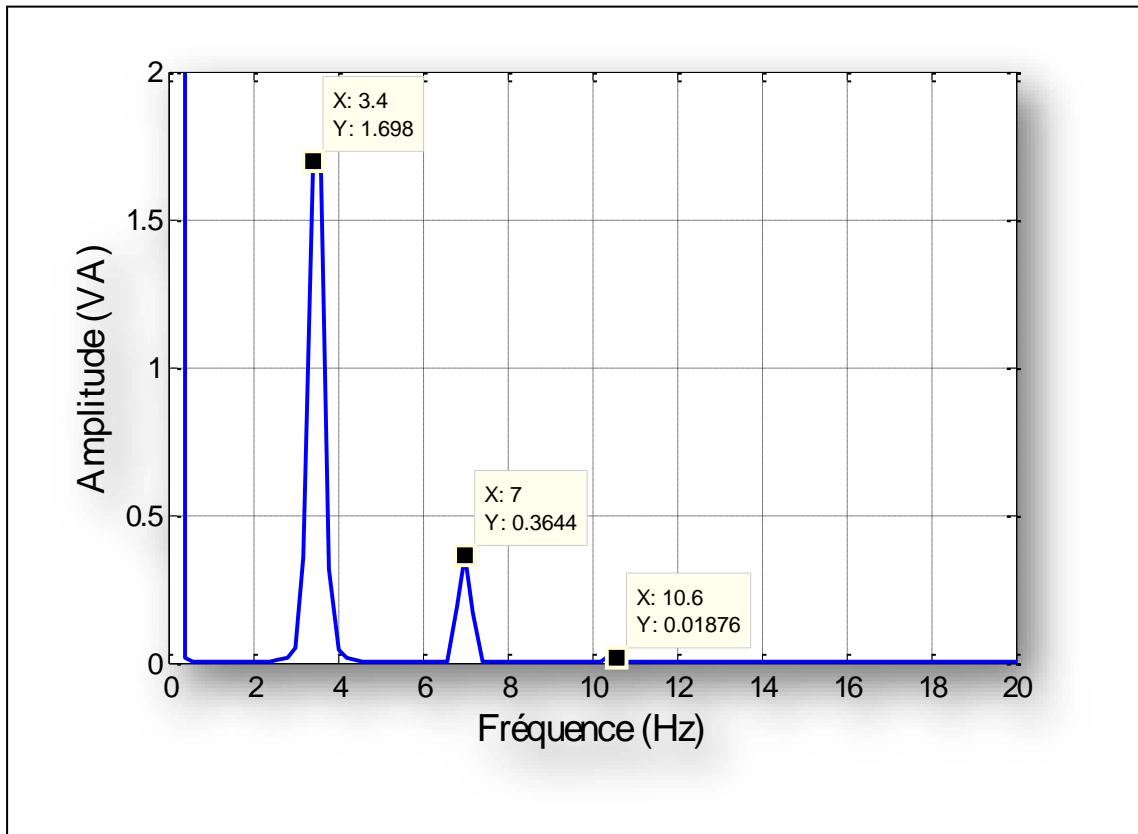


Figure III.17 Spectre de la puissance du MAS pour deux barres cassées avec forte charge.

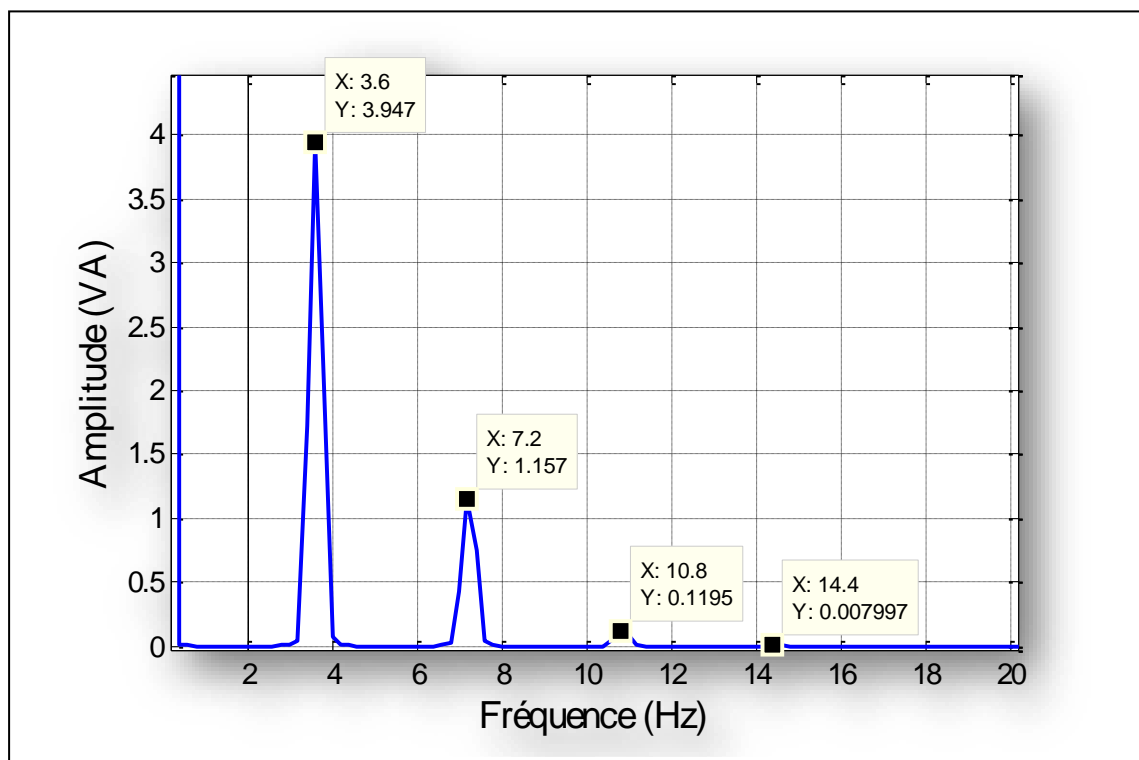


Figure III.18 Spectre de la puissance du MAS pour trois barres cassées avec forte charge.

La figure (III.15) représente le spectre de la puissance du MAS à l'état sain avec forte charge. On remarque que le spectre de la puissance ne contient pas des harmoniques.

Les figures (III.16-18) montrent le spectre de la puissance de MAS à l'état défectueux pour différents défauts avec une forte charge. On constate que plus le nombre de barres augmente plus l'amplitude de l'harmonique caractéristique de défaut augmente, aussi on remarque l'apparition de nouveaux harmoniques.

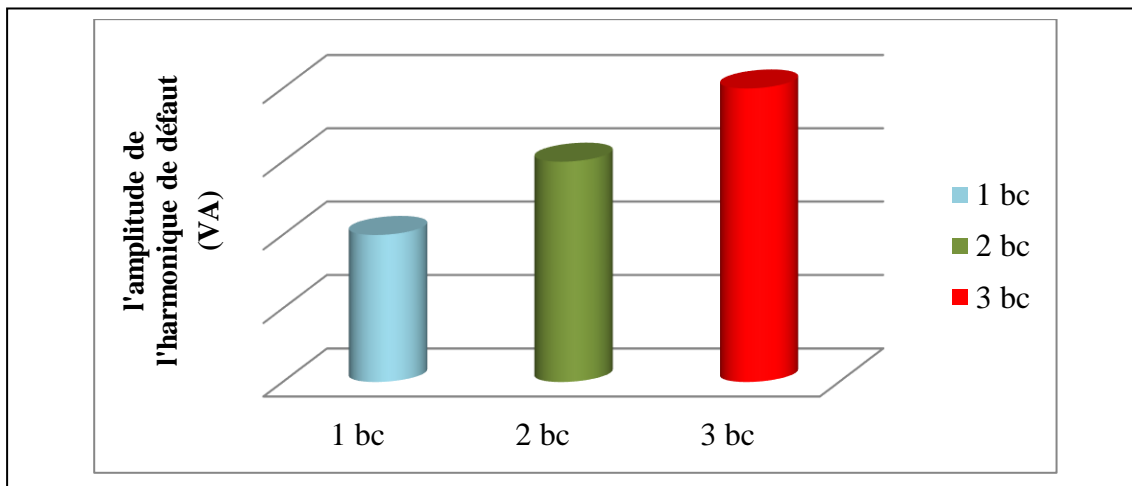


Figure III.19 Graphique de l'amplitude de l'harmonique de défaut pour différentes barres cassées avec forte charge.

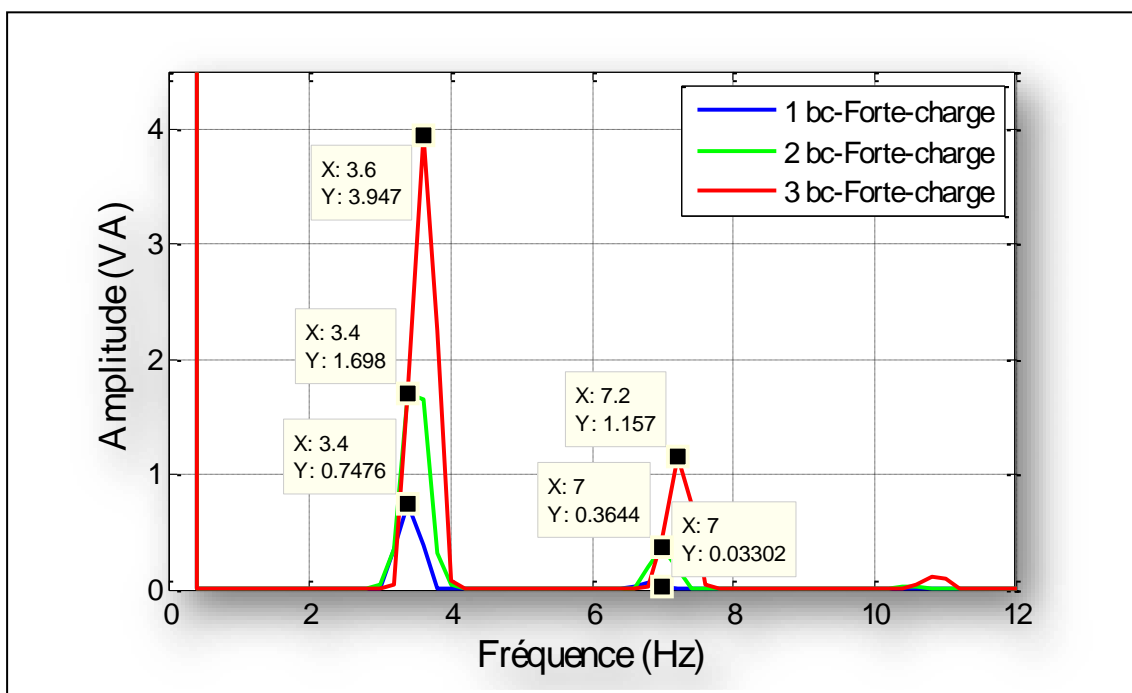


Figure III.20 Spectre (avec zoom) de la puissance du MAS pour différentes barres cassées avec forte charge.

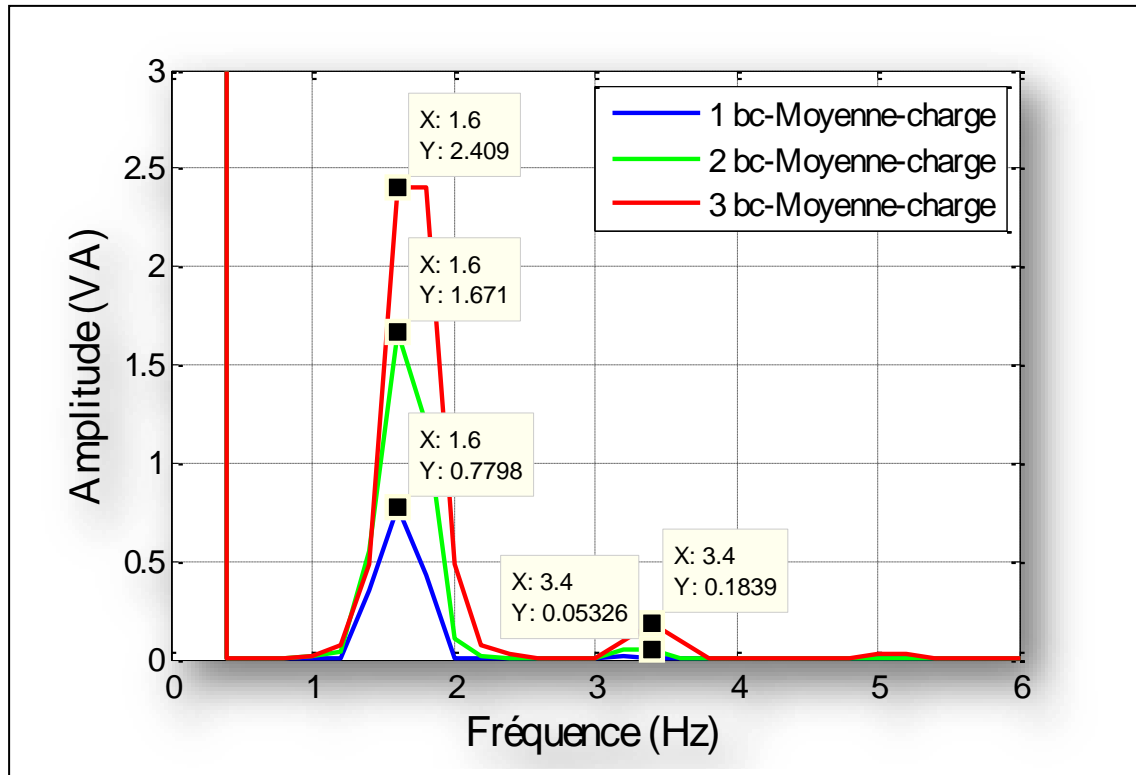


Figure III.21 Spectre (avec zoom) de la puissance du MAS pour différents barres cassées avec moyenne charge.

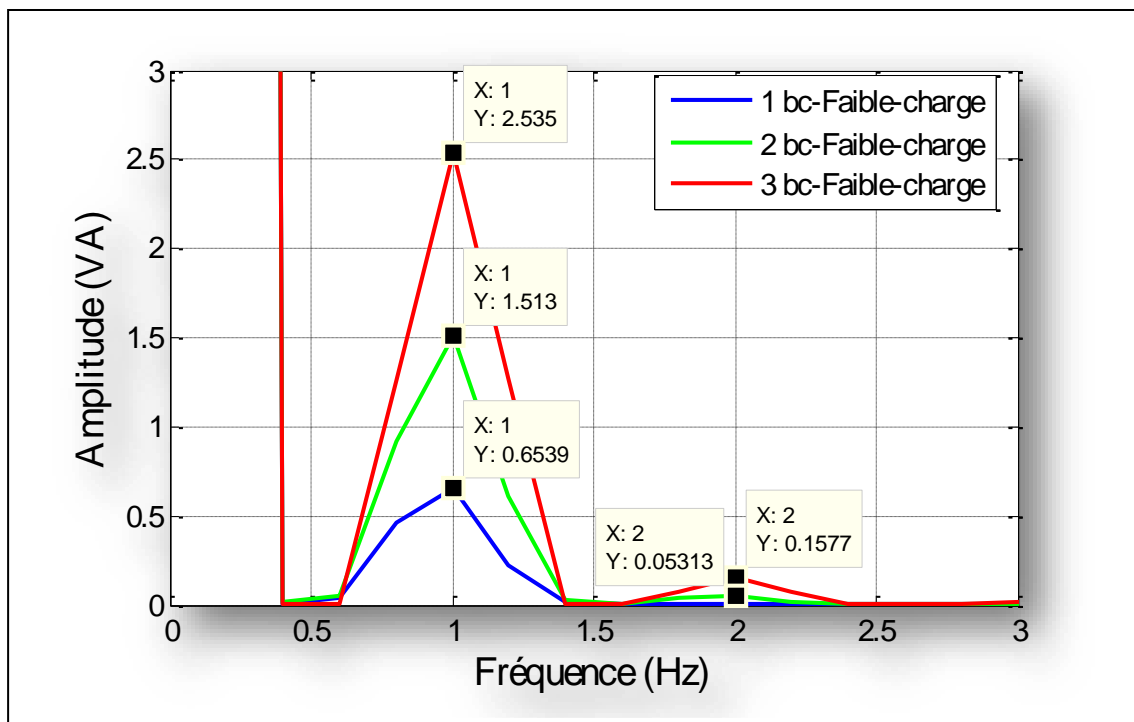


Figure III.22 Spectre (avec zoom) de la puissance du MAS pour différentes barres cassées avec faible charge.

Les figures (III.20-22) représentent les spectres de la puissance du MAS pour différentes barres cassées avec même charge. La superposition des trois spectres montre de manière remarquable l'effet de la charge sur les fréquences et l'amplitude des harmoniques de défauts. En effet, plus la charge augmente plus la fréquence de s'éloigne de zéro et son amplitude augmente.

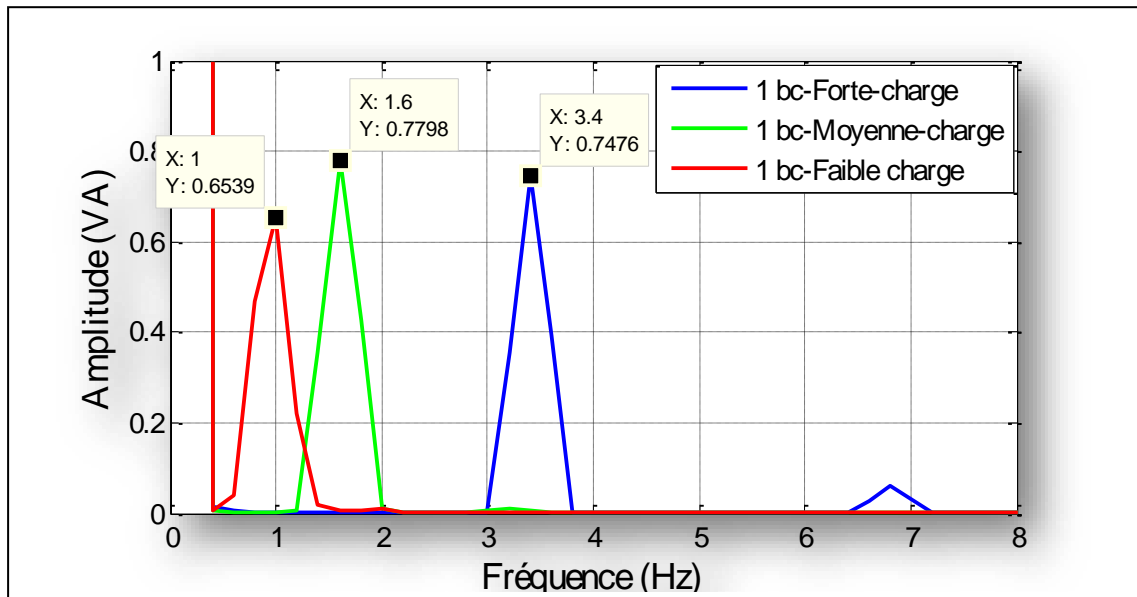


Figure III.23 Spectre (avec zoom) du la puissance du MAS pour une barre cassée avec différentes charges.

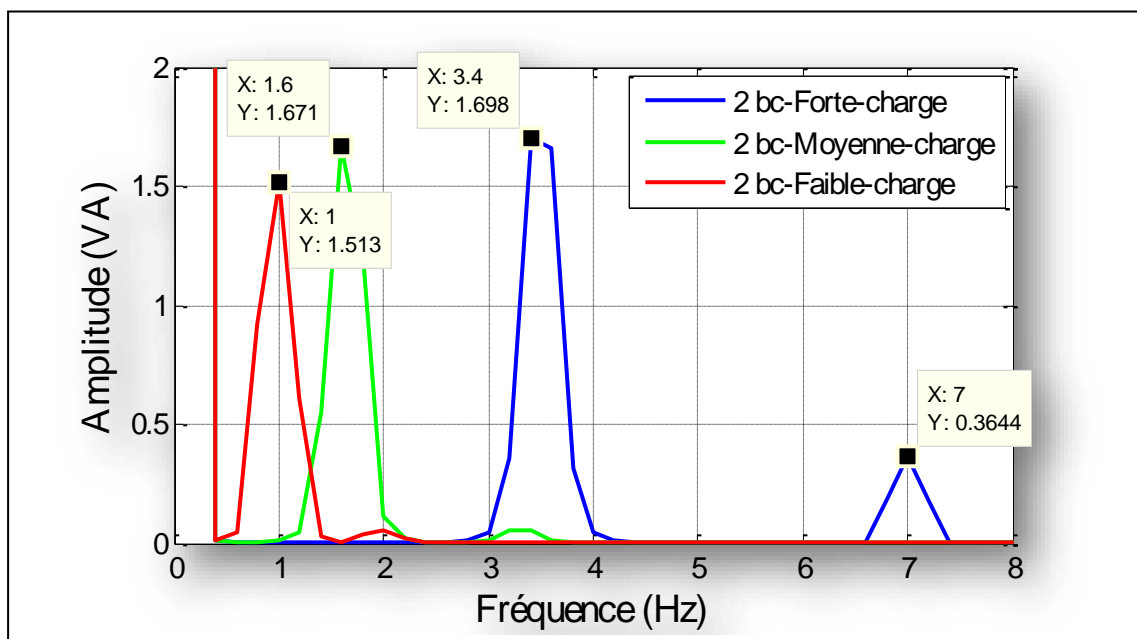


Figure III.24 Spectre (avec zoom) du la puissance du MAS pour deux barres cassées avec différentes charges.

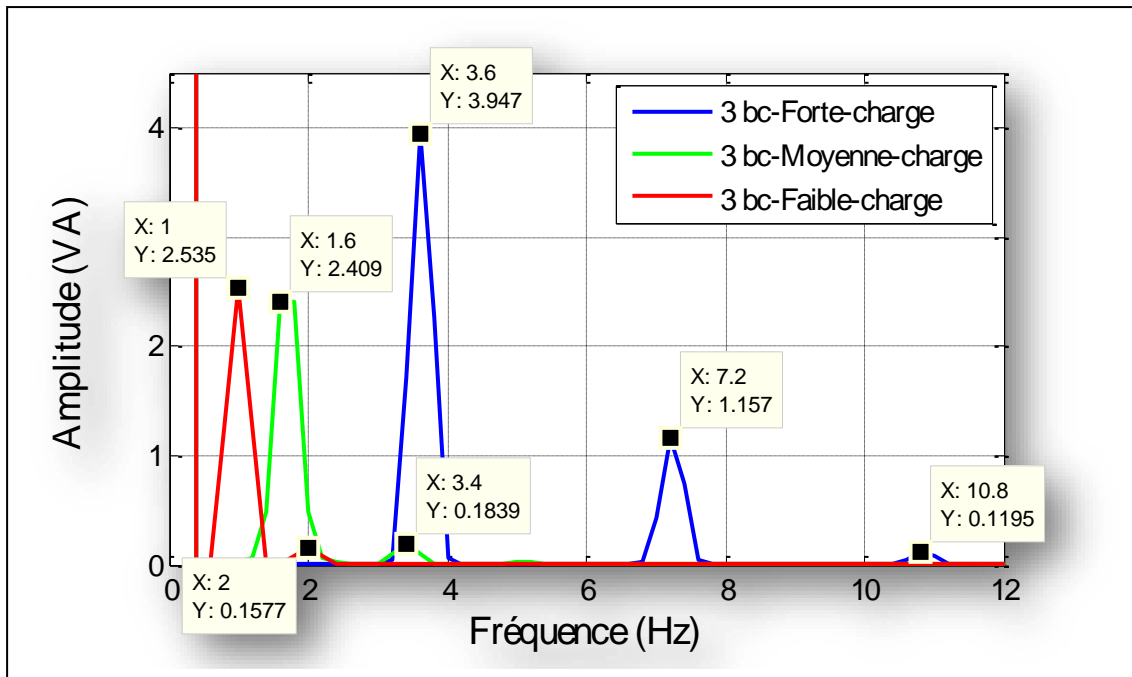


Figure III.25 Spectre (avec zoom) de la puissance du MAS pour trois barres cassées avec différentes charges.

Les figures (III.23-25) représentent spectres de la puissance du MAS pour même barre cassée avec différentes charges. La superposition des trois spectres montre de manière remarquable l'effet de la charge sur les fréquences des harmoniques pour la barre cassée, plus la charge augmente plus la fréquence de défaut s'éloigne de zéro.

III.7 Application de la transformation en ondelettes discrète (TOD)

III.7.1 Signaux d'approximation et de détails de la puissance du MAS

On utilise db44 au niveau 12 (les bandes fréquentielles des signaux de décomposition) pour tracer les signaux d'approximation et détails de la puissance du MAS à l'état sain et l'état défectueux pour différents défauts avec différentes charges.

Tableau III.2 Bandes fréquentielles des signaux de décomposition.

Signal	Bande fréquentielle (Hz)
A12	0 - 1
D12	1 - 2
D11	2 - 4
D10	4 - 8

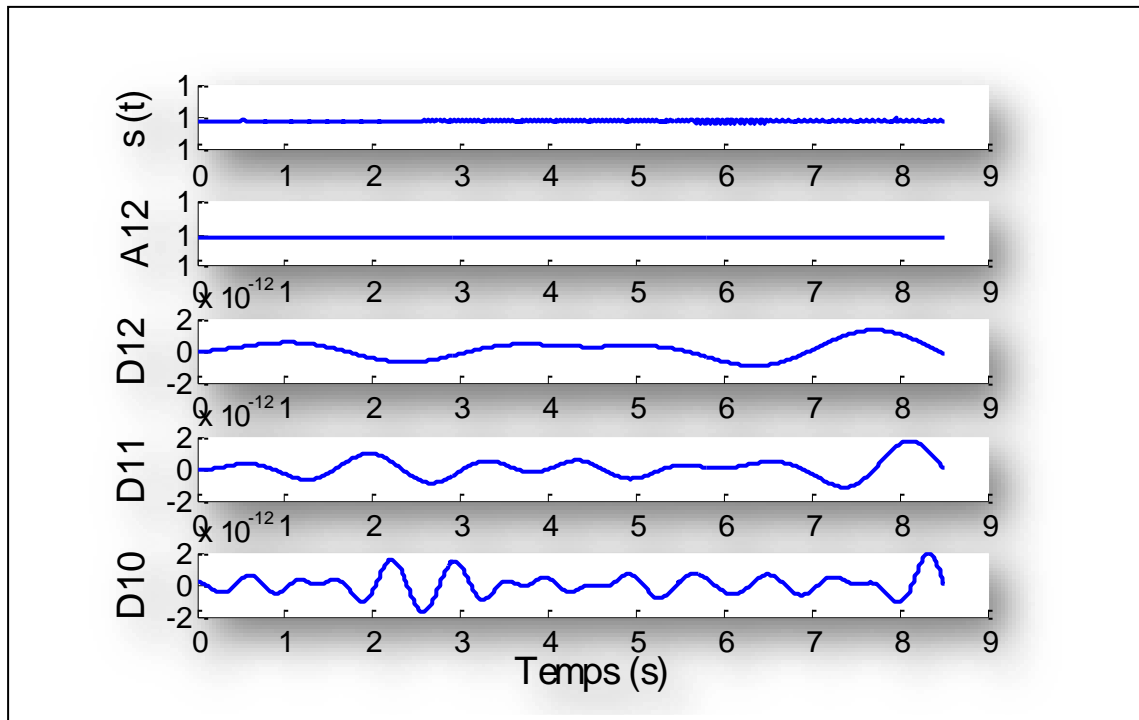


Figure III.26 Signaux d'approximation et de détails de la puissance du MAS à l'état sain avec forte charge.

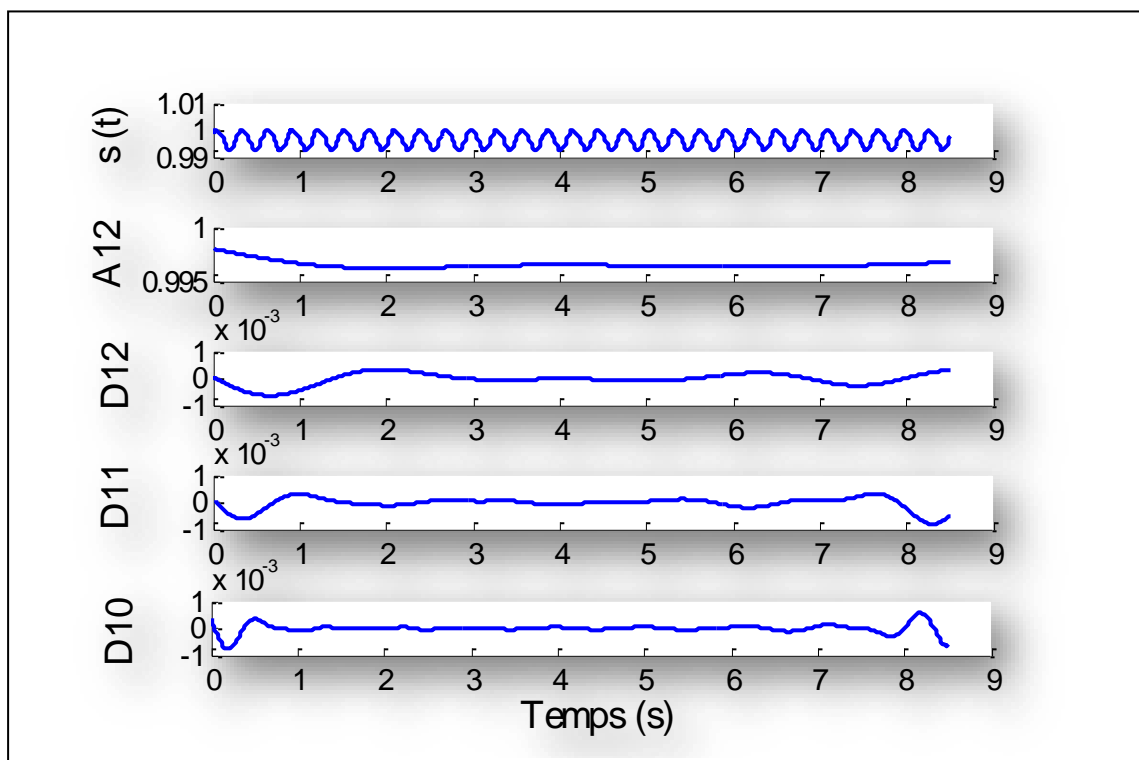


Figure III.27 Signaux d'approximation et de détails de la puissance du MAS pour une barre cassée avec forte charge.

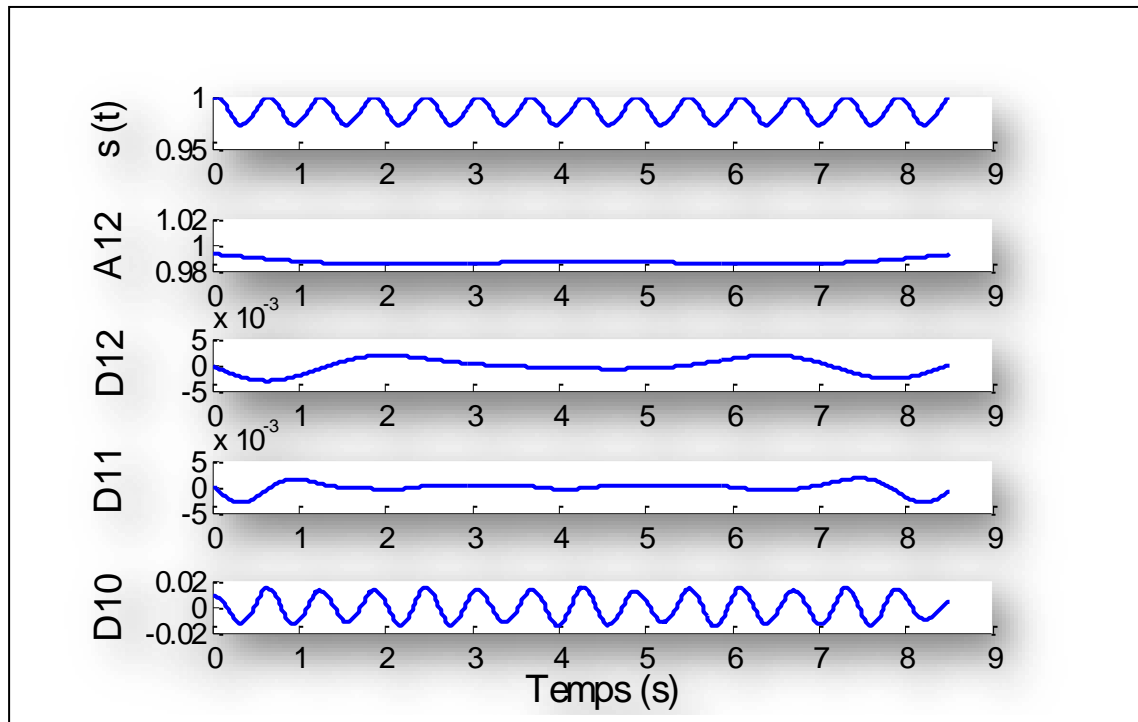


Figure III.28 Signaux d'approximation et de détails de la puissance du MAS pour deux barres cassées avec moyenne charge.

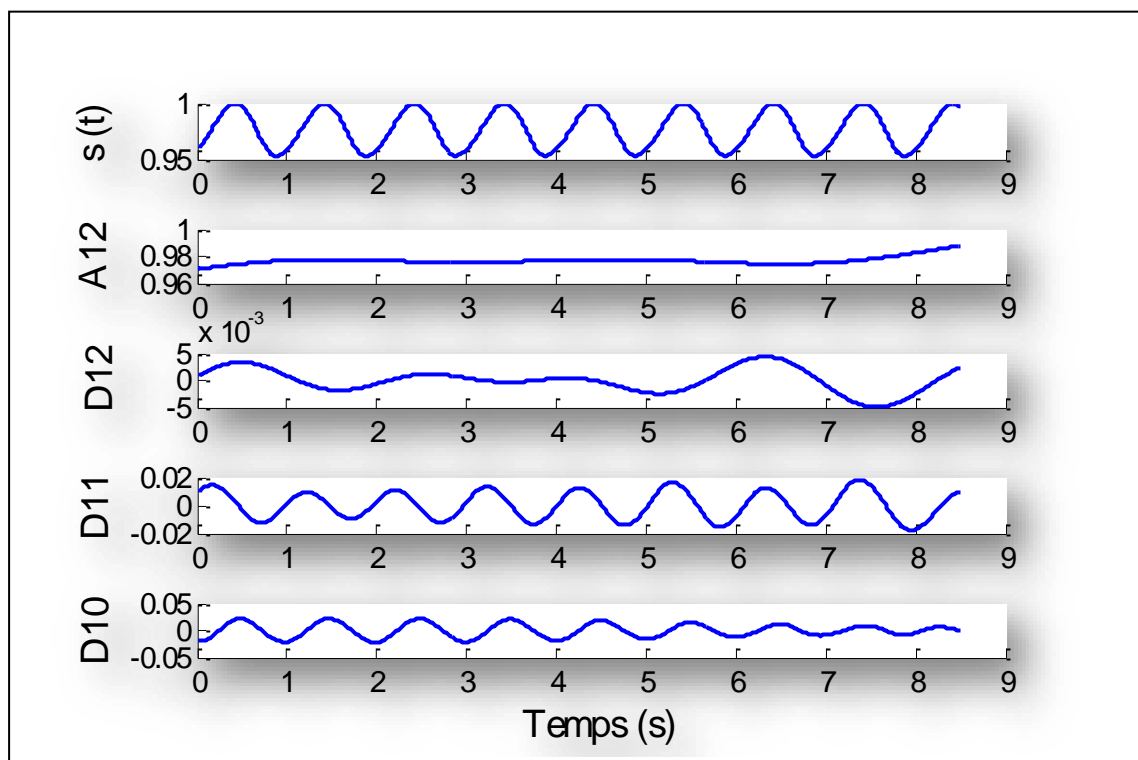


Figure III.29 Signaux d'approximation et de détails de la puissance du MAS pour des trois barres cassées avec faible charge.

La figure (III.26) montre de signaux d'approximation et de détails de la puissance du MAS à l'état sain avec forte charge. On remarque que les signaux de puissance du MAS et d'approximation A12 sont constants. On constate d'ondulation pour les signaux des détails d10, d11 et d12.

Les figures (III.27-29) représentent des signaux d'approximations et de détails de la puissance du MAS pour différentes barres cassées avec faible charge. On remarque une variation ondulé de la puissance à l'état défectueux par rapport à l'état sain.

III.8 Énergie des signaux de détails

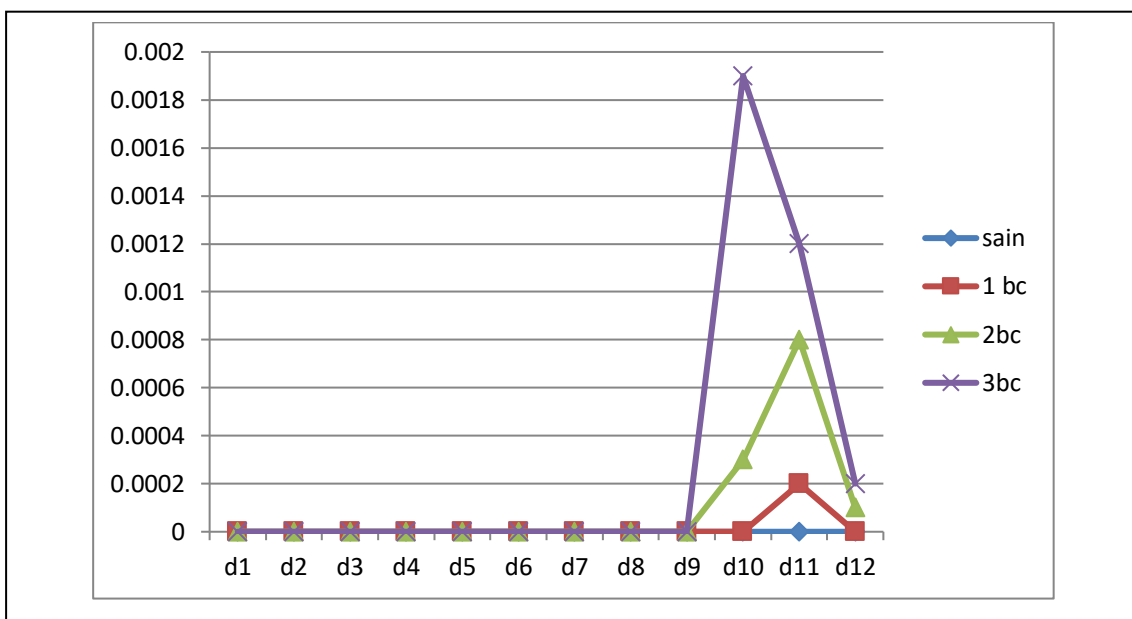


Figure III.30 Énergie de détails pour l'état sain et défectueux avec faible charge.

D'après les résultats présentés à la figure (III.30) on remarque que les signaux de détails les plus pertinents sont d10, d11 et d12.

On calcule les énergies de l'ensemble des signaux de détails d10, d11 et d12 dans l'état sain et l'état défectueux avec différentes charges.

Tableau III.3 L'énergie pour l'état sain.

L'état	La charge	Énergie
Sain	Faible charge 30%	3.1258 e - 022
	Moyenne charge 50%	2.8636 e - 023
	Forte charge	1.0671 e - 023

Tableau III.4 L'énergie pour une barre cassée.

L'état	La charge	Énergie
1bc	Faible charge 30%	2.4613 e - 04
	Moyenne charge 50%	6.6642 e - 04
	Forte charge	4.8814 e - 04

Tableau III.5 L'énergie pour deux barres cassées.

L'état	La charge	Énergie
2bc	Faible charge 30%	0.0013
	Moyenne charge 50%	0.0033
	Forte charge	0.0021

Tableau III.6 L'énergie pour trois barres cassées.

L'état	La charge	Énergie
3bc	Faible charge 30%	0.0038
	Moyenne charge 50%	0.009
	Forte charge	0.0061

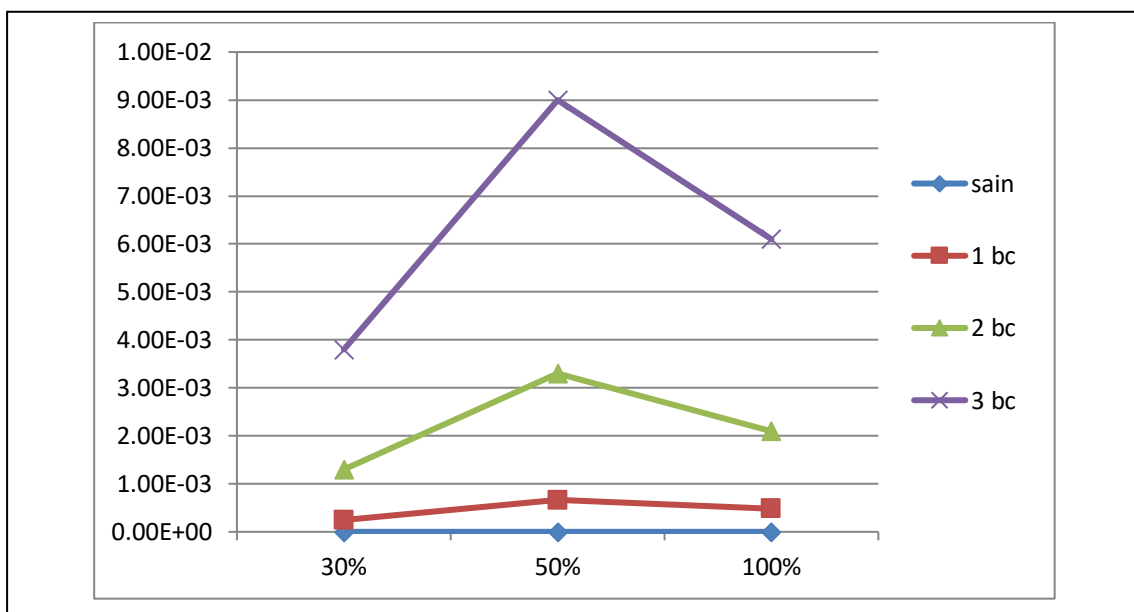


Figure III.31 Les énergies de l'ensemble des signaux de détail d10, d11 et d12 dans l'état sain et l'état défectueux avec différentes charges.

Les résultats présentes aux tableaux (III.3-6) et la figure (III.31) montre l'énergie pour l'état sain et l'état défectueux (une, deux et trois barres cassées) et avec différentes charges. On remarque que l'énergie relative à ces trois signaux augmente avec l'augmentation de défaut ce qui montre l'efficacité de ce critère à discerner entre les différents états sain et défectueux.

III.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons utilisé la technique des ondelettes pour le diagnostic de défauts de barres cassées du MAS. Nous avons exploité la puissance apparente du MAS car elle contient l'information sur les trois courants statoriques ainsi que sur les tensions d'alimentation. Après la décomposition de signal traité, il s'est avéré que le signaux de détails emportent l'information nécessaire au diagnostic de défauts de cassure de barres. Les résultats trouvés montrent l'efficacité et l'utilité de cette méthode (TOD) à diagnostiquer les défauts de cassures de barres.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur le diagnostic des défauts de cassure de barres rotoriques dans la machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil en utilisant la transformée en ondelettes discrète (TOD).

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les principaux éléments constitutifs de la machine asynchrone à cage, les différents défauts de cette machine avec leurs causes, les différentes méthodes de détection de défauts ainsi que quelques techniques de traitement de signal.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté un modèle permettant la simulation de la machine asynchrone triphasée à cage avec défaut rotorique. Les résultats de simulation montrent la puissance de ce modèle de bien modéliser et simuler les défauts de cassure de barres rotoriques.

Au début du troisième chapitre, nous avons exposé le principe de la transformation en ondelettes (TO). Ensuite, nous avons utilisé cette technique pour le diagnostic de défaut de cassure de barres rotoriques dans un moteur asynchrone triphasé à cage. Les résultats obtenus sont satisfaisants.

Bibliographie

- [1] : **H.CHERIF**, “ Détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone en utilisant l’analyse par FFT et ondelettes ”, thèse de magister, Université de Biskra -Algérie, 2014.
- [2] : **SAHRAOUI Mohamed**, “ Étude Comparative des Méthodes de Diagnostic des Machines Asynchrones ”, thèse de doctorat, Université de Mohammed Khaidher, Biskra, 2009/2010.
- [3] : **A. Ghouggal**, “ Diagnostic de la machine asynchrone triphasée : modèle dédié à la détection des défauts ”, mémoire de magister, Université de Batna, 2005.
- [4] : **M.A. Abed**, “ Contribution à L’étude et au Diagnostic de la Machine Asynchrone”’, Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, mars 2002.
- [5] : **Noureddine BESSOUS**, “ Contribution Au Diagnostic Des Machines Asynchrones ”, diplôme de magister en Electrotechnique, Université MENTOURI de CONSTANTINE.
- [6] : **A. Bouguerne**, “ Diagnostic automatique des défauts des moteurs asynchrones ”, Mémoire Magister, Université de Constantine, 2009.
- [7] : **I. Boldea, S. A. Nasar**, “ The Induction Machine Handbook ”, CRC Press LLC, 2002.
- [8] : **E. SCHAEFFER**, “ Diagnostic des machines asynchrones modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défauts ”, thèse de doctorat, Université De Nantes, 1999.
- [9] : <http://www.moteurs-reducteurs-pompes.com/p/bobinages/bobinages-de-moteurs-asynchrones/>, 16/04/2019, 11:57 PM.
- [10] : **OUMAAR Mohamed El Kamel**, “ Surveillance et diagnostic des défauts rotoriques de la machine à induction avec différents types d’alimentation ”, thèse de doctorat, Université MENTOURI – CONSTANTINE, 2010.
-

-
- [11] : **L. Kerszenbaum et C. F. Landy**, “ The existence of large inter bar currents in the three phase squirrel cage motors with rotor-bar and en-ring faults”, IEEE Transactions on Power Apparatus Systems, Vol. PAS-103, n°7, pp.1854- 1862, July 1984.
- [12] : <http://www.la-toile-electrique.com/moteurs-asynchrones-fonctionnement>, 16/04/2019, 00:11 PM.
- [13] : <https://fr.demotor.net/moteurs-electriques/moteurs-ac/moteur-asynchrone/rotor-de-cage-d-ecureuil>, 16/04/2019, 00:20 PM.
- [14] : **Ahmed zerrouk**, “ Diagnostic des défauts de cassure de barres rotoriques dans la machine asynchrone triphasée “, thèse de master, de Mohammed Khaidher Biskra, 2012/2013.
- [15] : <https://www.abmoutillages.com/flasque-de-moteur/2741-flasque-avant-de-moteur-dt80k4.html>, 02/03/2019, 02:55 AM.
- [16] : <http://trends.directindustry.fr/lyc-bearing-corporation/project-71526-121506.html>, 02/03/2019, 03:05 AM.
- [17] : <https://www.miniplanes.fr/electrique-/accessoires-electrique/arbre-moteur-dualksyxm5050-p-48509.html>, 02/03/2019, 03:18 AM.
- [18] : **Riguet abd elwahab**, “ Diagnostic de défauts de la machine asynchrone par analyse spectrale des courants (iid, iiq) de Park ”, mémoire de master Université de Mohammed Khaidher Biskra, dimanche 24 juin 2018.
- [19] : <https://fr.wikihow.com/contr%C3%B4ler-un-moteur-%C3%A9lectrique>, 10/03/2019, 08:53 PM.
- [20] : **S. Grubic and al**, “ A Survey on Testing and Monitoring Methods for Stator Insulation Systems of Low-Voltage Induction Machines Focusing on Turn Insulation Problems “, IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 55, no. 12, December 2008, pp. 4127-4136.
- [21] : <https://www.easa.com/taxonomy/term/2>, 10/03/2019, 9:00 PM.
- [22] : <https://www.easa.com/resources/booklet/typical-failures-three-phase-stator-windings>, 10/03/2019, 9:04 PM.
-

-
- [23] : **A. Menacer**, " Contribution à l'identification des paramètres et des états d'une machine à induction pour diagnostic et développement de commande robuste/robustesse vis-à-vis de défauts ", thèse de doctorat, Université de Batna, Décembre 2007.
- [24] : <https://link.springer.com/article/10.1186/s10033-018-0279-5>, 16/04/2019/, 06:20PM .
- [25] : <https://www.lumberjocks.com/gfixler/blog/11982>, 16/04/2019, 06 :49 PM .
- [26] : **N. Lahcène**, " Diagnostic de défauts au rotor d'une machine asynchrone à cage d'écureuil ", mémoire de magister, Mai-2005.
- [27] : **R. Casimir**, " Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes ", thèse de l'Ecole Centrale de Lyon, CEGELY, 2003.
- [28] : **J. A. Antonino-Daviu, M. Riera-Guasp, J. R. Folch, M. P. M. Palomares**, " Validation of a New Method for the Diagnosis of Rotor Bar Failures via Wavelet Transform in Industrial Induction Machines ", IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 42, No. 4, pp. 990-996, Jul./Aug.2006.
- [29] : **E.S. Hamdi**, " Contribution au Diagnostic d'une Machine Asynchrone Triphasée à Cage", thèse de doctorat, Université de Biskra, Algérie, 2006.
- [30] : **G. Didier**, " Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances ", thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 2004.
- [31] : **A. J. L. Cardoso and al**, " Computer-aided detection of air gap eccentricity in operating three-phase induction motors by park's vector approach ", IEEE Trans. on Ind. App., Vol. 29, No. 5, pp. 897-901, Sept./Oct. 1993.
- [32] : **F. Zidani and al**, " Induction Motor Stator Faults Diagnosis by a Current Concordia Pattern Based Fuzzy Decision System ", IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 18, no. 4, pp. 469-475, Dec. 2003.
- [33] : **E. Oran Brigham**, " Fast Fourier transform and its applications", Prentice Hall, 1988.
- [34] : **S. G. Malat**, " A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation ", IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.2, No.7, Jul.1989.
-

-
- [35] : **R. Polikar**, “ The wavelet tutorial “, Available: <http://users.rowan.edu/polikar/wavelets/wttutorial.html>.
- [36] : **A. H. Bonnett, 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, pp. 921-937, Jul/Aug. 1992.
- [37] : **Bouzida Ahcene**, “ Diagnostic de défauts de la machine asynchrone à cage par la technique des Ondelettes “, thèse de magister, Ecole Nationale Polytechnique d’Alger, 2008.
- [38] : **X. Luo, Y. Liao, H. A. Toliyat, A. El-Antably, T. A. Lipo**, “ Multiple Coupled Circuit Modeling of Induction Machines “, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 31 n°2, pp 311-318, Mar/Apr 1995.
- [39] : **L. Noureddine**, “ Diagnostic de Défauts au Rotor d’une Machine Asynchrone à Cage d’Ecureuil “, mémoire de Magister, département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, Mai 2005.
- [40] : **R. Abdelli**, “ Perturbations Singulières Appliquées au Modèle de Machine Asynchrone avec Défauts au Stator et au Rotor “, thèse de Magister, département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, Juillet 2007.
- [41] : **Touhami Omar, Noureddine Lahcène, Ibtouen Rachid, Fadel Maurice**, “ Modeling of the Induction Machine for the Diagnosis of Rotor Defects. Part. I: An Approach of Magnetically Coupled Multiple Circuits “, IEEE-IECON’05, Industrial Electronics Society, pp.1580-1587, 2005.
- [42] : **H. Razik, G.Didier**, “ Notes de cours sur le diagnostic de la machine asynchrone “, Notes de cours, I.U.F.M. de Lorraine, Maxeville, 7 janvier 2003.
- [43] : **Y. Khaled**, “ Contribution au Diagnostic de la Machine Asynchrone Triphasée par une Approche signal “, thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra 2010.
- [44] : **S.G. Mallat**, “ A wavelet tour of signal processing “, second ed, Academic Press, 1998.
- [45] : **J. Morlet**, “ Sampling theory and wave propagation” , Acoustic Signal/Image Processing And Recognition, Springer-Verlag, Vol. F1, NATO ASI, pp. 233–261, 1983.
-

- [46] : **R. Polikar**, “ The wavelet tutorial “, Available : <http://users.rowan.edu/polikar/wavelets/wttutorial.html>
- [47] : **E. Ritchie, X. Deng**, “ Dynamic model of three-phase squirrel cage induction motors with rotor faults “, in Proceeding of ICEM94, B.6 Modelling and Simulation, Paris, France, pp. 694-698, 1994.
- [48] : **R. Polikar**, “ The wavelet tutorial “, Available : <http://users.rowan.edu/polikar/wavelets/wttutorial.html>
- [49] : **S. G. Malat**, “ A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation “, IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 2, No. 7, Jul. 1989.
- [50] : **J. A. Antonino-Daviu, M. Riera-Guasp, J. R. Folch, M. P. M. Palomares**, “ Validation of a New Method for the Diagnosis of Rotor Bar Failures via Wavelet Transform in Industrial Induction Machines ”, IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 42, No. 4, pp. 990 996, Jul./Aug.2006.
- [51] : **S. H. Kia, H. Henao, G. A. Capolino**, “ Diagnosis of broken-bar fault in induction machines using discrete wavelet transform without slip estimation ”, IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 45, No. 4, pp. 107– 121, Jul/ Aug. 2009.

Annexe

Les paramètres de la machine asynchrone triphasée utilisée dans les essais de simulation sont :

Puissance nominale	450 (kW)
Fréquence nominale	50 (Hz)
Nombre de paire de pôles	1
Nombre de barres du rotor	27
Nombre des encoches du stator	193
Rayon de l'entrefer	0.0375 (m)
Épaisseur de l'entrefer	0.00038 (m)
Resistance de phase statorique	4.1(Ω)
Moment d'inertie	0.0045 (kg. m ²)