

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique d'Alger



Département de Génie Electrique
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique

Mémoire de Magister

Présenté Par

BOUZIDA AHCENE

(Ingénieur de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger)

Thème

DIAGNOSTIC DE DEFAUTS DE LA MACHINE ASYNCHRONE A CAGE
PAR LA TECHNIQUE DES ONDELETTES

Soutenue publiquement le 20 Janvier 2008 devant le jury d'examen composé de :

Président :	IBTIOUEN Rachid	Professeur à l'ENP
Directeur du Mémoire :	TOUHAMI Omar	Professeur à l'ENP
Examineurs :	BELOUHRANI Adel	Professeur à l'ENP
	MEKHTOUB Said	Maître de conférences à l'ENP
	TAHMI Redouane	Maître de conférences à l'ENP

إهداء

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

﴿ رَبِّ أَوْزِعْنِي أَنْ أَشْكُرَ نِعْمَتَكَ الَّتِي أَنْعَمْتَ عَلَيَّ وَعَلَىٰ وَالِدَيَّ وَأَنْ أَعْمَلَ

صَالِحًا تَرْضَاهُ وَأَدْخِلْنِي بِرَحْمَتِكَ فِي عِبَادِكَ الصَّالِحِينَ ﴾

أهدي هذا العمل المتواضع

إلى الذين كانا السبب في وجودي، و سندا لجهودي

والدي العزيزين حفظهما الله وأطال في عمرهما

إلى إخوتي مصطفى، خالد وحمود

إلى أخواتي حفيظة، فاطمة وزهية

إلى الغالية راضية التي قاسمتني هذا العمل

إلى جميع أهلي وزملائي في الدراسة

إلى كل من نسيه قلبي ولم ينسأه قلبي

Remerciements

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire de Magister ont été effectués au sein du Laboratoire de Recherche en Electrotechnique (L.R.E) de Génie Électrique de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger (ENP).

*Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à Monsieur **TOUHAMI Omar**, Professeur à l'ENP et directeur de ce mémoire. Pour m'avoir encadré durant ma préparation de ce mémoire. Sa grande disponibilité, sa grande vivacité et son engagement scientifique m'ont aidé à me dépasser durant ces années.*

*Je remercie également Monsieur **IBTIOUEN Rachid**, Professeur à l'ENP, pour l'intérêt qu'il a porté au travail effectué en acceptant d'être président du jury de ce mémoire.*

*Merci à Monsieur **MEKHTOUB Said**, Maître de conférences à l'ENP, à Monsieur **BELOUHRANI Adel**, Professeur à l'ENP et à Monsieur **TAHMI Redouane**, Maître de Conférences à l'ENP, pour avoir accepté de participer à ma soutenance en tant qu'examineurs.*

*J'adresse mes respectueux remerciements à Monsieur le Professeur **Mourice FADEL**, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure (ENSEEIHT) de TOULOUSE qui a bien voulu m'accepter dans son laboratoire.*

*Je tiens à présenter mes vifs remerciements aux personnes qui m'ont aidé durant ma préparation du mémoire surtout **HAMDANI Samir** Maître assistant à l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène (USTHB).*

*Merci aussi à tous mes collègues et amis de l'Ecole Nationale Polytechnique et de la cité universitaire **BOURAOUI** (surtout : **NAIM**, **SOFIANE** et **AHCENE**) et Je leur exprime ma profonde sympathie et leur souhaite beaucoup de chance pour leurs travaux.*

Nomenclature

Liste des symboles

- g : Glissement.
- p : Nombre de paires de pôles de la machine.
- N_r : Nombre de barres rotoriques.
- m : Nombre de phases statoique.
- μ_o : Perméabilité magnétique de l'entrefer.
- l : Longueur du rotor.
- r : Rayon moyen de l'entrefer.
- λ : Permittivité de l'entrefer.
- N_s : Nombre de spires par phase statorique.
- g_e : Epaisseur de l'entrefer.
- J_t : Moment d'inertie de la machine.
- f_v : Coefficient de frottement visqueux.
- k_d : Coefficient de distribution.
-
- R_s : Résistance d'un enroulement statorique.
- R_{bk} : Résistance d'une barre rotorique k .
- R_{ak} : Résistance de la portion d'anneau de court circuit k .
- R_r : Résistance rotorique équivalente (ramenée au stator).
- $[R_s]$: Matrice des résistances statoriques.
- $[R_r]$: Matrice des résistances rotoriques.
-
- $L_{f s_i s_i}$: Inductance de fuite statorique
- $L_{m s_i s_i}$: Inductance de magnétisation des enroulements statoriques.
- $M_{s_i s_j}$: Mutuelle inductance entre deux phases statoriques i et j .
- L_{b_k} : Inductance de fuite d'une barre rotorique k ;
- L_{a_k} : Inductance de fuite du segment d'anneau de court-circuit k ;

- L_{kk} : Inductance propre de chaque maille rotorique.
- L_{ki} : Inductance mutuelle entre la $k^{\text{ème}}$ maille et la $i^{\text{ème}}$ maille du rotor.
- L_{ai} : Inductance mutuelle entre la phase statorique a et la $i^{\text{ème}}$ maille rotorique.
- $L_{f_{S_i S_i}}$: Inductance de fuite statorique.
- $L_{f_{b_k}}$: Inductance de fuite de la barre k .
- L_{mb} : Inductance de magnétisation rotorique.
- $[M_{sr}]$: Matrice des mutuelles inductances stator rotor.
- f : Fréquence électrique des grandeurs statoriques (fréquence du réseau).
- f_r : Fréquence électrique des grandeurs rotoriques.
- θ : Position du rotor par rapport au stator.
- θ_s : Angle électrique statorique.
- θ_r : Angle électrique rotorique.
- φ : Position angulaire le long de la surface intérieure du stator.
- α_r : Angle entre deux phases rotoriques.
- ω_s : Pulsation électrique des grandeurs statoriques.
- ω_r : Pulsation électrique des grandeurs rotoriques.
- Ω_s : Vitesse angulaire synchrone.
- Ω_r : Vitesse angulaire rotorique.
- $[V_s]$: Vecteur tension statorique.
- $v_{s_a}, v_{s_b}, v_{s_c}$: Tensions aux bornes des phases a, b, c respectivement.
- $[V_r]$: Vecteur tension rotorique.
- $[I_s]$: Vecteur courant statorique.

i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} : Courants qui parcourent les enroulements a, b, c respectivement.

$[I_r]$: Vecteur courant rotorique.

i_{bk} : Courant traversant la ($k^{\text{ème}}$) barre rotorique.

$[j_{r_1} \ j_{r_2} \ \dots \ j_{r_k} \ \dots \ j_{r_{N_r}} \ j_{r_{cc}}]$: Courant dans les mailles rotoriques.

$j_{r_{cc}}$: Courant traversant l'anneau de court circuit.

$[\Phi_s]$: Vecteur flux total statorique.

$[\Phi_r]$: Vecteur flux rotorique.

$\phi_{r1} \dots \phi_{rN_r}$: Flux rotoriques dans les mailles du rotor.

g^{-1} : Fonction inverse de l'entrefer.

N_i : Fonction de l'enroulement i .

W_{co} : Co-énergie magnétique.

C_{em} : Couple électromagnétique.

C_r : Couple de charge.

Grandeurs liés à l'application de la théorie des ondelettes :

$L^2(R)$: Espèce vectoriel des fonction mesurables, carrées et intégrables dans l'axe des réels R .

ψ : Ondelette mère

ϕ : Fonction d'échelle

s : Paramètre d'échelle.

u : Paramètre de translation.

$Wf(s,u)$: transformée en ondelettes de la fonction f .

C_ψ : Coefficient de l'ondelette mère ψ .

$\hat{f}(\omega)$: Transformée de Fourier de la fonction f .

$\hat{\psi}$: Transformée de Fourier de la fonction ψ .

η : centre des fréquence.

$\xi = \eta/s$: centre de fréquence délaté.

- $P_{wf}(u, \xi)$: Scalogramme d'un signal f .
- $Sf(u, \xi)$: Transformée de Fourier fenêtrée de la fonction f .
- $h(n)$: Filtre passe bas
- $h(g)$: Filtre passe haut
- $H(z)$: Transformée en z de $h(n)$
- CA : Coefficient ondelette d'approximation.
- CD : Coefficient ondelette de détail.
- A_i : Signal d'approximation au niveau i .
- D_i : signal de détail au niveau i .
- F_{TOD} : Transformée en ondelettes discrète.
- E_j : valeur propre d'énergie.
- T : Vecteur des valeurs propres d'énergie.
- f_e : Fréquence d'échantillonnage.
- f_e : Fréquence du réseau
- N_e : nombre d'échantillons.
- R : Résolution en fréquence.
- n_{LS} : niveau de décomposition.

Liste des figures :

- I.1 : Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil. (page 4)
- I.2 : Stator d'une machine asynchrone base tension. (Page 5)
- I.3 : Rotor à cage d'écureuil. (Page 6)
- I.4 : Sources de défauts de machine asynchrone à cage. (Page 8)
- I.5 : Plupart de défauts de la machine asynchrone et leurs causes. (Page 9)
- I.6 : Quatre types de défauts dans les roulements à billes. (Page 10)
- I.7 : Dimensions d'un roulement billes. (Page 11)
- I.8 : Différents types de la dissymétrie de l'entrefer. (Page 13)
- I.9 : Excentricité dynamique et statique. (Page 14)
- I.10 : Rotor à cage d'écureuil. (Page 15)
- I.11 : Rupture d'une barre et anneau de court-circuit. (Page 16)
- I.12 : Cas d'une rupture réelle des barres rotoriques. (Page 16)

- II.1 : Structure adoptée pour modéliser le stator. (Page 20)
- II.2 : Circuit équivalent d'un rotor à cage d'écureuil. (Page 21)
- II.3 : La fonction définie la $i^{\text{ème}}$ maille rotorique. (Page 25)
- II.4 : Circuit équivalent d'un rotor avec une seule barre cassée. (Page 32)
- II.5 : Circuit équivalent d'un rotor à cage avec deux barres cassées. (Page 35)
- II.6 : Circuit équivalent d'un rotor avec une portion d'anneau de court circuit cassé. (Page 36)

- III.1 : Quelques formes des ondelettes usuelles. (40)
- III.2 : Allures Evolution de la forme d'une ondelette temps-échelle (à gauche) et de sa transformée de Fourier (à droite) quand le facteur de position u augmente. (Page 41)
- III.3 : Boîtes de Temps-fréquence de deux ondelettes $\psi_{u,s}$ et $\psi_{u0,s0}$. (Page 43)
- III.4 : Boites temps-fréquence d'une base d'ondelette définie le plan temps-fréquence (page45)
- III.5 : Algorithme de MALLAT unidimensionnel. (Page 47)
- III.6 : Filtres miroirs en quadrature. (Page 48)
- III.7 : Décomposition en multi-niveau du signal $f(n)$. (Page 49)
- III.8 : Différents filtres obtenus par l'augmentation d'échelle. (Page 50)
- III.9 : Les différentes largeurs de bandes. (Page 50)
- III.10 : Représentation de la théorie de filtre d'une transformée en ondelettes discrète. (Page 50)
- III.11 : Dépendance de l'échelle à la fréquence des ondelettes. (Page 51)
- III.12 : L'arbre de décomposition d'un signal en quatre niveaux. (Page 52)
- III.13 : Décomposition en paquet d'ondelettes d'ordre 3. (Page 53)
- III.13 : Répartition des nœuds dans un arbre de décomposition en paquet d'ondelettes. (Page 55)

- IV.1 : Courant de démarrage statorique d'une machine asynchrone. (Page 57)
- IV.2 : Evolution du composant à gauche en fonction de a vitesse. (Page 58)
- IV.3 : Décomposition du courant du démarrage. (Page 59)
- IV.4 : Signal d'approximation A7. (Page 60)
- IV.5 : Extraction de l'enveloppe de courant du démarrage. (Page 60)
- IV.6 : Courants de démarrage d'une machine saine et une machine avec une barre cassée avec leur transformée en ondelettes. (Page 61)

- IV.7 : Enveloppe de courants de démarrage d'une machine saine et une machine avec une barre cassée avec leur transformée en ondelettes. (Page 62)
- IV.8 : L'énergie emmagasinée dans la transformée en ondelettes de l'enveloppe. (Page 63)
- IV.9 : Décomposition en multi-niveau de la puissance instantanée. (Page 64)
- IV.10 : Courant statorique d'une machine saine et son différentiel. (Page 65)
- IV.11 : Courant statorique d'une machine avec deux barres cassées et son différentiel. (Page 65)
- IV.12 : Courants résiduels de l'extraction du fondamental du courant statorique. (Page 66)
- IV.13 : Décomposition en multi-niveau du signal de vibration d'une machine asynchrone avec défaut. (Page 70)
-
- V.1 : Différent type de défauts utilisés, (sain+ défectueux). (Page 74)
- V.2 : Stator de la machine. (Page 75)
- V.3 : Carte pour le conditionnement des signaux. (Page 76)
- V.4 : Schéma du montage. (Page 77)
- V.5 : Courants statoriques en régime permanent. (Page 78)
- V.6 : Tensions statoriques obtenues pour la machine saine. (Page 79)
- V.7 : Courants du démarrage statoriques. (Page 79)
- V.8 : Spectres des courants statoriques. (Page 80)
- V.9 : Variations de l'amplitude des harmoniques pour les différentes machines. (Page 81)
- V.10 : Approximations et détails obtenues par l'ondelette *db44*. (Page 83)
- V.11 : Approximations et détails obtenues par l'ondelette *db24*. (Page 84)
- V.12 : Approximations et détails obtenues par l'ondelette *db6* (Page 85)
- V.13 : Variation de l'énergie dans les bandes de fréquence (*db44*). (Page 86)
- V.14 : Variation de l'énergie dans les bandes de fréquence (*db24*). (Page 86)
- V.15 : Variation de l'énergie dans les bandes de fréquence (*db6*). (Page 86)
- V.16 : Variation de l'énergie dans les bandes de fréquence (*db44*). (Page 90)
- V.17 : Courants résiduels de l'extraction du fondamental. (Page 91)
- V.18 : Spectres des Courants résiduels. (Page 91)
- V.19 : Approximations et détails obtenues par l'ondelette *db8*. (Page 93)
- V.20 : Variation de l'énergie dans les niveaux (*db8*). (Page 94)
- V.21 : Courant statorique lors de l'ouverture de la phase. (Page 95)

- V.22 : Courant statorique dans la phase déconnectée. (Page 95)
- V.23 : Tension statorique lors de l'ouverture d'une phase. (Page 96)
- V.24 : Approximations et détails obtenues par la décomposition du courant statorique l'ouverture d'une phase. (Page 97)
- V.25 : décomposition en paquet d'ondelettes du courant statorique lors de l'ouverture d'une phase. (Page 98)

Liste des tableaux

- IV.1 : différents type de défauts avec leurs fréquences de vibration. (Page 68)
- V.1 : Caractéristiques principales des machines asynchrones à cage. (Page 72)
- V.2 : Variation d'amplitude des harmoniques des défauts. (Page 80)
- V.3 : Bandes de fréquences obtenues par la décomposition en multi niveau. (Page 81)
- V.4 : Bandes de fréquences résultantes de la décomposition en paquet d'ondelettes. (Page 87)
- V.5 : Bandes de fréquences résultantes de la décomposition en paquet d'ondelettes dans la bande $[0-312.5Hz]$. (Page 87)
- V.6 : L'énergie relative associe à chaque bande de fréquence obtenue par la décomposition en paquet d'ondelettes. (Page 88).

Sommaire

Introduction générale.....	1
I. Présentation de différents défauts de la machine asynchrone à cage d'écureuil....	3
Introduction.....	3
I.1 Eléments de constitution de la machine asynchrone.....	3
I.1.1 Le stator.....	4
I.1.2 Le rotor.....	5
I.1.3 Paliers.....	6
I.2 Les défaillances de la machine asynchrone.....	7
I.2.1 Défaillances d'ordre mécanique.....	10
I.2.1.1 Défaillances des roulements.....	10
I.2.1.2 Défaillances du flasque.....	12
I.2.1.3 Défaillances de l'arbre.....	12
I.2.1.4 Défauts de l'excentricité.....	13
I.2.3 Défaillances d'ordre électrique.....	14
I.2.3.1 Défaillances des circuits électriques statoriques.....	14
I.2.3.2 Défaillances des circuits électriques rotoriques.....	15
Conclusion.....	17
II. Modélisation de la machine asynchrone a cage d'écureuil.....	18
Introduction.....	18
II.1 Modèle de la machine en absence de défaillance.....	18
II.1.1 Hypothèses simplificatrices.....	19
II.1.2 Structure du stator.....	19
II.1.3 Structure du rotor.....	20
II.1.4 Equations Différentielles Associées.....	22
II.1.4.1 Equations différentielles du stator.....	22
II.1.4.2 Equations différentielles du rotor.....	26
II.1.4.3 Equations mécaniques de la machine.....	30
II.2 Modèle de la machine en présence de défaillances.....	31
II.2.1 Machine avec une seule barre cassée.....	32
II.2.2 Machine avec deux barres cassées adjacentes.....	34
II.2.3 Rupture d'une portion d'anneau de court circuit.....	36
Conclusion.....	37

III.	Technique des ondelettes.....	39
	Introduction.....	39
III.1	Transformée en ondelettes continue.....	39
	III.1.1 Définition.....	39
	III.1.2 Exemple de l'ondelette de Morlet.....	40
	III.1.3 Scalogramme.....	43
	III.1.4 Base des atomes de temps-fréquence.....	44
	III.1.5 Bases des ondelettes et batteries de filtres.....	45
III.2	La transformée en ondelettes discrète et analyse multi-résolution.....	46
	III.2.1 La transformée en ondelettes discrète.....	46
	III.2.2 Algorithme de MALLAT.....	47
	III.2.3 Décomposition En Multi-niveau Du Signal.....	48
	III.2.4 Décomposition En Paquet D'ondelettes.....	53
	Conclusion.....	55
IV.	Application de la technique des ondelettes au diagnostic	56
	Introduction.....	56
IV.1	Application de la TO aux signaux électriques.....	57
	IV.1.1 Application de la TOD au courant statorique transitoire.....	57
	IV.1.2 Application De La TOD Au Courant Statorique En Régime.....	63
	IV.1.2.1 Application de la TOD sans prétraitement des signaux...	63
	IV.1.2.2 Application de la TOD avec prétraitement des signaux...	64
IV.2	Application De La TOD Aux Signaux De Vibration.....	66
IV.3	Critère du choix du l'ondelette mère et l'ordre de décomposition.....	69
	IV.3.1 Choix de la fréquence d'échantillonnage.....	70
	IV.3.2 Choix du nombre de niveaux de décomposition	70
	IV.3.3 Choix du type de l'ondelette mère.....	71
	Conclusion.....	71

V. Resultats experimantaux.	
V.1 Description et identication du banc d'essai	73
V.1.1 Alimentation.....	73
V.1.2 Quatre machines asynchrones à cage d'écureuil.....	73
V.1.3 Générateur à courant continu.....	75
V.1.4 Générateur Tachi-métrique.....	75
V.1.5 Capteurs de courant est de tension.....	75
V.1.6 Carte d'acquisition	76
V.2 Présentations de différents signaux relevés	78
V.2.1 Courants statoriques en régime permanent.....	79
V.2.2 Tensions statoriques en régime permanent.....	79
V.2.3 Courants statoriques en régime transitoire.....	79
V.2.4 Spectres des courants statoiques.....	80
V.3 Resultats obtenus par l'application de la technique des ondelettes.....	81
V.3.1 Appalication au courant statorique sans pretraitement.....	81
V.3.1.1 Décomposition du courant statorique en multi niveau.....	82
V.3.1.2 Décomposition du courant statorique en paquet d'ondelettes..	87
V.3.2 Application de la TOD au courant avec prétraitement.....	91
V.3.2.1 Extraction du fondamental du courant statorique.....	91
V.3.2.2 Décomposition du courant résiduel en multi niveau.....	92
V.4 Etude d'un cas d'ouverture d'une phase statorique lors de fonctionnement.....	94
V.4.1 Signaux relevés lors de l'ouverture d'une phase statorique.....	95
V.4.2 Décomposition du courant statorique en multi niveau.....	96
V.4.3 Décomposition en paquet d'ondelettes.....	98
Conclusion.....	98
Conclusion générale.....	99
Bibliographie	

Introduction Générale

La machine asynchrone à cage d'écureuil était réservée aux entraînements électriques à vitesse constante à cause de la difficulté de sa commande et de la difficulté du suivi de ses paramètres rotoriques. Cependant, cette machine présente également de nombreux avantages, tels que : sa robustesse, son coût de fabrication relativement faible et un système d'entretien minimum.

Toutes ces qualités justifient l'utilisation de cette machine dans l'industrie. De plus, le développement de l'électronique de puissance facilite la commande de cette machine rendant ainsi les machines à cage d'écureuil très utilisées dans le domaine industriel.

Certaines utilisations de moteurs asynchrones ne tolèrent pas les pannes intempestives. Ces pannes peuvent être d'origine mécanique (excentricité du rotor, défaut sur accouplement, défauts des roulements, ...) ou électrique et magnétique (court circuit dans les bobinages statoriques, cassures des barres ou de portions d'anneaux de court-circuit, cassure de dents, ...). D'autres imperfections peuvent aussi être dues également aux éléments de l'entraînement, on citera à titre d'exemples les défauts dans l'alimentation, dans la charge ou dans les réducteurs mécaniques.

La naissance d'un défaut dans la machine asynchrone à cage lors de son fonctionnement n'implique pas l'arrêt instantané de la machine, mais il affecte directement les performances de la machine telles que le couple électromagnétique, les courants et la vitesse. D'où la nécessité du diagnostic de la machine pour identifier et déterminer les causes des défauts. Dans une machine asynchrone, un défaut physique n'est pas évident à localiser avec des capteurs, surtout si le défaut se retrouve au rotor, à cause du mouvement de ce dernier.

L'utilisation des spires de flux dans l'entrefer ou dans les têtes de bobines en vue de voir l'image de l'état magnétique de la machine permettait de suivre les imperfections significatives dans le cas de l'apparition de défaut [2]. Mais cette solution ne peut être appliquée à toutes les machines utilisées à cause de la difficulté d'insertion de ce type de capteurs et de leurs coûts.

L'analyse par traitement du signal des grandeurs de ligne (courant, tension et puissance) peut donner une image réelle sur les déséquilibres qui se produisent dans la machine ; Cette analyse est basée sur les techniques classiques telles que : l'analyse de Fourier et de Hilbert, ou les techniques relativement nouvelles, à savoir : la transformée de Fourier fenêtrée et la technique des ondelettes.

Dans ce mémoire, un diagnostic par la technique des ondelettes est effectué et validé par des résultats expérimentaux. Cette technique propose une analyse très fine des signaux et permet de détecter la non-stationnarité dans les signaux où cette particularité est non disponible dans les techniques classiques. Le manuscrit comporte cinq chapitres répartis comme suit :

Dans un premier chapitre, nous situons les éléments de construction de la machine à cage d'écureuil, les différents défauts qui se manifestent souvent dans cette machine ainsi que leurs causes.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation du modèle de simulation. Nous utilisons un modèle basé sur le couplage magnétique des circuits électriques pour analyser le comportement de la machine en l'absence et en présence des défaillances. Ce type d'approche offre un modèle de machine simple, un temps de calcul raisonnable. Les inductances de la machine prennent en compte les harmoniques d'espace les plus importants dans le but d'obtenir des résultats encore plus proches de la réalité.

Le troisième et le quatrième chapitres sont consacrés respectivement à la technique des ondelettes et des différentes méthodes d'application de cette technique au diagnostic de défauts de la machine asynchrone à cage d'écureuil.

Le cinquième chapitre présente le banc d'essai sur le quel s'est effectué l'acquisition des différents signaux nécessaires à l'application de la technique des ondelettes et de son optimisation en vue d'obtention des résultats du diagnostic de défauts de la machine.

Chapitre I

Présentation de différents défauts de la machine asynchrone à cage d'écureuil

INTRODUCTION

La croissant utilisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil, essentiellement due à sa simplicité de construction, son faible coût d'achat et de fabrication, sa robustesse mécanique ou encore sa quasi-absence d'entretien, est telle que nous la trouvons maintenant dans tous les domaines industriels et en particulier dans les secteurs de pointe comme l'aéronautique, le nucléaire, la chimie ou encore les transports ferroviaires. Il est évident que ces moteurs conduisent à porter une attention de plus en plus sérieuse quant à leur fonctionnement et leur disponibilité.

En effet, l'apparition d'un défaut conduit le plus souvent à un arrêt irrémédiable de la machine asynchrone entraînant, en conséquence, un coût de réparation non négligeable pour l'entreprise (cas des machines de forte puissance) sans oublier la perte de production occasionnée. Dans le domaine nucléaire, par exemple, il est indispensable d'assurer la sécurité des personnes et du matériel car aucun système, qu'il soit simple ou complexe, n'est à l'abri d'un dysfonctionnement.

Dans ce travail, nous décrivons le système étudié qui se limite, dans notre cas, à la machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil. Après avoir rappelé les éléments de constitution de cette machine, nous présentons par un aperçu sur les différents défauts pouvant survenir dans la machine et leurs causes.

I.1 ELEMENTS DE CONSTITUTION DE LA MACHINE ASYNCHRONE

La connaissance des éléments de constitution des machines asynchrones permet de comprendre de quelle façon le système est réalisé physiquement. Les machines asynchrones triphasées peuvent se décomposer, du point de vue mécanique, en trois parties distinctes :

- ✓ le stator, partie fixe de la machine où est connectée l'alimentation électrique;
- ✓ le rotor, partie tournante qui permet de mettre en rotation la charge mécanique;
- ✓ les paliers, partie mécanique qui permet la mise en rotation de l'arbre moteur.

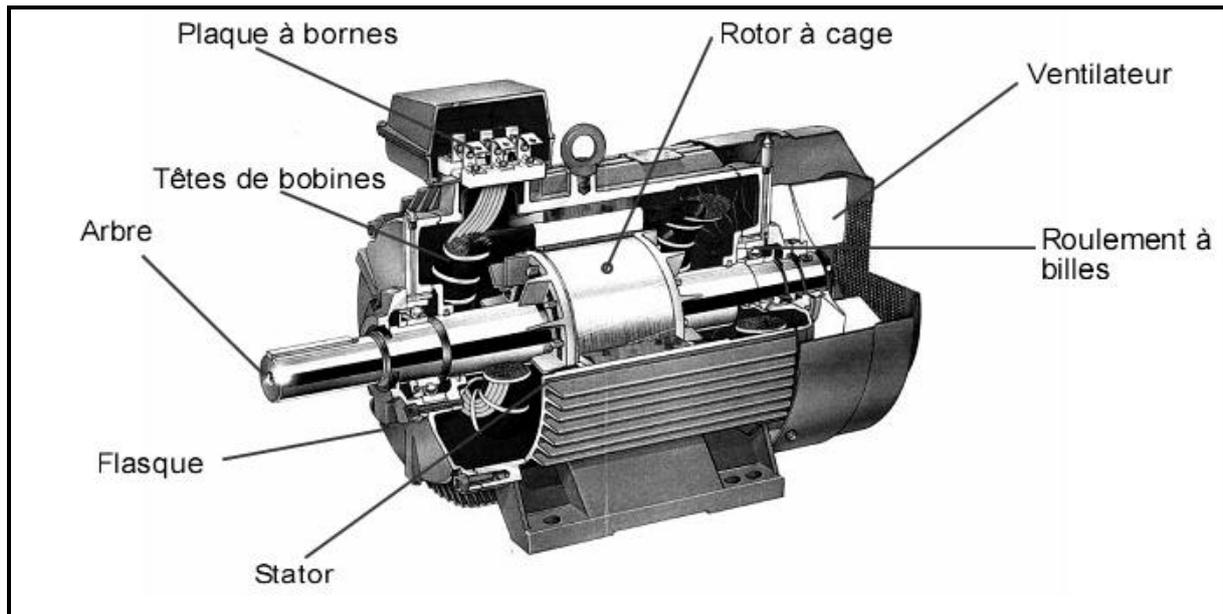


Figure. I.1 : Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil [1]

I.1.1 LE STATOR

Le stator de la machine asynchrone est constitué de tôles d'acier dans lesquelles sont placés les bobinages statoriques. Ces tôles sont, pour les petites machines, découpées en une seule pièce alors qu'elles sont, pour les machines de puissance plus importante, découpées par sections. Elles sont habituellement recouvertes de vernis pour limiter l'effet des courants de Foucault. Au final, elles sont assemblées les unes aux autres à l'aide de boulons ou de soudures pour former le circuit magnétique statorique.

Une fois cette étape d'assemblage terminée, les enroulements statoriques sont placés dans les encoches prévues à cet effet. Ces enroulements peuvent être insérés de manière imbriqués, ondulés ou encore concentriques. L'enroulement concentrique est très souvent utilisé lorsque le bobinage de la machine asynchrone est effectué mécaniquement. Pour les grosses machines, les enroulements sont faits de méplats de cuivre de différentes sections insérés directement dans les encoches. L'isolation entre les enroulements électriques et les tôles d'acier s'effectue à l'aide de matériaux isolants qui peuvent être de différents types suivant l'utilisation de la machine asynchrone.

Le stator d'une machine asynchrone est aussi pourvu d'une boîte à bornes à laquelle est reliée l'alimentation électrique. Nous représentons sur la figure I.1 les différentes parties de constitution du stator d'une machine asynchrone. Nous pouvons visualiser la présence

d'ailettes de ventilation assurant le refroidissement de la machine lorsque celle-ci fonctionne en charge [1-2].

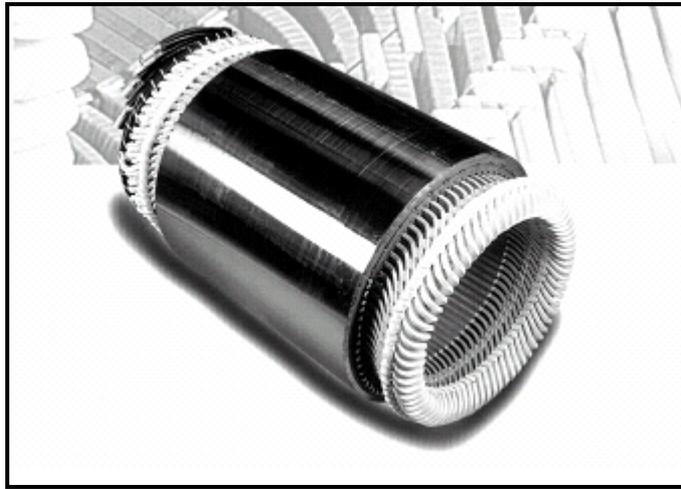


Figure I.2 : Stator d'une machine asynchrone basse tension [1]

I.1.2 LE ROTOR

Tout comme le stator, le circuit magnétique rotorique est constitué de tôles d'acier qui sont, en général, de même origine que celles utilisées pour la construction du stator. Les rotors des machines asynchrones peuvent être de deux types : bobinés ou à cage d'écureuil.

Les rotors bobinés sont construits de la même manière que le bobinage statorique (insertion des enroulements dans les encoches rotoriques). Les phases rotoriques sont alors disponibles grâce à un système de bagues-balais positionné sur l'arbre de la machine. En ce qui concerne les rotors à cage d'écureuil, les enroulements sont constitués de barres de cuivre pour les gros moteurs ou d'aluminium pour les petits. Ces barres sont court-circuitées à chaque extrémité par deux anneaux dit "de court-circuit", eux aussi fabriqués en cuivre ou en aluminium.

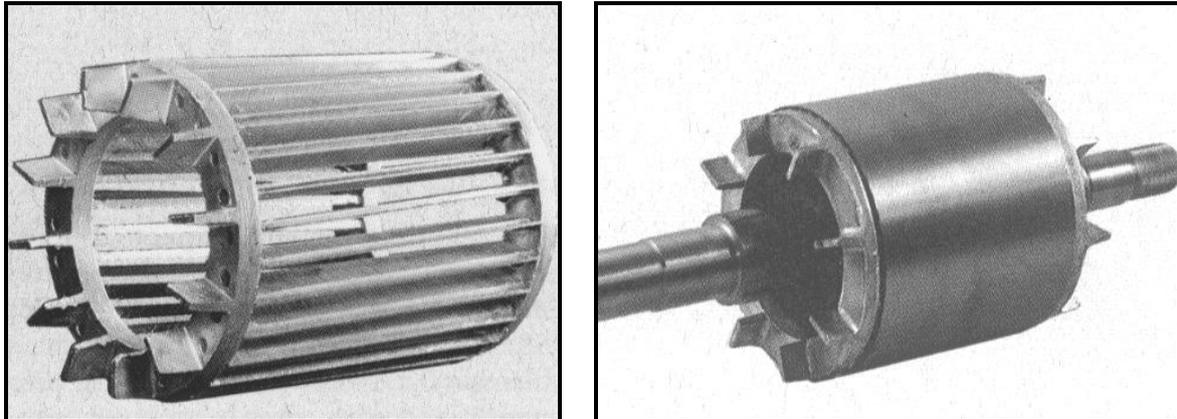


Figure I.3 : Rotor à cage d'écureuil [1]

Il existe différentes structures de rotor à cage qui dépendent principalement de la taille du moteur et de l'application qu'il en sera faite.

Nous donnons une photographie en (FigI.3) de l'arbre sur lequel les tôles sont empilées, les deux anneaux de court-circuit ainsi que les barres d'aluminium formant la cage d'écureuil. Souvent, ces barres sont uniformément inclinées pour limiter les harmoniques (biais d'encoches au rotor) et ainsi diminuer très fortement le bruit lors de l'accélération de la machine asynchrone. L'isolation des barres avec les tôles magnétiques n'est en général pas nécessaire du fait de la faible tension induite aux bornes de chacune d'entre elles. De plus, la résistivité de l'alliage utilisé pour la construction de cette cage est suffisamment faible pour que les courants ne circulent pas à travers les tôles magnétiques, sauf lorsque la cage rotorique présente une rupture de barre [1,2]. Le rotor de la machine asynchrone est aussi pourvu d'ailettes de ventilation pour permettre un refroidissement de la cage le plus efficace possible comme le montre la figure I.1.

I.1.3 PALIERS

Les paliers, qui permettent de supporter et de mettre en rotation l'arbre rotorique, sont constitués de flasques et de roulements à billes insérés à chaud sur l'arbre. Les flasques, moulés en fonte, sont fixés sur le carter statorique grâce à des boulons ou des tiges de serrage comme nous pouvons le visualiser sur la figure I.1.

I.2 LES DEFAILLANCES DE LA MACHINE ASYNCHRONE

La machine asynchrone est considérée comme robuste et également défaillante dans le cas de son emploi de longue durée et dans des conditions dures. Il est important que les mesures soient prises pour diagnostiquer l'état de la machine au fur et à mesure qu'elle entre dans le mode de défauts. Il est donc nécessaire de faire un contrôle continu, en ligne ou hors ligne, des variables de la machine. Les raisons derrière les défauts dans les machines électriques ont leur origine dans la conception, la tolérance de fabrication, l'installation, l'environnement de fonctionnement, la nature de la charge et le programme de la maintenance. Le moteur asynchrone, comme n'importe quelle autre machine électrique tournante, est soumis aux forces électromagnétiques et mécaniques. La conception du moteur est telle que l'interaction entre ces forces dans des conditions normales mène à un fonctionnement stable avec un bruit et des vibrations minimums. Quand le défaut a lieu, l'équilibre entre ces forces est perdu, aboutissant à un autre perfectionnement du défaut. Les défauts du moteur asynchrone peuvent être classés par catégorie dans deux types : mécanique et électrique. Les sources des défauts du moteur peuvent être internes, externes ou dues à l'environnement, comme présenté à la figure I.4. Les défauts internes peuvent être classifiés concernant leurs origines c'est à dire électrique et mécanique. Habituellement, d'autres types de défauts de roulement et de refroidissement se rapportent aux défauts de rotor parce qu'ils appartiennent aux pièces mobiles. La Figure I.5 présente l'arbre de défaut de la machine asynchrone où les défauts sont classifiés selon leur emplacement : rotor et stator [3,4].

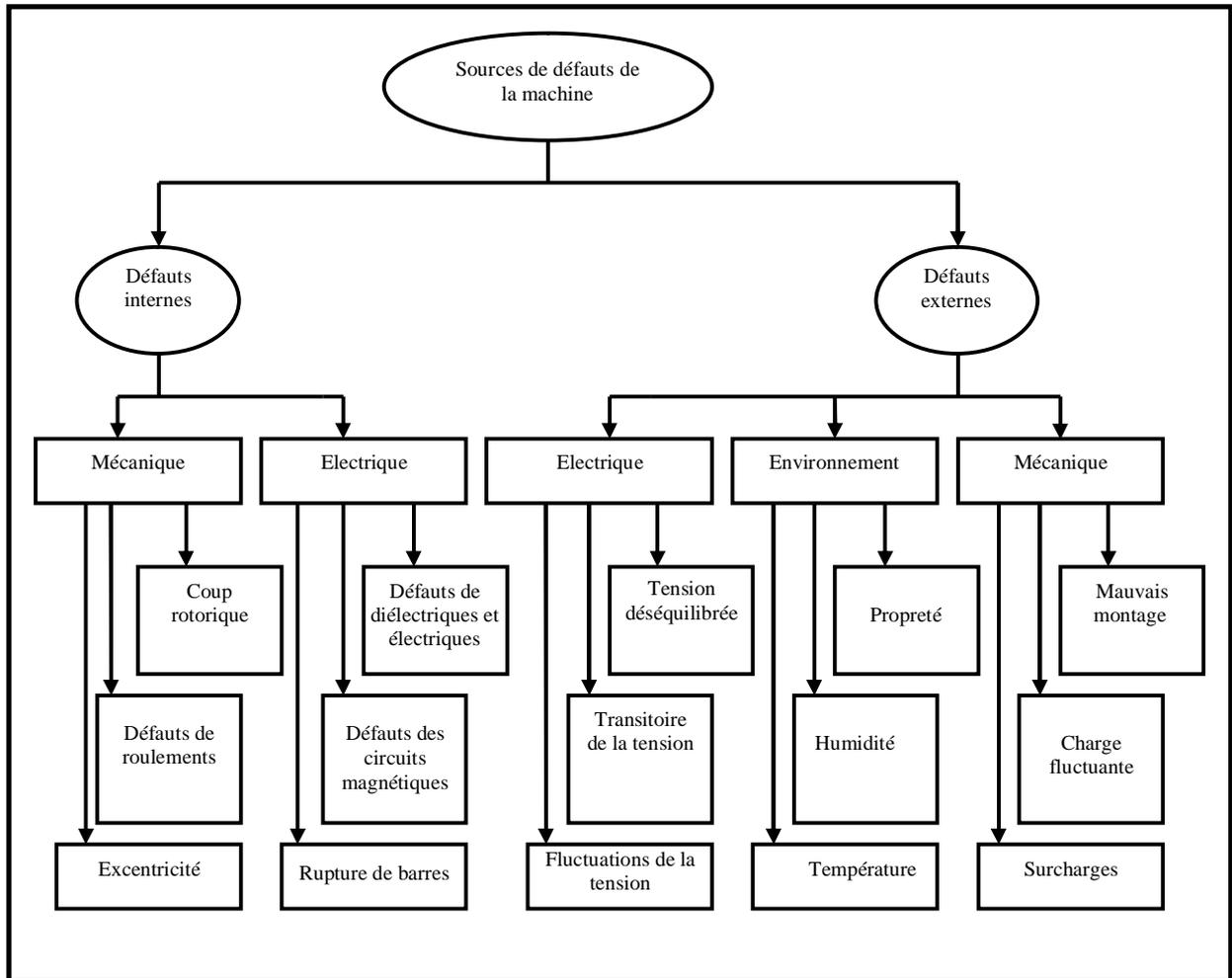


Figure I.4 : Sources de défauts de la machine asynchrone à cage [3]

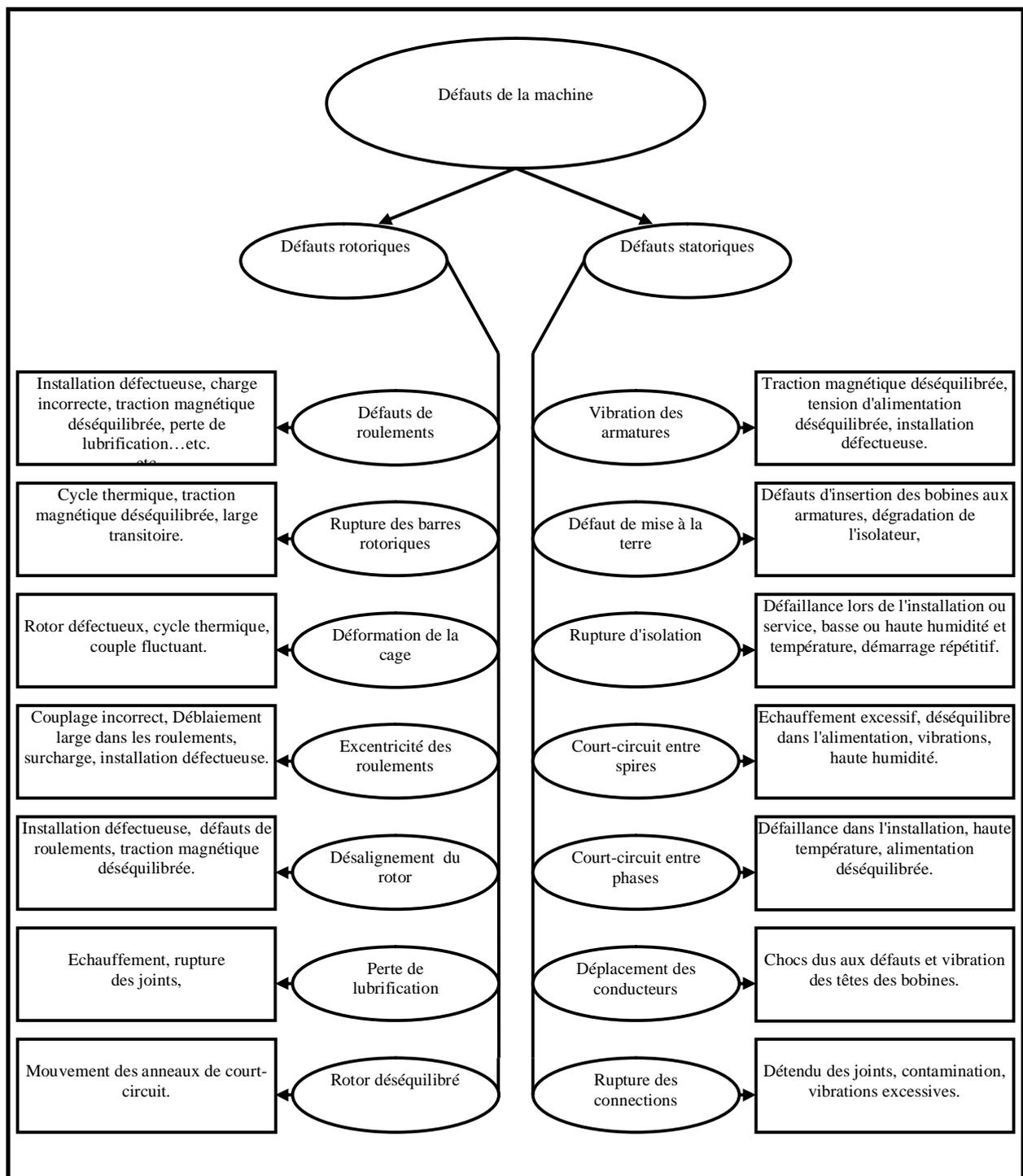


Figure I.5 : Principaux défauts de la machine asynchrone et leurs causes [3]

D'après les deux organigrammes ci-dessus, on peut classer les défauts majeurs qui peuvent apparaître dans la machine asynchrone à cage d'écureuil en deux catégories.

I.2.1 DEFAILLANCES D'ORDRE MECANIQUE

Les défaillances d'ordre mécanique sont, en général, les plus souvent rencontrées parmi tous les défauts que compte la machine asynchrone. Ces défauts peuvent apparaître au niveau des roulements à billes, des flasques ou encore de l'arbre moteur. On énumérera par la suite certains de ces défauts.

I.2.1.1 Défaillances des roulements

Les roulements à billes jouent un rôle très important dans le fonctionnement de tout type de machines électriques. Les défauts de roulements peuvent être causés par un mauvais choix de matériau à l'étape de fabrication. Les problèmes de rotation au sein de la culasse du roulement, causés par un roulement abîmé, écaillé ou fissuré, peuvent créer des perturbations dans la machine. Nous savons que des courants électriques circulent au niveau des roulements d'une machine asynchrone ce qui, pour des vitesses importantes, peut provoquer la détérioration de ces derniers. L'huile de graissage, qui permet la lubrification et la bonne rotation des roulements peut, dans certaines applications, se rigidifier et causer une résistance à la rotation. L'analyse vibratoire de la machine ou l'analyse harmonique des courants statoriques permet de détecter ce type de défaillances [4-6].

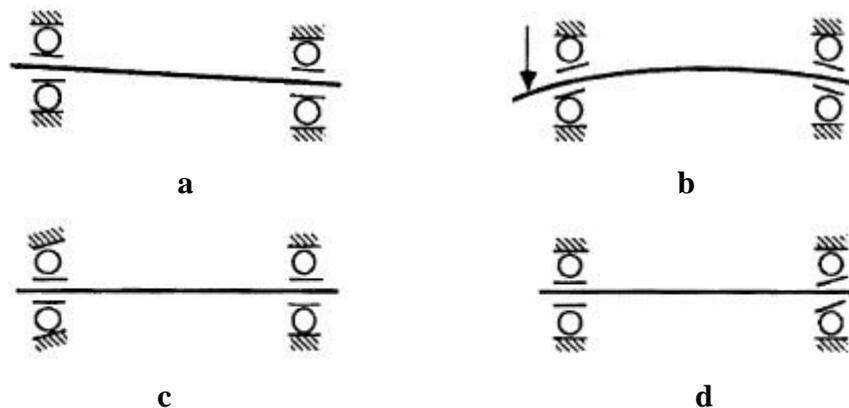


Figure I.6 : Quatre types de défauts dans les roulements à billes [4,5].

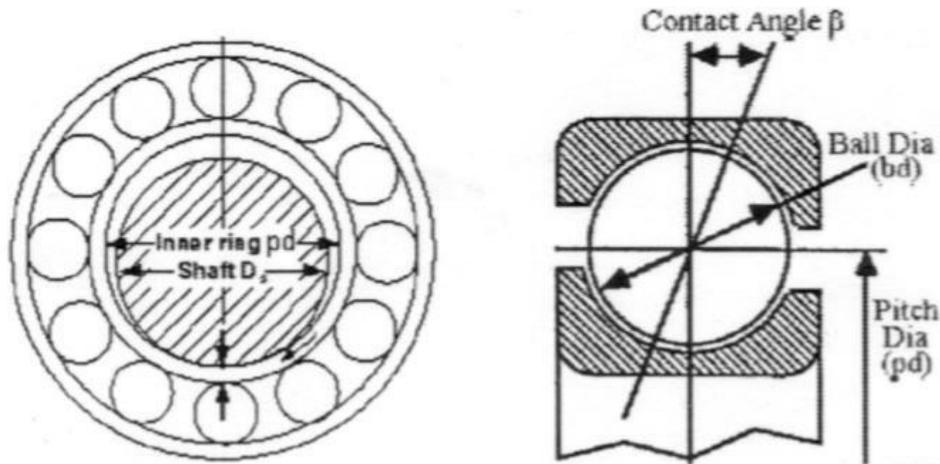


Figure I.7 : Dimensions d'un roulement billes [4]

La relation entre les vibrations des roulements et les spectres du courant statorique peut être déterminée en rappelant que n'importe quelle excentricité de l'entrefer produit des anomalies dans la densité du flux d'entrefer. Puisque les roulements à billes supportent le rotor, n'importe quel défaut de roulement produira un mouvement radial entre le rotor et le stator de la machine. Le déplacement mécanique résultant des roulements endommagés fait changer la hauteur de fuite de machine de telle sorte qu'elle peut être décrite par une combinaison des excentricités tournantes démenageant dans les deux directions. Comme avec l'excentricité de hauteur de fuite, ces variations produisent des courants de stator aux fréquences données en références [6,8]:

$$f_{roul} = |f_s \pm mf_i| \quad (I.1)$$

Où $m=1,2,\dots$, et f_i est l'une des fréquences de vibration caractéristiques correspondant aux dimensions du roulement.

$$f_i = \frac{n}{2} f_r \left[1 \pm \frac{DB}{PD} \cos \beta \right] \quad (I.2)$$

Où n est le nombre de billes, f_r est la fréquence de rotation rotorique.

Les études statiques montrent que presque 40 à 50% de défauts de la machine asynchrone à cage d'écureuil sont d'origine mécanique. D'une part, Les défauts de roulement pourraient se manifester souvent et produisent des défauts qui apparaissent sous la forme d'une asymétrie du rotor, et sont classés dans la catégorie des défauts d'excentricité. D'autre part, la naissance d'un défaut au niveau des roulements dépend aussi de la partie défectueuse, soit dans la partie intérieure ou dans la partie extérieure. Les relations représentant les fréquences générées par les différents défauts des roulements à billes, sont exprimées par :

Pour un défaut dans la course externe du roulement :

$$f_I = (N/2) f_r [1 - DB \cos(\beta) / PD] \quad (I.3)$$

Pour un défaut dans la course interne du roulement :

$$f_I = (N/2) f_r [1 + DB \cos(\beta) / PD] \quad (I.4)$$

Pour un défaut dans les billes :

$$f_I = DB f_r / PD \left[1 - [DB \cos(\beta) / PD]^2 \right] \quad (I.5)$$

Pour un défaut dans la course :

$$f_I = (f_r / 2) f_r [1 - DB \cos(\beta) / PD] \quad (I.6)$$

I.2.1.2 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.

I.2.1.3 Défaillances de l'arbre

L'arbre de la machine peut laisser apparaître 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 immédiat 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 à 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 [2].

I.2.1.4 Défauts d'excentricité

Ceux-ci provoquent la variation de l'entrefer dans le moteur, la répartition non homogène des courants dans le rotor et le déséquilibre des courants statoriques. Le déséquilibre des efforts sur les barres génère un couple global non constant. Quand l'excentricité devient grande, les forces radiales résultantes créées par le stator avec la bande du frottement du rotor provoquent des dommages du stator et du rotor.

La géométrie du rotor peut présenter des dissymétries d'ordre naturel. Celles-ci relèvent de trois catégories d'excentricité de l'entrefer (Fig I.8 et I.9) à savoir :

- ✓ L'excentricité statique : lorsque l'axe du stator coïncide avec l'axe de rotation et non avec l'axe du rotor.
- ✓ L'excentricité dynamique : lorsque l'axe de rotation du rotor ne coïncide pas avec l'axe de symétrie du stator.
- ✓ L'excentricité mixte : lorsque l'axe de rotation du rotor ne coïncide pas avec les axes de symétrie du rotor et du stator.

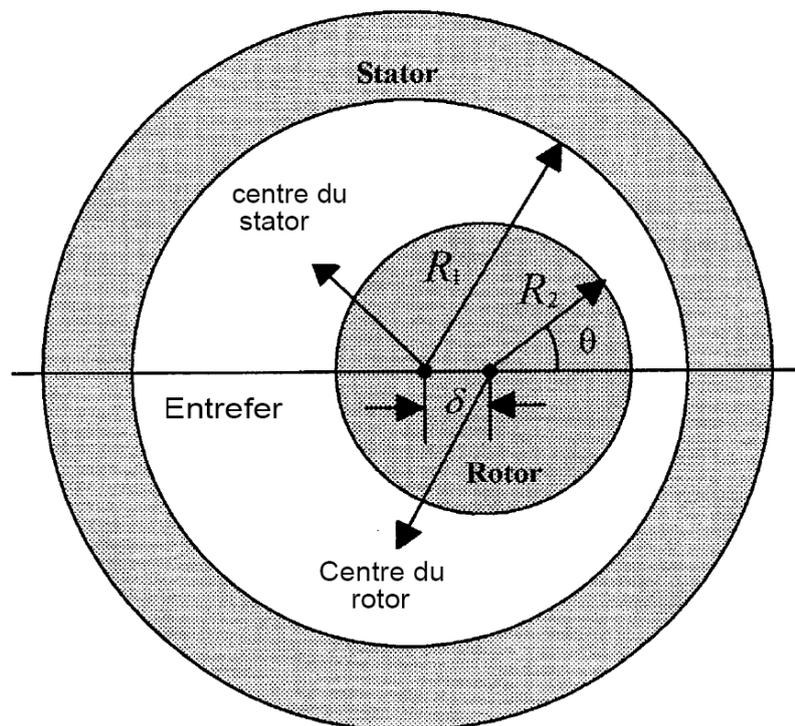


Figure I.8 : Différents types de la dissymétrie de l'entrefer [4]

Tel que :

$R1$: Rayon interne statorique, $R2$: Rayon externe rotorique, δ : distance entre le centre de rotation et le centre du stator.

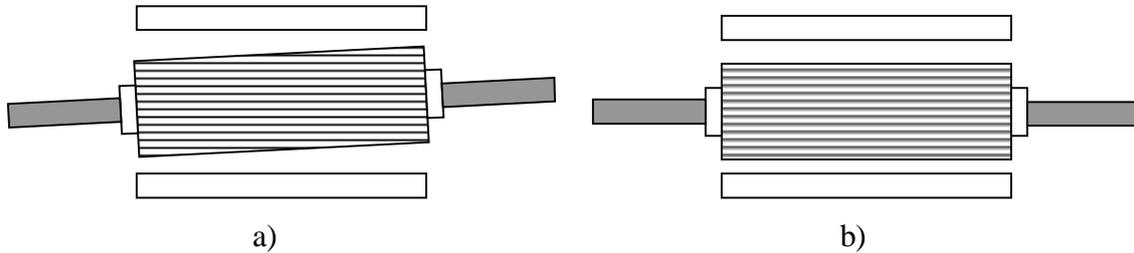


Figure I.9 : Excentricité statique (a) et dynamique(b)

I.2.3 DÉFAILLANCES D'ORDRE ELECTRIQUE

Les défaillances d'origine électrique peuvent, dans certains cas, causer l'arrêt définitif de la machine (au même titre que les défaillances d'ordre mécanique). Ces défaillances sont classées en deux catégories bien distinctes. On peut citer les défaillances qui apparaissent au niveau des circuits électriques statoriques et celles qui apparaissent au niveau des circuits électriques rotoriques [9].

I.2.3.1 Défaillances des circuits électriques statoriques

L'apparition d'un défaut au niveau des circuits électriques statoriques de la machine asynchrone peut avoir des origines diverses. Nous pouvons citer, par exemple, les défauts de type courts-circuit inter-spices qui apparaissent à l'intérieur des encoches statoriques. Ce type de défaut peut être causé par une dégradation des isolants des spires du bobinage statorique. On trouve également les courts-circuits apparaissant entre une phase et le neutre, entre une phase et la carcasse métallique de la machine ou encore entre deux phases statoriques. Ces défauts ont le plus souvent une origine mécanique. En effet, des vibrations excessives peuvent mener à un desserrement des boulons de la plaque à bornes de la machine créant ainsi le court-circuit. Une cosse mal serrée à la jonction du câble d'alimentation et des bornes de la machine peut être à l'origine d'une ouverture de phase. Le défaut le plus couramment rencontré reste encore la fusion d'un fusible de protection. Ces défauts peuvent être détectés par une analyse harmonique des courants absorbés par la machine.

I.2.3.2 Défaillances des circuits électriques rotoriques

Deux types de défaillances peuvent apparaître au rotor d'une machine asynchrone à cage d'écureuil. La cage étant composée de barres et d'anneaux de court-circuit d'aluminium ou de cuivre, une rupture partielle ou totale d'un de ces composants peut être considérée comme un défaut électrique rotorique. L'apparition de ce type de défaut peut être d'origine diverse. En effet, la rupture d'une barre ou d'un segment d'anneau de court-circuit peut être due à plusieurs phénomènes qui sont souvent indépendants les uns des autres. On peut citer par exemple une mauvaise utilisation de la machine asynchrone (charge trop importante) ou encore l'environnement hostile dans lequel elle fonctionne.

Une défaillance au niveau de la cage rotorique se situe généralement à la jointure entre une barre et un anneau de court-circuit. En effet, les barres rotoriques et les anneaux de court-circuit ne pouvant pas être construits d'un seul bloc (sauf pour les machines de petite puissance), une soudure est pratiquée aux extrémités de chaque barre pour relier ces dernières aux deux anneaux de court-circuit. La fragilité de ces soudures, par rapport aux barres et aux anneaux fabriqués d'un seul bloc, provoque, à ces endroits précis, une fragilité de la cage d'écureuil.

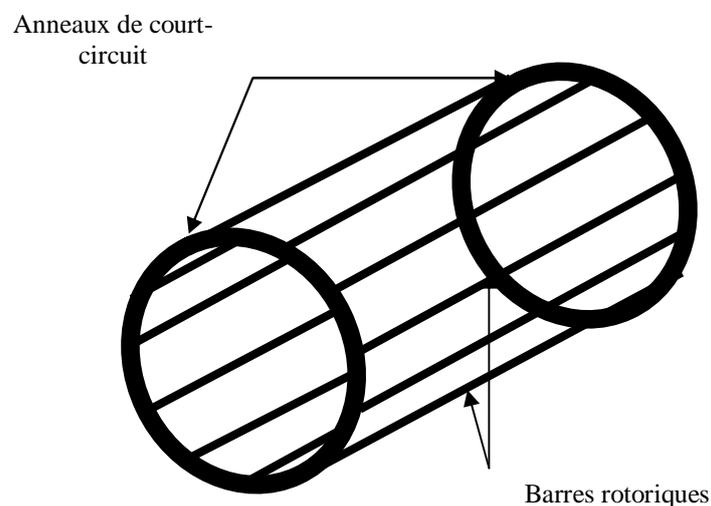


Figure I.10 : Rotor à cage d'écureuil

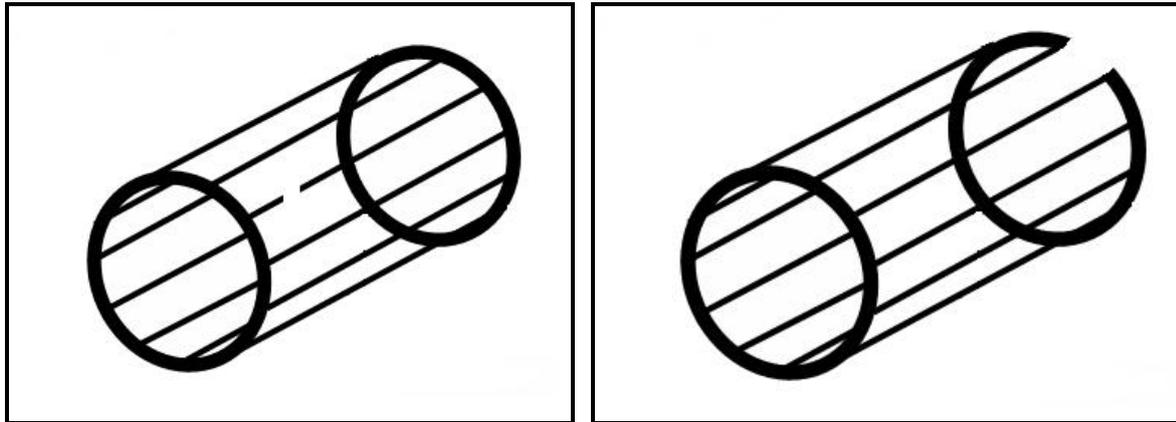


Figure I.11 : Rupture d'une barre et d'un anneau de court circuit

La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations. L'effet de la cassure de barres croît rapidement avec le nombre de barres cassées. La grande amplitude des oscillations accélère la détérioration de la machine et des composants de la chaîne de traction [9]. La rupture de barres provoque un déséquilibre du courant entre les barres du rotor. En effet ce déséquilibre apparaît sous forme des fréquences qui s'ajoutent au courant statorique de la machine, et l'analyse fréquentielle de la signature de la machine montre une apparition des composantes, autour du composant fondamental correspondantes aux fréquences:

$$f = (1 \pm 2kg)f_s, \quad k = \pm 2, \dots, n, \quad n \in \mathbb{Z} \quad (I.7)$$

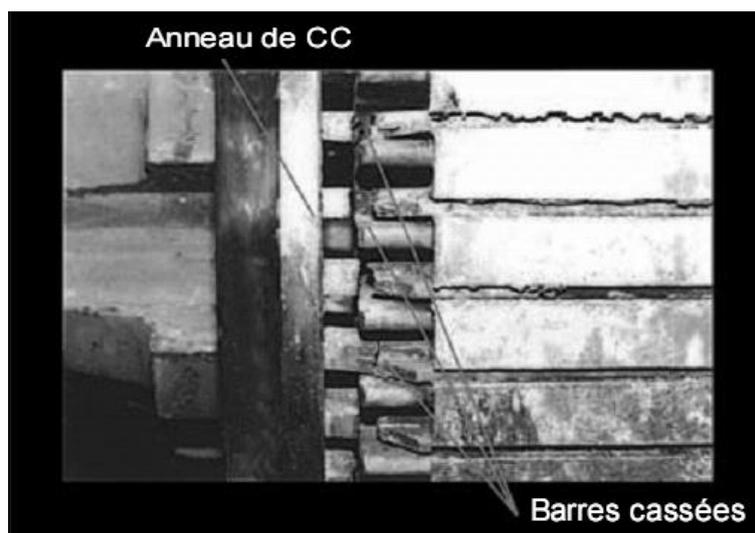


Figure I.12 : Rupture réelle des barres rotoriques

Les portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité,...) ou une surcharge de couple et donc de courants peut entraîner leur cassure. Ce défaut est généralement regroupé avec celui de la cassure de barres dans les études qui se font à partir du stator.

CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons rappelé les éléments constructifs de la machine asynchrone à cage d'écureuil et nous avons également décrit la majorité des défauts qui peuvent apparaître ainsi que leurs influences sur le comportement de la machine. La connaissance des éléments de construction de la machine asynchrone à cage permet d'implanter le modèle de la simulation qui permet de donner une image approximative de l'état de la machine lors de ses régimes de fonctionnement.

Chapitre II

*Modélisation de la machine asynchrone à cage
d'écureuil*

INTRODUCTION

Depuis quelques années, les programmes de simulation faisaient toujours intervenir la transformation de Clarke ou celle de Park pour pouvoir effectuer une simulation de la machine asynchrone dans un temps relativement court [10-12]. Aujourd'hui, grâce à l'évolution des technologies informatiques et des processeurs en particulier, nous pouvons nous passer de ces transformations, ce qui permet, dans le cas de la machine asynchrone à cage d'écureuil, de calculer tous les courants de barres rotoriques et d'anneaux de court-circuit.

Nous présentons, dans ce chapitre, un modèle de la machine asynchrone à cage d'écureuil. Dans un premier temps nous détaillons le modèle de la machine asynchrone à cage d'écureuil en l'absence des défauts, puis nous introduisons les différentes défaillances dans ce modèle.

II.1 MODELE DE LA MACHINE EN L'ABSENCE DE DEFAILLANCE

Pour modéliser la machine asynchrone à cage d'écureuil, nous utiliserons la méthode des circuits électriques multiples couplés magnétiquement pour donner un modèle physique envisageant tout les modes de fonctionnement de la machine asynchrone. Dans cette méthode, les inductances peuvent être calculées soit en utilisant les fonctions de bobinage, en sachant que cela exige une connaissance précise de la forme du bobinage de la machine [12], soit en utilisant une décomposition en séries de Fourier de l'induction d'entrefer de la machine [13,14]. Cette dernière approche nous a semblé la plus adéquate étant donné que nous n'avons pas les informations nécessaires pour calculer les inductances de la machine par la méthode des fonctions de bobinage. En effet, le calcul de ces inductances par une décomposition en séries de Fourier ne nécessite pas la connaissance précise du bobinage de la machine car les termes relatifs à l'étalement, au raccourcissement, à l'inclinaison du bobinage sont intégrés au calcul des inductances à travers des coefficients spécifiques. Ce type de modélisation permet donc de prendre en compte les harmoniques des inductances souhaités (simulation possible au fondamental de l'induction ou avec les harmoniques d'espace les plus importants).

Tout type de modélisation ne peut se faire sans poser quelques hypothèses simplificatrices qui font l'objet de la modélisation. Le regroupement des équations des circuits électriques statoriques et rotoriques sous forme d'un modèle global permet la résolution numérique.

Le premier objectif de cette modélisation est de mettre en évidence l'influence des défauts électriques sur les grandeurs temporelles de la machine asynchrone (courants, vitesse, couple,

...). Pour ce faire, il est indispensable de poser certaines hypothèses qui ont pour but de faciliter la mise en équations des circuits électriques de la machine.

II.1.1 HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES

Dans l'approche proposée, on suppose que :

1. le circuit magnétique est linéaire (perméabilité relative du fer très grande devant I) : 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 [2].

II.1.2 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.1 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.

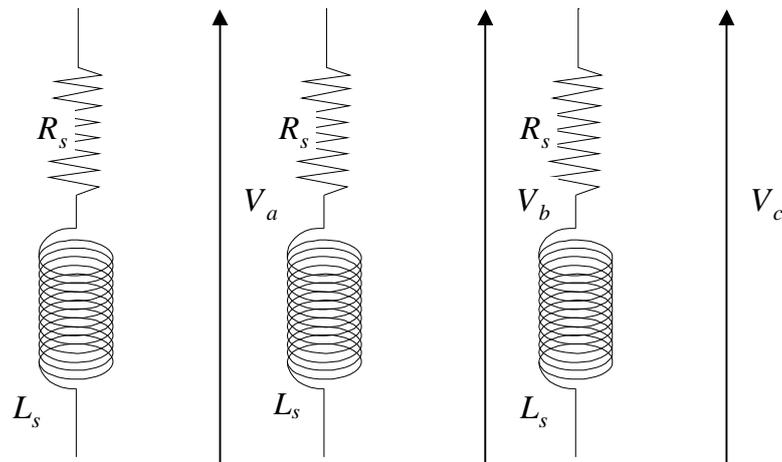


Figure II.1 : Structure adoptée pour modéliser le stator

II.1.3 STRUCTURE DU ROTOR

La cage d'écoreuil 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 [15]. La figure II.2 donne la forme des circuits électriques adoptée pour la modélisation de la cage d'écoreuil rotorique. Pour permettre une compréhension adéquate du modèle de la cage d'écoreuil de la machine, on nomme :

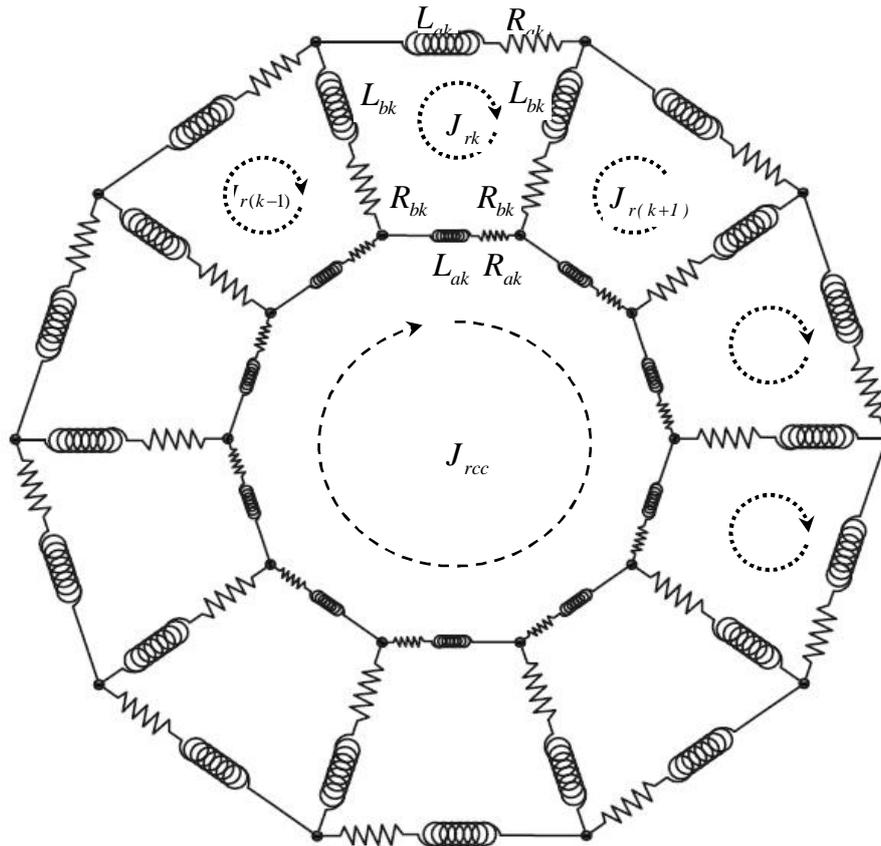


Figure II.2 : Circuit équivalent d'un rotor à cage d'écureuil

R_{b_k} : Résistance d'une barre rotorique k ;

L_{b_k} : Inductance de fuite d'une barre rotorique k ;

R_{a_k} : Résistance du segment d'anneau de court-circuit k ;

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

i_{b_k} : Courant circulant dans la barre rotorique k ;

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

j_{r_k} : Courant circulant dans la boucle rotorique k ;

$j_{r_{cc}}$: Courant circulant dans l'anneau de court-circuit.

II.1.4 EQUATIONS DIFFERENTIELLES ASSOCIEES

II.1.4.1 Equations électriques du stator

Ces équations différentielles vont permettre d'associer le vecteur tension, le vecteur courant ainsi que le vecteur 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:

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

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

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

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_i} : résistance d'une phase 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).

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

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 :

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

Tel que :

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

$L_{m_{s_i s_i}}$: 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 :

$$L_{m_{s_i s_j}} = \frac{\mu_0 \cdot l \cdot r}{g} \cdot N_s^2 \cdot \frac{\pi}{4} \quad (\text{II.7})$$

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

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

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

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

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, [11,12,13].

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

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 (l/g) .

$N_i(\varphi, \theta)$: 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 :

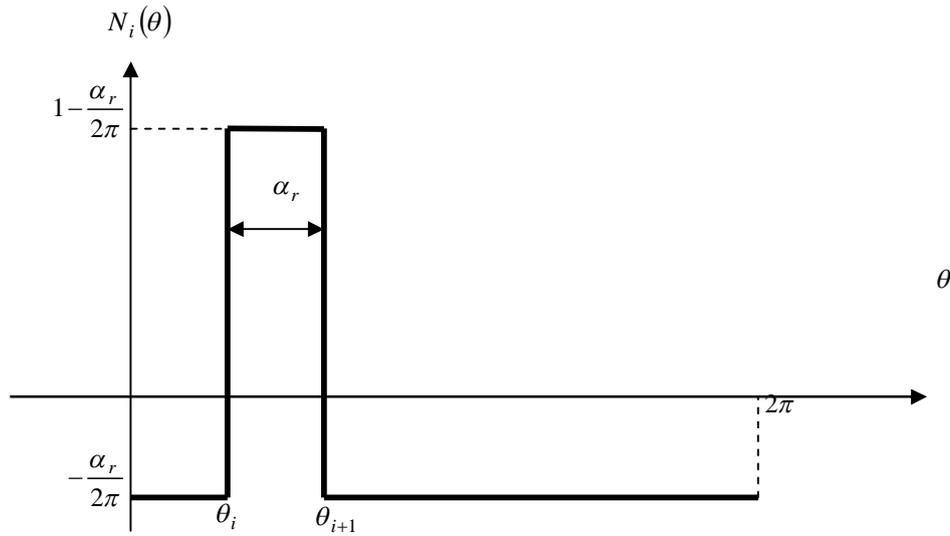


Figure. II.3 : La fonction définissant la $i^{ème}$ maille rotorique

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

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

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

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

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

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

Avec :

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

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.
- g L'épaisseur de l'entrefer.
- l Longueur du rotor.

Evidemment, dans la machine à cage dont l'extrémité complète, le courant d'anneau j_{rcc} 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.1.4.2 Equations électriques du rotor

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 :

$$[V_r] = [R_r][J_r] + \frac{d[\phi_r]}{dt} \quad (\text{II.15})$$

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

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

Il est à noter que dans le cas particulier de la machine asynchrone à cage d'écurieuil, 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 $[\Phi_r]$ dépend non seulement des courants de boucles rotoriques mais aussi des courants de chacune des phases statoriques si bien que :

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

où la matrice inductance $[L_r]$, décrite par l'équation II.20, se compose des inductances propres, de magnétisation, de fuite et mutuelles de chaque boucle rotorique.

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

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

Sachant que :

$$R_{rb_1} = R_{rb_2} = R_{rb_3} = \dots = R_{rb_{N_r}} = R_b$$

$$R_{a_1} = R_{a_2} = R_{a_3} = \dots = R_{a_{N_r}} = R_a$$

Ce qui donne :

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

La matrice résistance $[R_r]$ devient :

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

La matrice inductance rotorique est exprimée comme suit:

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{rr_1} & M_{r_1 r_2} - L_{f_{b1}} & M_{r_1 r_3} & \dots & M_{r_1 r_k} & \dots & M_{r_1 r_{N_r-1}} & M_{r_1 r_{N_r}} - L_{f_{b_{N_r}}} & -L_{a_1} \\ M_{r_2 r_1} - L_{f_{b1}} & L_{rr_2} & M_{r_2 r_3} - L_{f_{b1}} & \dots & M_{r_2 r_k} & \dots & M_{r_2 r_{N_r-1}} & M_{r_2 r_{N_r}} & -L_{a_2} \\ \vdots & \vdots \\ M_{r_k r_1} & M_{r_k r_2} & M_{r_k r_3} & \dots & L_{rr_k} & \dots & \dots & 0 & -L_{a_k} \\ \vdots & \vdots \\ M_{r_{N_r} r_1} - L_{f_{b_{N_r}}} & M_{r_{N_r} r_2} & M_{r_{N_r} r_3} & \dots & M_{r_{N_r} r_k} & \dots & M_{r_{N_r} r_{N_r-1}} & -L_{f_{b_{N_r-1}}} & L_{rr_{N_r}} & -L_{a_{N_r}} \\ -L_{a_1} & -L_{a_2} & -L_{a_3} & \dots & -L_{a_k} & \dots & -L_{a_{N_r-1}} & -L_{a_{N_r}} & \sum_{k=1}^{N_r} -L_{a_k} \end{bmatrix} \quad (II.21)$$

$$\begin{cases} L_{rr_1} & = & L_{mb_1} + L_{b_{N_r}} + L_{b_1} + 2L_{a_1} \\ \vdots & = & \vdots \\ L_{rr_k} & = & L_{mb_k} + L_{b_{k-1}} + L_{b_k} + 2L_{a_k} \\ \vdots & = & \vdots \\ L_{rr_{N_r}} & = & L_{mb_{N_r}} + L_{b_{N_r-1}} + L_{b_{N_r}} + 2L_{a_{N_r}} \end{cases} \quad (II.22)$$

Sachant que :

$$\begin{aligned} L_{b_1} &= L_{b_2} = L_{b_3} = \dots = L_{b_{N_r}} = L_b \\ L_{a_1} &= L_{a_2} = L_{a_3} = \dots = L_{a_{N_r}} = L_a = L_a = \\ L_{rr_1} &= L_{rr_2} = L_{rr_3} = \dots = L_{rr_{N_r}} = L_0 = \\ L_0 &= L_{mb_k} + 2(L_a + L_b) \end{aligned}$$

La matrice mutuelle rotor-rotor devient :

$$\left[L_r \right] = \begin{bmatrix}
 L_0 & M_{r_1 r_2} - L_{f_{b1}} & M_{r_1 r_3} & \dots & M_{r_1 r_k} & \dots & M_{r_1 r_{N_r-1}} & M_{r_1 r_{N_r}} - L_{f_{b_{N_r}}} & -L_a \\
 M_{r_2 r_1} - L_{f_{b1}} & L_0 & M_{r_2 r_3} - L_{f_{b1}} & \dots & M_{r_2 r_k} & \dots & M_{r_2 r_{N_r-1}} & M_{r_2 r_{N_r}} & -L_a \\
 \vdots & \vdots \\
 M_{r_k r_1} & M_{r_k r_2} & M_{r_k r_3} & \dots & L_0 & \dots & \dots & 0 & -L_a \\
 \vdots & \vdots \\
 M_{r_{N_r} r_1} - L_{f_{b_{N_r}}} & M_{r_{N_r} r_2} & M_{r_{N_r} r_3} & \dots & M_{r_{N_r} r_k} & \dots & M_{r_{N_r} r_{N_r-1}} & -L_{f_{b_{N_r-1}}} & L_0 & -L_a \\
 -L_a & -L_a & -L_a & \dots & -L_a & \dots & -L_a & -L_a & \sum_{k=1}^{N_r} -L_a
 \end{bmatrix} \tag{II.23}$$

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

$$\left[M_{rs} \right] = \begin{bmatrix}
 M_{r_1 s_a} & M_{r_1 s_b} & M_{r_1 s_c} \\
 M_{r_2 s_a} & M_{r_2 s_b} & M_{r_2 s_c} \\
 \vdots & \vdots & \vdots \\
 M_{r_k s_a} & M_{r_k s_b} & M_{r_k s_c} \\
 \vdots & \vdots & \vdots \\
 M_{r_{N_r} s_a} & M_{r_{N_r} s_b} & M_{r_{N_r} s_c} \\
 M_{r_{cc} s_a} & M_{r_{cc} s_b} & M_{r_{N_r} s_c}
 \end{bmatrix} \tag{II.24}$$

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

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

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

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

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

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

II.1.4.3 Equations mécaniques de la machine

Les équations mécaniques qui régissent le fonctionnement de la machine asynchrone peuvent se mettre sous la forme :

$$J_r \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - f_v \Omega - C_r \quad (\text{II.28})$$

$$\Omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{II.29})$$

où J_r représente le moment d'inertie de la machine étudiée, Ω sa vitesse rotorique, C_{em} son couple électromagnétique, f_v son frottement visqueux et C_r son couple de charge. L'équation II.29 lie la vitesse rotorique à la position du rotor θ . Les paramètres J_r , f_v et C_r dépendent directement de la machine étudiée et de sa charge. Le calcul du couple électromagnétique est déterminé en étudiant la co-énergie magnétique avec l'équation :

$$W_{co} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [J_r] \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} [L_s] & M_{sr} \\ M_{rs} & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [J_r] \end{bmatrix} \quad (\text{II.30})$$

Si cette co-énergie est exprimée en fonction des différents courants de phases de la machine, le couple électromagnétique se calcule en dérivant cette dernière par rapport à la position θ que prend le rotor vis-à-vis du stator. L'expression du couple électromagnétique C_{em} peut finalement être déterminée grâce à la relation :

$$C_{em} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [J_r] \end{bmatrix}^T \frac{d}{d\theta} \begin{bmatrix} [L_s] & M_{sr} \\ M_{rs} & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [J_r] \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$

On propose ci-après un récapitulatif des équations électriques et mécaniques qui régissent le fonctionnement de la machine asynchrone à cage d'écureuil, est donné ci-après :

$$\left\{ \begin{array}{l}
 [V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d[\phi_s]}{dt} \\
 [\phi_s] = [L_s][I_s] + [M_{sr}][J_r] \\
 [V_r] = [R_r][J_r] + \frac{d[\phi_r]}{dt} \\
 [\phi_r] = [L_r][J_r] + [M_{rs}][I_s] \\
 C_{em} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [J_r] \end{bmatrix}^T \frac{d}{d\theta} \begin{bmatrix} [L_s] & M_{sr} \\ M_{rs} & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [J_r] \end{bmatrix} \\
 J_t \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - f_v \Omega - C_r \\
 \Omega = \frac{d\theta}{dt}
 \end{array} \right. \quad (II.32)$$

Le modèle obtenu ne peut jamais donner des résultats confondus sur la réalité à cause des hypothèses posées précédemment, mais il peut donner une image proche de fonctionnement de la machine asynchrone à cage d'écureuil, tel que, les courants statoriques et rotoriques, le couple électromagnétique et la vitesse de rotation.

II.2 MODELE DE LA MACHINE EN PRESENCE DE DEFAILLANCES

Après l'établissement du modèle de la machine asynchrone à cage d'écureuil sans défaut, on procède maintenant à la modélisation de la machine en présence de défauts au rotor. Une telle procédure permet de juger les défauts à leur attribuer.

Dans cette partie, on s'intéressera aux défauts intervenant sur les barres rotoriques (cassures) et sur les cassures des portions d'anneau de court circuit.

La modélisation de ce type de défaillance peut être faite en utilisant deux méthodes différentes, le but étant d'annuler le courant qui traverse la barre incriminée. Le circuit électrique rotorique donné sur la figure II.2 doit être reconsidéré pour permettre la prise en compte du défaut rotorique dans le modèle de la machine [2].

Une première méthode de modélisation consiste à reconstituer totalement le circuit électrique rotorique. Dans ce type d'approche, la barre rotorique défaillante est enlevée du circuit électrique, ce qui oblige à recalculer les matrices résistance $[R_r]$ et inductance $[L_r]$ de la machine asynchrone. En effet, la suppression d'une barre de la cage nous donne une matrice $[R_r]$ et $[L_r]$ de rang inférieur à celle développée pour la machine saine. La modification de l'ordre des matrices rotoriques oblige à recalculer les lois électriques et magnétiques de la

boucle k . Nous présentons dans la suite les structures finales que prend le circuit électrique rotorique lorsque nous sommes en présence de rupture des barres et portions d'anneau de court-circuit [2][11,12,13].

La seconde approche envisageable consiste à augmenter artificiellement la valeur de la résistance de la barre incriminée d'un facteur suffisant pour que le courant qui la traverse soit le plus proche possible de zéro en régime permanent. Par comparaison avec la première méthode, la structure du circuit électrique rotorique n'est pas modifiée car nous considérons, dans ce type de modélisation, qu'une rupture de barre n'altère pas les inductances propres et mutuelles de la cage rotorique. Par conséquent la modélisation de rupture partielle des barres et de portion d'anneau de court-circuit est possible dans cette dernière approche.

II.2.1 MACHINE AVEC UNE SEULE BARRE CASSEE

D'après la première approche, la cassure d'une barre au rotor est introduite par un changement au niveau des équations et surtout dans le calcul des inductances propres et mutuelles et la résistance.

Si la barre qui constitue la maille k est enlevée, le modèle est diminué par une maille, ce qui veut dire que le courant j_{rk} traverse une maille deux fois plus large et que la maille $(k + 1)$ est éliminée comme indiqué sur la figure II.3 suivante :

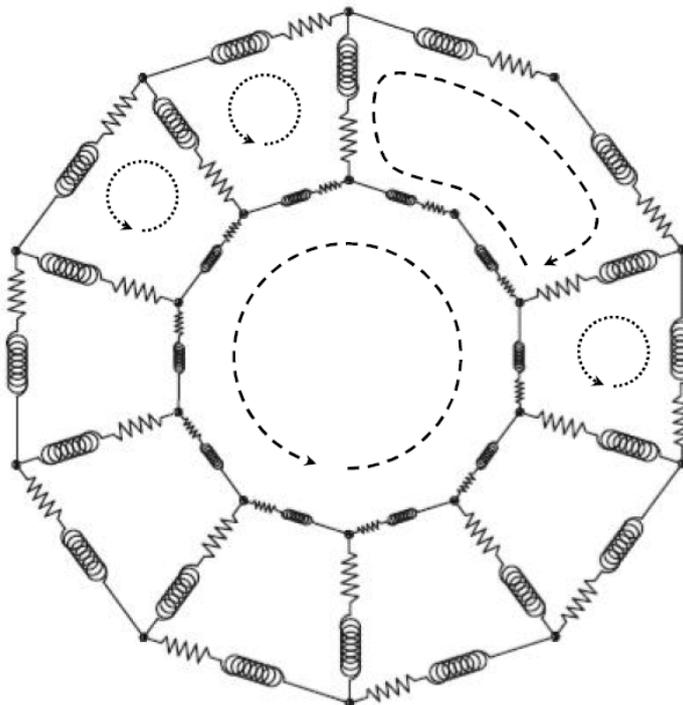


Figure II.4 : Circuit équivalent d'un rotor avec une barre cassée

Dans la matrice d'inductance, on élimine donc la ligne et la colonne $(k + 1)$, et les termes relatifs à la colonne k sont recalculés en tenant compte de la fonction de l'enroulement correspondante à la $k^{ème}$ maille du rotor.

$$N_k(\theta) = \begin{cases} -\frac{\alpha_r}{2\pi} & 0 < \theta \leq \theta_k \\ 1 - \frac{\alpha_r}{2\pi} & \theta_k < \theta \leq \theta_{j+2} \\ -\frac{\alpha_r}{2\pi} & \theta_{k+2} < \theta \leq 2\pi \end{cases} \quad (II.33)$$

La nouvelle inductance propre correspondante à la maille k s'écrit sous la forme :

$$L_{0k} = L_{mb_{kk}} + 2.(L_b + 2.L_e)$$

La mutuelle inductance rotor- rotor Lm_{bij} est dans ce cas :

$$Lm_{bij} = \frac{\mu_0.l.r}{g} \int_0^{2\pi} N_i(\theta).N_j(\theta).d.\theta = -2.\frac{\mu_0.l.r}{g}.\frac{\alpha_r^2}{2\pi} \quad (II.34)$$

Alors la matrice inductance rotorique devient :

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_0 & M_{r_1r_2} - L_{fb1} & M_{r_1r_3} & \dots & M_{r_1r_k} & M_{r_1r_{k+2}} & \dots & M_{r_1r_{N_r-1}} & M_{r_1r_{N_r}} - L_{fb_{N_r}} & -L_a \\ M_{r_2r_1} - L_{fb1} & L_0 & M_{r_2r_3} - L_{fb1} & \dots & M_{r_2r_k} & M_{r_2r_{k+2}} & \dots & M_{r_2r_{N_r-1}} & M_{r_2r_{N_r}} & -L_a \\ \vdots & \vdots \\ M_{r_kr_1} & M_{r_kr_2} & M_{r_kr_3} & \dots & L_0 & M_{r_kr_{k+2}} - L_{fb_{k+2}} & \dots & \vdots & 0 & -L_a \\ M_{r_{k+2}r_1} & M_{r_{k+2}r_2} & M_{r_{k+2}r_3} & \dots & M_{r_{k+2}r_k} & L_0 & \dots & M_{r_{k+2}r_{N_r-1}} & \dots & -L_a \\ \vdots & \vdots \\ M_{r_{N_r}r_1} - L_{fb_{N_r}} & M_{r_{N_r}r_2} & M_{r_{N_r}r_3} & \dots & M_{r_{N_r}r_k} & \dots & M_{r_{N_r}r_{N_r-1}} - L_{fb_{N_r-1}} & L_0 & \dots & -L_a \\ -L_a & -L_a & -L_a & \dots & -L_a & \dots & -L_a & -L_a & \dots & \sum_{k=1}^{N_r} -L_a \end{bmatrix} \quad (II.3)$$

La mutuelle inductance $M_{s_a r_k}$ entre l'enroulement statorique (a) et la maille k s'obtient à partir de :

$$M_{s_a r_k} = \frac{\mu_0 l r}{g} \int_0^{2\pi} N_a(\theta) N_k(\theta) d\theta = \frac{\mu_0 l r N_s}{g} \frac{1}{2} [\sin \alpha_r \cos \theta_k - (1 - \cos \alpha_r) \sin \theta_k] \quad (II.36)$$

La matrice des résistances rotoriques est aussi affectée par la cassure d'une barre, elle est obtenue à partir de cette nouvelle représentation :

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_0 & -R_b & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & -R_b & -R_a \\ -R_b & R_0 & -R_0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & -R_a \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & R_b & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -R_b & R_{0k} & -R_b & \dots & 0 & 0 & -R_a \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & R_b & R_0 & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -R_b & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & -R_b & R_0 & R_a \\ -R_a & -R_a & -R_a & \dots & -R_a & -R_a & -R_a & \dots & -R_a & -R_a & \sum_{k=1}^{N_r-1} -R_a \end{bmatrix} \quad (\text{II.37})$$

Avec :

$$R_{0k} = 2.(R_b + 2.R_e) \quad (\text{II.38})$$

II.2.2 MACHINE AVEC DEUX BARRES CASSEES ADJACENTES

Dans le cas de rupture de deux barres adjacentes, le nombre de mailles rotoriques diminue de deux, si la première barre est traversée par les courants i_{rk}, i_{rk+1} et la deuxième est traversée par i_{rk+1}, i_{rk+2} , dans le cas de cassure, ces trois courants sont forcément égaux ($i_{rk} = i_{rk+1} = i_{rk+2}$), ce qui veut dire que le courant i_{rk} traverse une maille trois fois plus large comme mentionné sur la figure suivante :

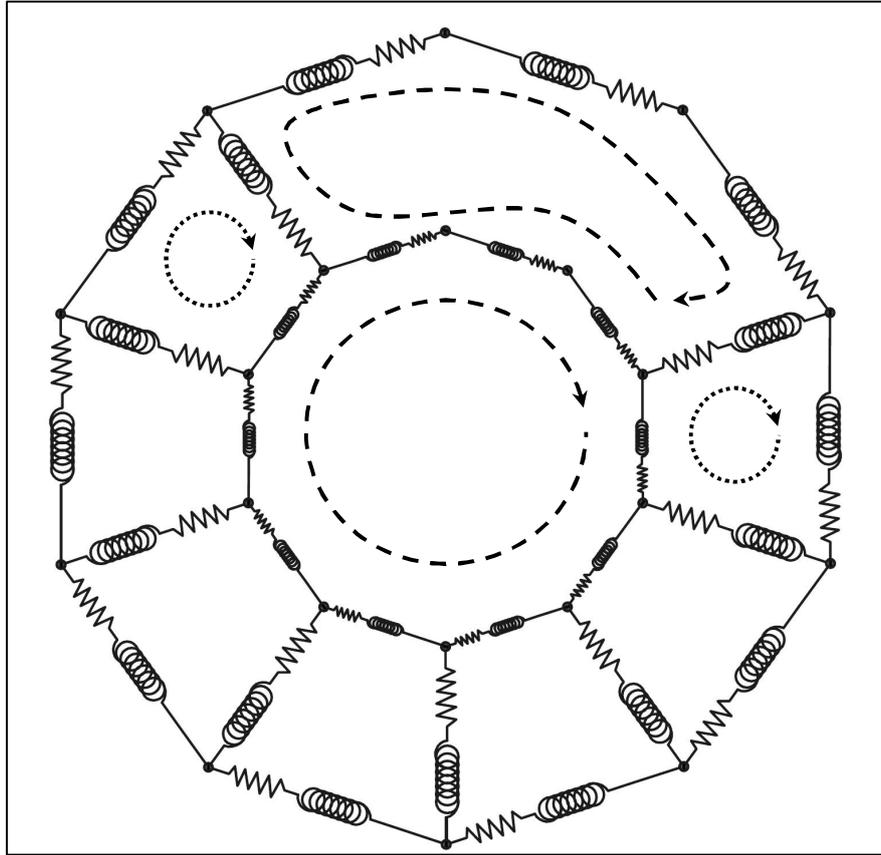


Figure II.5 : Circuit équivalent d'un rotor à cage avec deux barres cassées

La fonction de l'enroulement k dans ce cas est :

$$N_k(\theta) = \begin{cases} -\frac{\alpha_r}{2\pi} & 0 < \theta \leq \theta_k \\ 1 - \frac{\alpha_r}{2\pi} & \theta_k < \theta \leq \theta_{k+3} \\ -\frac{\alpha_r}{2\pi} & \theta_{k+3} < \theta \leq 2\pi \end{cases} \quad (\text{II.39})$$

Le même type de relations appliqué dans le cas d'une seule barre cassée est employé pour le calcul des nouvelles matrices d'inductance et de résistance dans ce cas :

$$L_{0k} = Lm_{bkk} + 2.(L_b + 3.L_e) \quad (\text{II.40})$$

Avec :

$$Lm_{bkk} = \frac{\mu_0 \cdot l \cdot r}{g} \int_0^{2\pi} N_k^2(\theta) \cdot d\theta = \frac{\mu_0 \cdot l \cdot r}{g} \cdot \alpha_r \cdot \left(3 - \frac{5\alpha_r}{2\pi} \right) \quad (\text{II.41})$$

La mutuelle inductance rotor- rotor est :

$$Lm_{bik} = \frac{\mu_0 \cdot l \cdot r}{g} \int_0^{2\pi} N_i(\theta) \cdot N_k(\theta) \cdot d\theta = -3 \cdot \frac{\mu_0 \cdot l \cdot r}{g} \cdot \frac{\alpha_r^2}{2\pi} \tag{II.42}$$

La mutuelle inductance stator- rotor est :

$$M_{s_a s_k} = \frac{\mu_0 \cdot l \cdot r}{g} \int_0^{2\pi} N_a(\theta) \cdot N_k(\theta) \cdot d\theta = L_m \cdot \cos(\theta_r + 3 \cdot (k - 1) \cdot \alpha_r + \delta) \tag{II.43}$$

La nouvelle résistance rotorique pour la maille k s'écrit dans ce cas :

$$R_{0k} = 2 \cdot (R_b + 3 \cdot R_a) \tag{II.44}$$

II.2.3 RUPTURE D'UNE PORTION D'ANNEAU DE COURT CIRCUIT

La rupture d'une portion d'anneau de court circuit liée à une maille *k* indique que le modèle d'équations est diminué par une seule équation. Alors il suffit d'annuler la *k*^{ème} ligne avec la *k*^{ème} colonne de la matrice des inductances rotoriques, de même pour la matrice des résistances rotoriques. Cependant les autres éléments de ces matrices restent les mêmes.

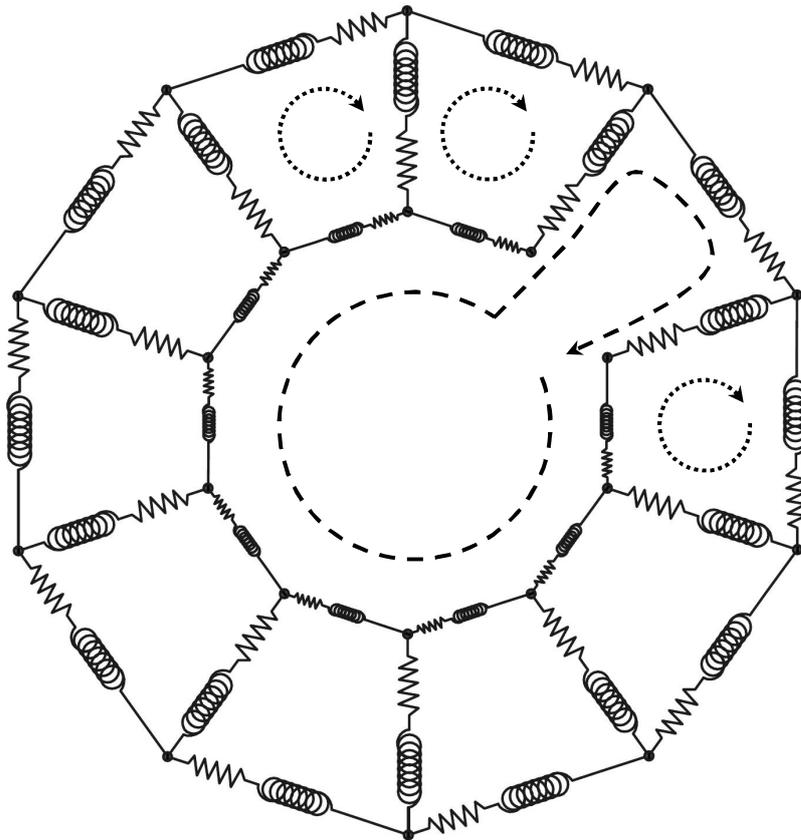


Figure II.6 : Circuit équivalent d'un rotor avec une portion d'anneau de court circuit cassée

Les matrices des inductances et des résistances sont représentées comme suit :

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_0 & M_{r_1 r_2} - L_{f_{b1}} & M_{r_1 r_3} & \dots & M_{r_1 r_{k-1}} & 0 & M_{r_1 r_{k+1}} & \dots & M_{r_1 r_{N_r}} - L_{f_{b_{N_r}}} & -L_a \\ M_{r_2 r_1} - L_{f_{b1}} & L_0 & M_{r_2 r_3} - L_{f_{b2}} & \dots & M_{r_2 r_{k-1}} & 0 & M_{r_2 r_{k+1}} & \dots & M_{r_2 r_{N_r}} & -L_a \\ \vdots & \vdots \\ M_{r_{k-1} r_1} & M_{r_{k-1} r_2} & M_{r_{k-1} r_3} & \dots & L_0 & 0 & M_{r_{k-1} r_{k+1}} & \dots & & -L_a \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ M_{r_{k+1} r_1} & M_{r_{k+1} r_2} & M_{r_{k+1} r_3} & \dots & M_{r_{k+1} r_{k-1}} & 0 & L_0 & \dots & \dots & -L_a \\ \vdots & \vdots \\ M_{r_{N_r} r_1} - L_{f_{b_{N_r}}} & M_{r_{N_r} r_2} & M_{r_{N_r} r_3} & \dots & M_{r_{N_r} r_k} & 0 & M_{r_{N_r} r_{k+1}} & \dots & M_{r_{N_r} r_{N_r}} & -L_a \\ -L_a & -L_a & -L_a & \dots & -L_a & 0 & \dots & -L_a & \dots & -L_a \end{bmatrix} \sum_{k=1}^{N_r} -L_a \quad (II.45)$$

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_0 & -R_b & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -R_b & -R_a \\ -R_b & R_0 & -R_0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & -R_a \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & -R_b & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -R_b & R_0 & -0 & \dots & 0 & 0 & -R_a \\ \vdots & \vdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -R_b & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & -R_b & R_0 & R_a \\ -R_a & -R_a & -R_a & \dots & -R_a & -R_a & -0 & \dots & -R_a & -R_a & \sum_{k=1}^{N_r-1} -R_a \end{bmatrix} \quad (II.46)$$

Dans le cas général, s'il y a un grand nombre de portions d'anneaux cassées (k), le modèle d'équations sera diminué de k équations, avec l'annulation des mailles liées à ces portions.

CONCLUSION

Le modèle des circuits électriques magnétiquement couplés, ainsi exposé, permet de représenter la machine asynchrone à cage d'écureuil d'une manière satisfaisante. Encore qu'il ne soit pas évident de comprendre toutes les raisons des différentes remarques et constatations car la machine asynchrone est assez complexe.

Sachant que pour les machines à faible rapport longueur utile/diamètre, l'influence du champ dans les têtes de bobine doit être considérée, ce qui peut être fait par la sommation de l'inductance de tête de bobine et les valeurs déterminées par le calcul en deux dimensions.

Dans un souci de clarté, nous suggérons la nécessité d'une correction du modèle proposé pour tenir compte des phénomènes qui ont été négligés par hypothèses simplificatrices adoptées au départ.

Chapitre III

Technique des ondelettes

INTRODUCTION

En réflexion de la sismologie, Morlet [16] a su que les impulsions souterraines modulées envoyées ont une durée trop longue en hautes fréquences pour séparer les retours des couches fines et étroitement alignées. Au lieu d'émettre des impulsions de durées égales, il a ainsi pensé à envoyer des formes d'onde plus courtes en hautes fréquences. De telles formes d'onde sont simplement obtenues en mesurant une fonction simple appelée une ondelette. Bien que Grossmann [16] ait travaillé dans la physique théorique, il a identifié dans l'approche de Morlet quelques idées qui étaient près de son propre travail sur les états logiques de quantum. Presque quarante ans après Gabor, Morlet et Grossmann ont réactivé une collaboration fondamentale entre la physique théorique et le traitement des signaux, qui a mené à la formalisation de la transformée en ondelettes continue. Cependant, ces idées n'étaient pas totalement nouvelles pour les mathématiciens travaillant dans l'analyse harmonique, ou aux chercheurs de vision d'ordinateur étudiant le traitement d'image en multi échelles. C'était ainsi seulement le début d'une catalyse rapide qui a rassemblé des scientifiques de domaine très différent [16,17].

III.1 TRANSFORMÉE EN ONDELETTES CONTINUE

III.1.1 DEFINITION [16-17]

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 s , et translatée par u :

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

Parmi une grande famille des ondelettes, on trouve:

- ✓ Ondelette **gaussienne complexe**.
- ✓ Ondelette **Complexe de Morlet**.
- ✓ Ondelette **gaussienne**.
- ✓ Ondelette **chapeau mexicain**.
- ✓ Ondelette de **Meyer**.
- ✓ Ondelette de **Meyer avec une fonction auxiliaire**.
- ✓ Ondelette de **Morlet**.
- ✓ Ondelette **complexe de Shannon**.

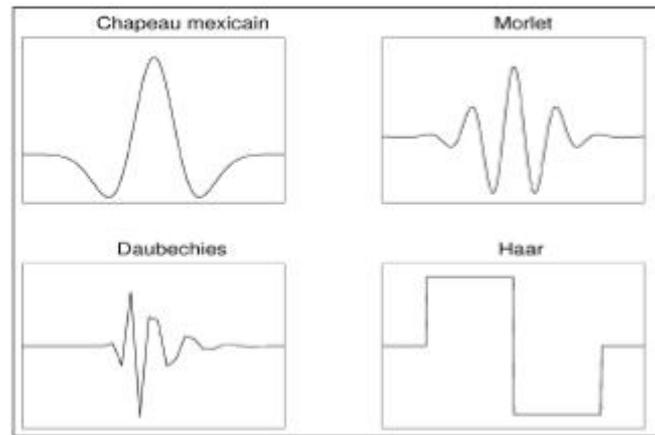


Figure III.1 : Quelques formes des ondelettes usuelles

La transformée en ondelettes continue (TOC) utilise des ondelettes dont l'enveloppe rétrécit avec l'échelle tandis que le nombre d'oscillations reste constant (figure III.2). En effet l'opération de changement d'échelle de facteur u est équivalente à une homothétie du paramètre u sur l'axe des temps de $1/\sqrt{u}$ sur celui des amplitudes. Dans ce cas on obtient une largeur de bande qui augmente avec la fréquence, avec une résolution fréquentielle relative constante [18].

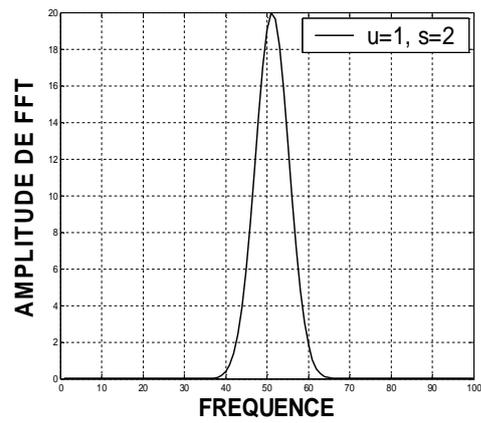
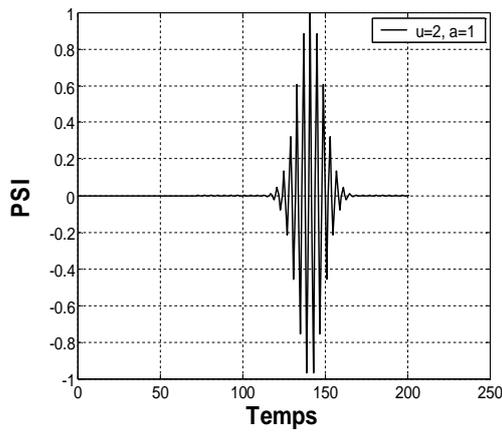
III.1.2 EXEMPLE DE L'ONDELETTE DE MORLET (COMPLEXE)

$$\psi(x) = e^{-\pi x^2} e^{10i\pi x} \quad (\text{III.3})$$

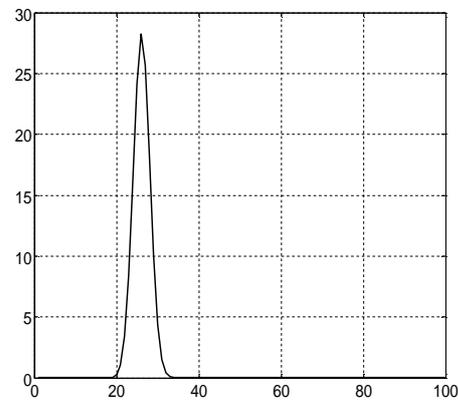
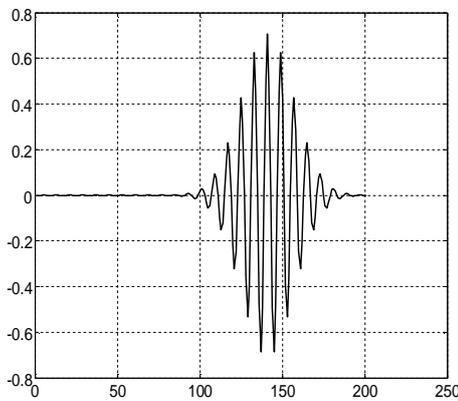
Par la dilatation et la translation dans le temps, on trouve la fonction d'ondelette dilatée et translatée $\psi_{u,s}(t)$:

$$\psi_{u,s}(x) = \frac{1}{\sqrt{s}} e^{-\pi \left(\frac{x-u}{s}\right)^2} e^{10i\pi \left(\frac{x-u}{s}\right)} \quad (\text{III.4})$$

Pour $s=2, u=1$;



Pour $s=2, u=2$;



Pour $s=2, u=4$;

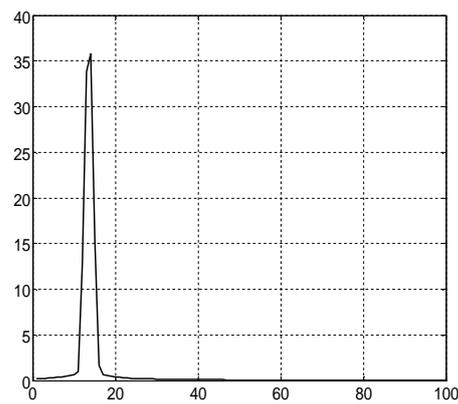
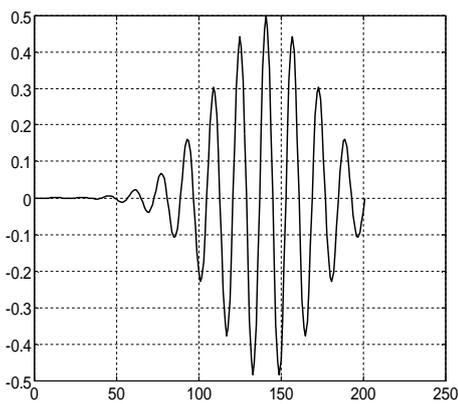


Figure III.2 : Evolution de la forme d'une ondelette temps-échelle (à gauche) et de sa transformée de Fourier (à droite) quand le facteur de position u augmente.

La transformée en ondelettes de la fonction f à l'échelle s et la position u est calculée en corrélant f avec un atome d'ondelette:

$$W f(u, s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi * \left(\frac{t-u}{s} \right) dt \quad (\text{III.5})$$

La transformée en ondelettes a donc une résolution temps-fréquence qui dépend de l'échelle s , sous la condition :

$$C_\psi = \int_0^{+\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{\omega} d\omega < +\infty \quad (\text{III.6})$$

C'est une représentation complète, stable et redondante du signal; en particulier, la transformée en ondelettes est inversible à gauche. La redondance se traduit par l'existence d'un noyau reproduisant.

Comme la transformée de Fourier à fenêtre, une transformée en ondelettes peut mesurer les variations de temps-fréquence des composants spectraux, mais il a une différente résolution de temps-fréquence. Une transformée en ondelettes fait corrélérer f avec $\psi_{u,s}(t)$. En appliquant la formule de Fourier-Parseval sur l'équation (III.5), on obtient cette dernière écrite comme intégration de fréquence:

$$W f(u, s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi_{u,s} * (t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{f}(\omega) \hat{\psi}_{u,s}(\omega) d\omega \quad (\text{III.7})$$

Le coefficient d'ondelettes $Wf(u,s)$ dépend ainsi des valeurs $f(t)$ et $\hat{f}(\omega)$ dans le domaine temps-fréquence où l'énergie de $\psi_{u,s}(t)$ et de $\hat{\psi}_{u,s}(\omega)$ est concentrée. Des harmoniques variables dans le temps sont détectés à partir de la position et l'échelle des coefficients d'amplitude élevés des ondelettes.

En temps, $\psi_{u,s}(t)$ est centrée à u avec une distribution proportionnelle au s que sa transformée de Fourier est calculée à partir de la relation suivante:

$$\hat{\psi}_{u,s}(\omega) = e^{-ju\omega} \sqrt{s} \hat{\psi}(s\omega) \quad (\text{III.8})$$

Où $\hat{\psi}$ est la transformée de Fourier de ψ . pour analyser l'information d'une phase des signaux, une ondelette analytique complexe est utilisée. Ceci signifie que $\hat{\psi}(\omega) = 0$ pour $\omega < 0$. Son énergie est concentrée dans un intervalle positif de fréquence centré à η . L'énergie de $\hat{\psi}_{u,s}(\omega)$ est donc concentrée dans un intervalle positif de fréquence centré à $\frac{\eta}{s}$, dont la taille est mesurée par $1/s$. Dans le plan temps-fréquence, un

atome d'ondelettes $\psi_{u,s}$ est symboliquement représenté par un rectangle centré à $(u, \frac{\eta}{s})$.

La diffusion de temps et de fréquence est respectivement proportionnelle à s et à $1/s$. Quand s change, la longueur et la largeur du rectangle changent mais sa surface reste toujours constante, comme illustré par la figure III.3.

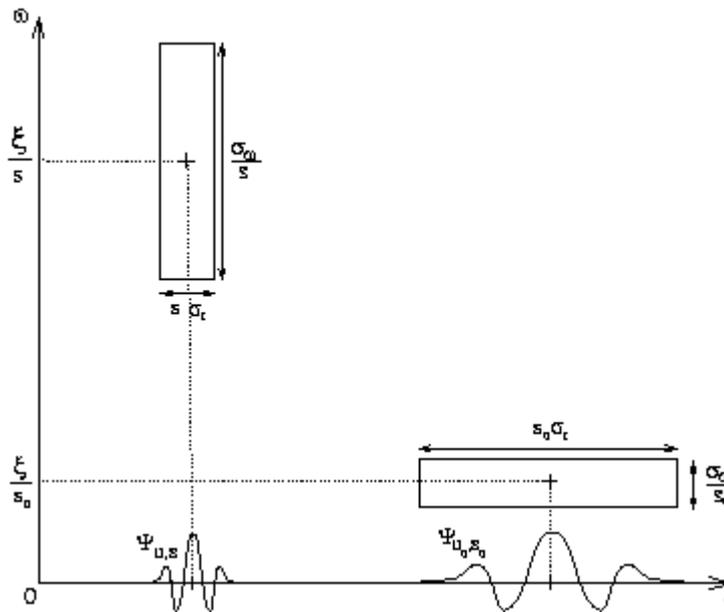


Figure III.3 : Boîtes Temps-fréquence des deux ondelettes $\psi_{u,s}$ et ψ_{u_0,s_0} quand l'échelle s diminue, le support du temps est réduit mais la diffusion de fréquence augmente et couvre un intervalle qui est décalé vers des hautes fréquences.

III.1.3 SCALOGRAMME

En notant η le centre de fréquence de l'ondelette élémentaire, le centre de fréquence d'une ondelette dilatée est $\xi = \eta / s$. Le scalogramme d'un signal est défini par :

$$P_W f(u, \xi) = |Wf(u, s)|^2 = \left| Wf\left(u, \frac{\eta}{\xi}\right) \right|^2 \tag{III.9}$$

Le scalogramme normalisé vaut

$$\frac{\xi}{\eta} P_W f(u, \xi) \tag{III.10}$$

La TOC travaille donc à résolution fréquentielle relative constante. Cela implique:

- ✓ Pour u petit, donc pour les hautes fréquences, une bonne résolution temporelle et une mauvaise résolution fréquentielle.
- ✓ Pour u grand, donc pour les basses fréquences, une mauvaise résolution temporelle et une bonne résolution fréquentielle.

En terme de pavage temps-échelle (ou temps-fréquence), cela se traduit par pavés élémentaires qui se déforment lorsque l'échelle d'analyse varie, leur surface demeurant constante. Dans cette représentation, chaque cellule correspond à la résolution d'analyse pour le point du plan situé en son centre, les lignes horizontales délimitant les bandes des filtres associés.

La TOC, lorsqu'elle est utilisée pour l'analyse des signaux discrets, doit être échantillonnée, c'est-à-dire calculée pour des valeurs discrètes de u et de t . L'implémentation de la transformée continue correspond généralement à un échantillonnage uniforme du temps calqué sur celui du signal, et à la sélection d'un nombre constant d'échelle par bandes d'octaves. Cette implémentation conserve la caractéristique de redondance attachée à la transformée continue, tant du point de vue du temps que de l'échelle.

III.1.4 BASE DES ATOMES DE TEMPS-FREQUENCE

La transformée de Fourier continue à fenêtre $Sf(u, \xi)$ et la transformée en ondelettes $Wf(u, s)$ sont les représentations bidimensionnelles d'un signal unidimensionnel f . Ceci indique que l'existence d'une certaine redondance qui peut être réduite et même enlevée par l'échantillonnage des paramètres de ces dernières transformées.

La transformée de Fourier à fenêtre et la transformée en ondelettes peuvent être écrites en tant que produits intérieurs dans $L^2(\omega)$ avec leurs atomes de temps-fréquence.

$$\begin{aligned} Sf(u, \xi) &= \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) g_{u, \xi}^*(t) dt = \langle f, g_{u, \xi} \rangle \\ Wf(u, s) &= \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{u, s}^*(t) dt = \langle f, \psi_{u, s} \rangle \end{aligned} \quad (\text{III.11})$$

L'échantillonnage des deux transformées définit une représentation complète du signal et n'importe quel signal peut être reconstruit à partir des combinaisons linéaires des familles discrètes des atomes de Fourier à fenêtre $\{g_{u_n, \xi_k}\}_{(n, k) \in \mathbb{Z}^2}$ et les atomes des ondelettes $\{\psi_{u_n, s_j}\}_{(j, n) \in \mathbb{Z}^2}$.

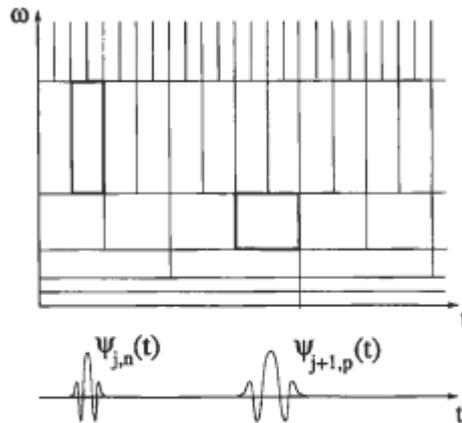
III.1.5 BASES DES ONDELETTES ET BATTERIES DE FILTRES

En 1910, Haar [16,17] s'est rendu compte qu'on peut construire une fonction constante simple par morceaux :

$$\psi(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } 0 \leq t < 1/2 \\ -1 & \text{si } 1/2 \leq t < 1 \\ 0 & \text{sin on} \end{cases} \tag{III.12}$$

Ces dilatations et translations produisent une base orthonormale de $L^2(\mathbb{R})$:

$$\left\{ \psi_{j,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \psi\left(\frac{t - 2^j n}{2^j}\right) \right\}_{(j,n) \in \mathbb{Z}^2} \tag{III.13}$$



FigIII.4 : Boîtes de temps-fréquence d’une base d’ondelette définie le plan temps-fréquence

N’importe quel signal f a une énergie finie peut être décomposé au-dessus de cette base orthogonale des ondelettes $\{\psi_{j,n}\}_{(j,n) \in \mathbb{Z}^2}$.

$$f = \sum_{j=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \langle f, \psi_{j,n} \rangle \psi_{j,n} \tag{III.14}$$

Puisque $\psi(j)$ a une moyenne zéro, chaque somme partielle,

$$d_j(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \langle f, \psi_{j,n} \rangle \psi_{j,n}(t) \tag{III.15}$$

Peut être interprétée comme variations partielles à l’échelle 2^j . Ces couches de détails sont ajoutées à toutes les échelles pour améliorer graduellement l’approximation de f , et récupérer finalement le signal f .

Si f a des variations sans heurt, nous devrions obtenir une approximation précise en enlevant l'échelle, qui est faite en tronquant la somme (III.15). L'approximation résultant à l'échelle 2^j est

$$f_j(t) = \sum_{j=J}^{+\infty} d_j(t) \quad (\text{III.16})$$

Pour une base de Haar, f_j est par morceaux constante. Les approximations par morceaux constantes des fonctions douces sont loin de l'optimal. Par exemple, une approximation par morceaux linéaire produit une petite erreur d'approximation. L'histoire continue en 1980, quand Strijmberg [16] a trouvé une fonction par morceaux linéaire ψ qui également produite d'une base orthonormale et donne des meilleures approximations des fonctions. Meyer ne se rendait pas compte de ce résultat, il a été motivé par le travail de Morlet et de Grossmann qu'il a essayé de montrer qu'il existe aucune ondelette régulière ψ produite d'une base orthonormale. Cette tentative était un échec puisqu'il a fini vers le haut de construire une famille entière avec des bases orthonormales des ondelettes, avec les fonctions ψ qui sont infiniment sans interruption différentiables. C'était l'impulsion fondamentale qui mène à une recherche répandue des nouvelles bases orthonormales des ondelettes, qui ont abouti aux ondelettes célébrées de Daubechies du support compact.

La théorie systématique pour construire les bases orthonormales des ondelettes a été établie par Meyer et Mallat par l'élaboration des approximations du signal de multi-résolution. Elle a été inspirée par des idées originales développées dans la vision d'ordinateur par Burt et Adelson pour analyser des images à plusieurs résolutions. à creuser plus dans les propriétés des ondelettes orthogonales et des approximations multi-résolution a mis en évidence une relation d'étonner avec des batteries de filtres.

III.2 LA TRANSFORMÉE EN ONDELETTES DISCRÈTE ET ANALYSE MULTI-RESOLUTION

III.2.1 LA TRANSFORMÉE EN ONDELETTES DISCRÈTE

La transformée en ondelettes discrète est issue de la version continue, à la différence de cette dernière, la TOD utilise un facteur d'échelle et une translation discrétisée. On appelle transformée en ondelettes discrète dyadique toute base d'ondelettes travaillant avec un facteur d'échelle $u = 2^i$. Il est clair que la transformée en ondelettes discrète est pratique en implémentation sur tout système numérique (PC, DSP, CARTE à $\mu\text{P}...$)[21].

Il est à noter que la transformée en ondelette continue TOC est aussi implantable sur les systèmes digitaux avec un lourd calcul provenant de la nature continue du facteur d'échelle et de la dilatation (Toutes les valeurs sont possibles).

L'analyse en multi-résolution permet d'analyser un signal en différentes bandes de fréquences, ce qui permet une vue de la plus fine à la plus grossière.

Soit ϕ la fonction échelle. Elle doit être dans L^2 et ayant une moyenne non nulle.

On forme une base de fonctions d'échelle pour tout $i \in \mathbb{Z}$ comme suit :

$$\phi_{i,j}(t) = 2^{-i/2} \phi(2^{-i}t - j) \quad (\text{III.17})$$

et de la même manière la base d'ondelette :

$$\psi_{i,j}(t) = 2^{-i/2} \psi(2^{-i}t - j) \quad (\text{III.18})$$

Le facteur d'échelle dyadique mène à :

$$\phi(t) = \sum_j 2h(j)\phi(2t - j) \quad (\text{III.19})$$

$$\psi(t) = \sum_j 2g(j)\psi(2t - j) \quad (\text{III.20})$$

Les équations (III.19) et (III.20) représentent la décomposition de la fonction échelle et de l'ondelette en combinaisons linéaires de la fonction échelle à la résolution haute directement.

On note que $h(j)$ et $g(j)$ sont les filtres passe bas et passe haut respectivement lors d'une décomposition par ondelettes.

III.2.2 ALGORITHME DE MALLAT

Cet algorithme est schématisé par la structure suivante :

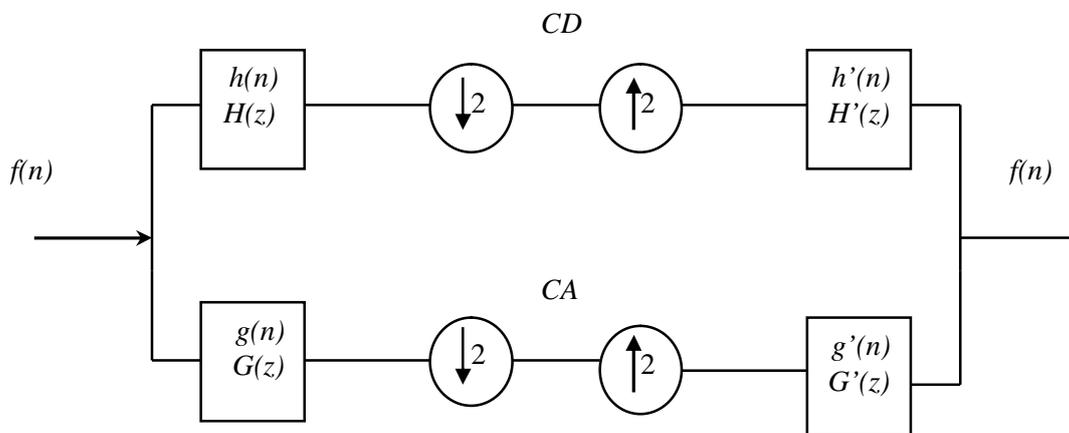


Figure III.5: Algorithme de MALLAT unidimensionnel

$H(z)$, $G(z)$, $H'(z)$ et $G'(z)$ représentent respectivement la transformée en z de $h(n)$, $g(n)$, $h'(n)$ et $g'(n)$.

Le signal $f(n)$ est décomposé par les deux filtres d'analyse $h(n)$ (filtre basses fréquences) et $g(n)$ (filtre hautes fréquences) pour donner deux vecteurs respectivement CA (Coefficients ondelette d'approximation) et CD (Coefficients ondelette de détails). Tous deux sont de taille approximativement égale à la moitié du vecteur d'origine. Ceci est dû au fait de l'opération de décimation par 2 (down sampling).

La reconstruction parfaite est théoriquement possible. Les deux vecteurs CA et CD , en les faisant passer par un sur-échantillonnage (upsampling) puis un filtrage en utilisant respectivement les filtres $h'(n)$ (filtre passe bas de reconstruction) et $g'(n)$ (filtre passe haut de reconstruction), donnent en somme le vecteur d'origine $f(n)$. Cette décomposition/reconstruction est appelée décomposition/reconstruction en banc de filtres. Elle est caractéristique aux signaux unidimensionnels. Le quadruple $(h(n), g(n), h'(n) \text{ et } g'(n))$ forme un banc de filtres miroirs en quadrature [21].

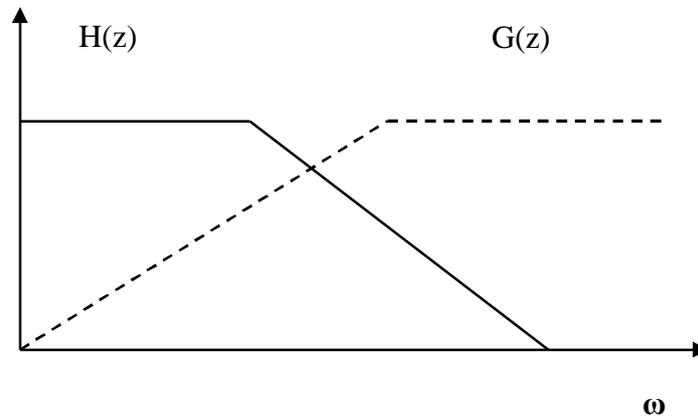


Figure III.6 : Filtres miroirs en quadrature

III.2.3 DECOMPOSITION EN MULTI-NIVEAU DU SIGNAL [21]

L'algorithme de Mallat permet de décomposer le signal f en plusieurs niveaux comme illustré à la figure III.6.

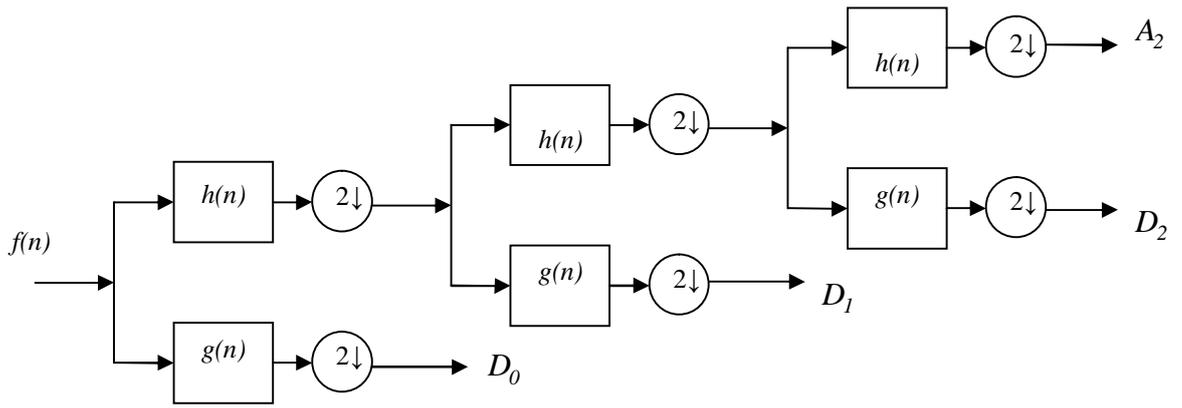
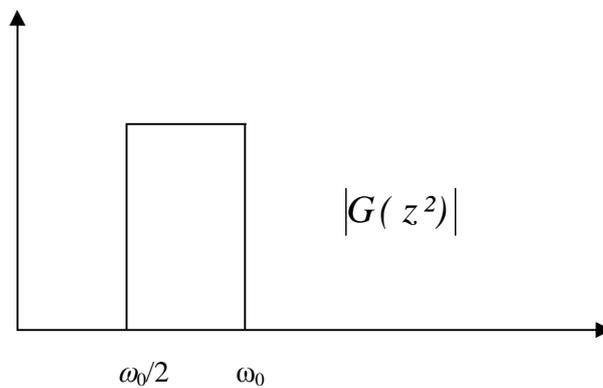
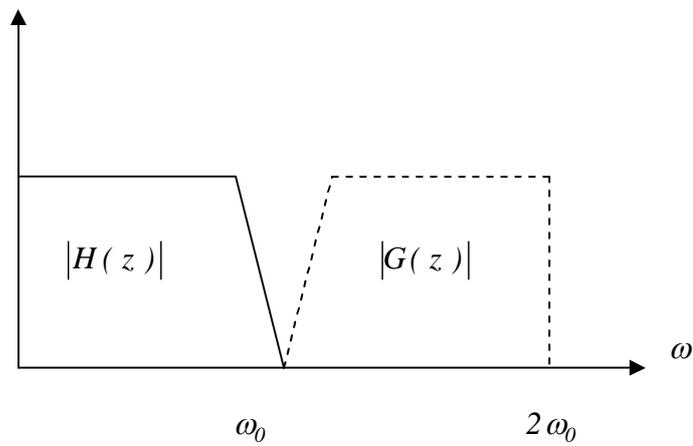


Figure III.7 : Décomposition en multi-niveau du signal $f(n)$

Où

$$\begin{cases} F_{TOD}(0, k) = D_{k,0} = D_0 \\ F_{TOD}(1, k) = D_{k,1} = D_1 \\ F_{TOD}(2, k) = D_{k,2} = D_2 \end{cases} \quad (III.20)$$

TOD: Transformée en ondelettes discrète.



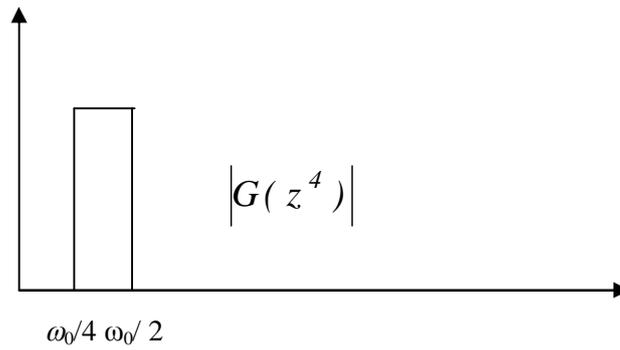


Figure III.8 : Différents filtres obtenus par l'augmentation d'échelle

Les différentes gammes de fréquence sont montrées sur la figure III.8.

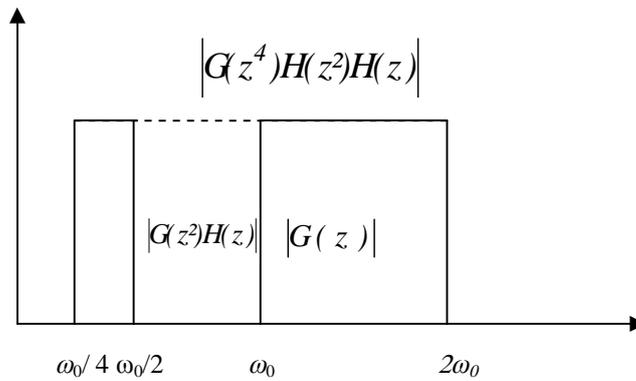


Figure III.9 : Les différentes largeurs de bande

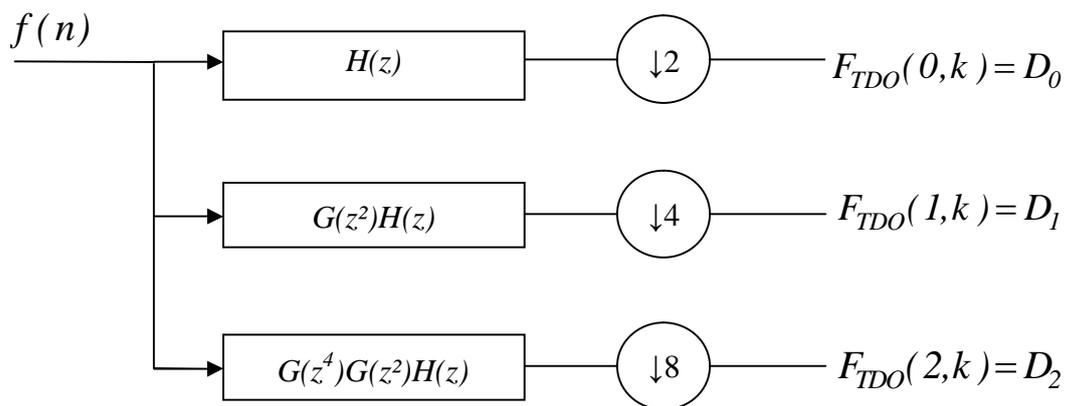


Figure III.10 : Représentation de la théorie de filtre d'une transformée en ondelettes discrète

Le processus de décomposition peut être réitéré, avec des approximations successives étant décomposées alternativement, de sorte qu'un signal soit décomposé en beaucoup de composants de hautes résolutions. Ceci s'appelle l'arbre de décomposition en ondelettes.

Puisque le processus d'analyse est itératif, dans la théorie il peut être continué indéfiniment. En réalité, la décomposition peut procéder seulement jusqu'à ce que les différents détails se composent d'un échantillon ou d'un Pixel simple. Dans la pratique, on choisira un nombre approprié de niveaux basés sur la nature du signal à décomposer, ou sur un critère approprié tel que l'entropie [23].

Le signal $f(n)$ est un signal de temps discret pour être décomposé en ses versions approximatives et détaillées en utilisant l'analyse multi-résolutionnel. Les premiers coefficients de décomposition sont A_1 et D_1 , où A_1 est la version approximative du signal original $f(n)$ et D_1 est la représentation détaillée du signal original $f(n)$ qui est défini dans la figure [24].

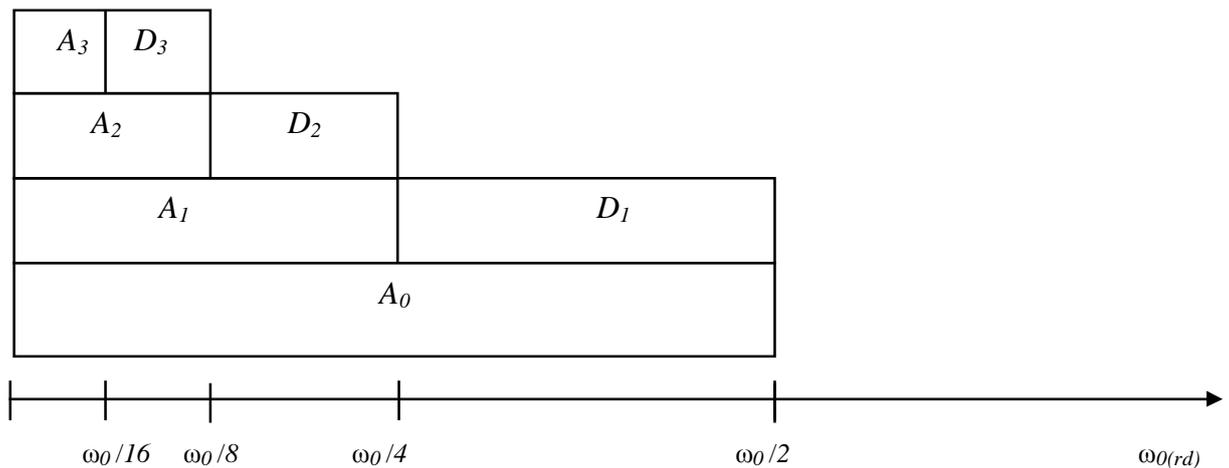


Figure III.11: Dépendance de l'échelle à la fréquence des ondelettes

Lorsque $h(n)$ et $g(n)$ sont les filtres de décomposition de $f(n)$ dans D_1 et A_1 respectivement. Le prochain (en second lieu) niveau de décomposition est basé sur A_1 et les coefficients sont exprimés comme suit:

$$A_2(n) = \sum_k h(k - 2n)A_1(k) \quad (\text{III.21})$$

$$D_2(n) = \sum_k g(k - 2n)A_1(k) \quad (\text{III.22})$$

Des décompositions de niveau supérieur peuvent être obtenues d'un mode semblable. Les coefficients A_j et D_j sont calculés en utilisant l'algorithme de décomposition d'arbre laissant stockée l'information de base du signal fréquence aussi bien que les discontinuités.

Pour décomposer un signal dans la bande de fréquence entière, une décomposition en ondelettes peut être utilisée. Après la décomposition par périodes, nous obtiendrons 2^l bandes de fréquence chacune avec la même largeur de bande :

$$\left[\frac{(i-1)f_n}{2}, \frac{if_n}{2} \right], i = 1, 2, \dots, 2^l \tag{III.23}$$

Telle que f_n est la fréquence de Nyquist dans la bande i de fréquence. D'après la relation (III.23), on peut représenter les différents niveaux de décomposition avec leurs bandes de fréquences (figure III.11).

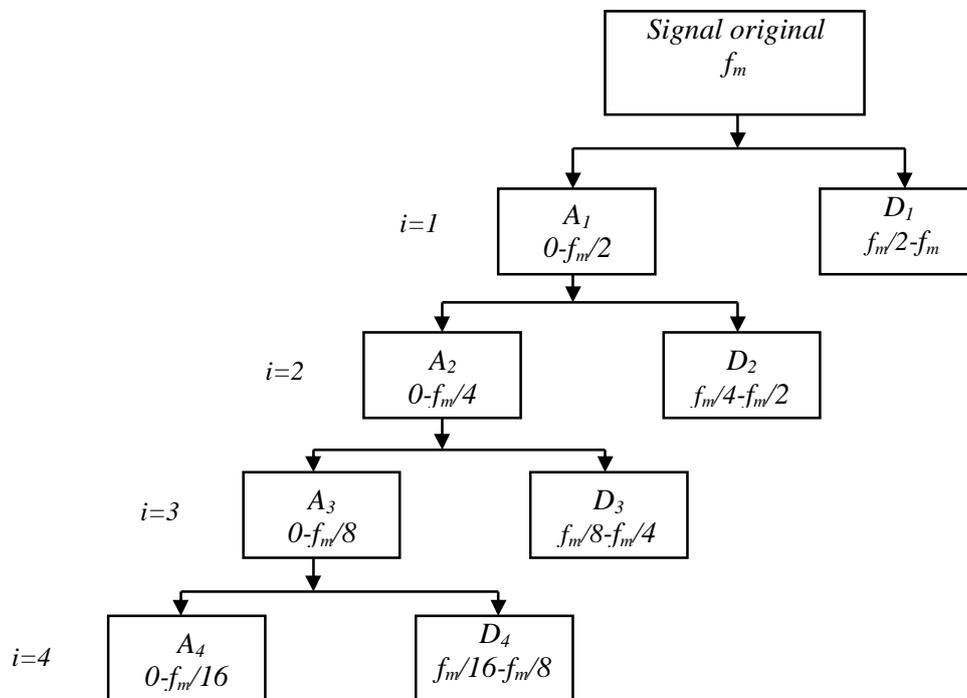


Figure III.12 : Arbre de décomposition d'un signal en quatre niveaux

D'après l'arbre de décomposition (fig.III.11), on peut estimer le signal original à n'importe quel niveau par la somme des signaux approximation et de détail. Pour une décomposition en quatre niveaux, le signal original est reconstruit en chaque niveau comme suit :

$$i=1, f(n) = A_1(n) + D_1(n) \tag{III.24}$$

$$i=2, f(n) = A_2(n) + D_2(n) + D_1(n) \tag{III.25}$$

$$i=3, f(n) = A_3(n) + D_3(n) + D_2(n) \tag{III.26}$$

$$i=4, f(n) = A_4(n) + D_4(n) + D_3(n) \tag{III.27}$$

$$i=k, f(n) = A_k(n) + D_k(n) + D_{k-1}(n) \tag{III.28}$$

III.2.4 DECOMPOSITION EN PAQUET D'ONDELETTES

La méthode de paquet d'ondelettes est une généralisation de la décomposition en ondelettes qui offre une gamme plus riche des possibilités pour l'analyse du signal.

Dans l'analyse en ondelette, un signal est décomposé en approximation et détail. L'approximation est alors elle-même coupée en approximation et détail de deuxième-niveau, et le processus est répété. Pour une décomposition de n -niveau, il y a $(n+1)$ manières possibles de décomposer ou coder le signal [23].

Dans l'analyse en paquet d'ondelettes, les détails aussi bien que les approximations peuvent être décomposés. Ceci rapporte plus de $2^{2^{n-1}}$ de différentes décompositions du signal. L'arbre de décomposition en paquet d'ondelettes est représenté dans la figure III.12.

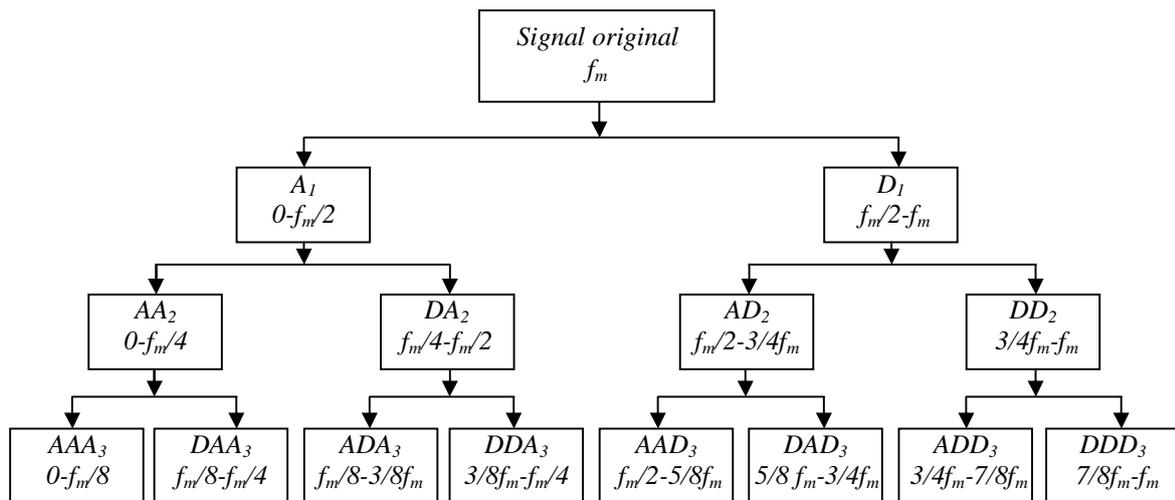


Figure III.13 : Décomposition en paquet d'ondelettes d'ordre 3

De la même façon que la décomposition en ondelettes, le signal original dans la décomposition en paquet d'ondelettes est estimé par la somme des signaux d'approximation et de détail à chaque niveau.

$$i=1, f(n) = A1(n) + D1(n) \tag{III.29}$$

$$i=2, f(n) = AA1(n) + DA2(n) + AD2(n) + DD2(n) \tag{III.30}$$

$$i=3, \quad f(n) = AAA_3(n) + DAA_3(n) + ADA_3(n) + DDA_3(n) \\ + AAD_3(n) + DAD_3(n) + ADD_3(n) + DDD_3(n) \quad (\text{III.31})$$

Le paquet d'ondelettes décompose le signal original qui est stationnaire ou non stationnaire dans des bandes de fréquence indépendantes. Il n'y a aucune information redondante dans les bandes de fréquence décomposées. C'est une approche efficace d'analyse basée sur la multi-résolution et peut être proposée comme méthode de diagnostic de défaut. La transformation en paquet d'ondelettes est une génération de la transformée en ondelettes, par la définition de deux fonctions suivantes :

$$W_0(t) = \varphi(t) \quad (\text{III.32})$$

$$W_j(t) = \psi(t) \quad (\text{III.33})$$

Tel que $\varphi(n)$ et $\psi(n)$ sont la fonction d'échelle et l'ondelette mère respectivement. La décomposition d'ordre m donne la fonction $W_m(n)$ qu'est exprimée par :

$$W_{2m}(t) = 2 \sum_{n=0}^{2N-1} h(n) W_m(2t-n) \quad (\text{III.34})$$

$$W_{2m+1}(t) = 2 \sum_{n=0}^{2N-1} g(n) W_m(2t-n) \quad (\text{III.35})$$

$$W_{j,m,n}(t) = 2^{j/2} W_m(2^{-j}t - n) \quad (\text{III.36})$$

Tels que j : paramètre d'échelle, n : paramètre de localisation en temps.

Dans la pratique, un algorithme rapide est appliqué en utilisant l'étape de base de la figure III.5 (Algorithme de Mallat). La différence est maintenant que les détails et les approximations sont coupés en composants plus fins, ayant pour résultat un arbre de paquet d'ondelettes. Dans la figure III.12, un exemple d'un arbre de décomposition de paquet d'ondelettes de trois niveaux est illustré. Chaque nœud de l'arbre de la décomposition en paquet d'ondelettes est classé avec une paire de nombres entiers (j,k) , où j est le niveau correspondant à la décomposition et k est l'ordre de la position du nœud au spécifique niveau. Dans chaque niveau j , il y a 2^j nœuds et leur ordre est $k = 0, 1, \dots, 2^j - 1$. Un vecteur de c_{jA} de coefficients de paquet d'ondelettes correspond au chaque nœud (j,k) , La longueur d'un c_{jA} de vecteur est approximativement $Nt/2^j$. La reconstitution des signaux est basée sur les coefficients d'approximation et les détails.

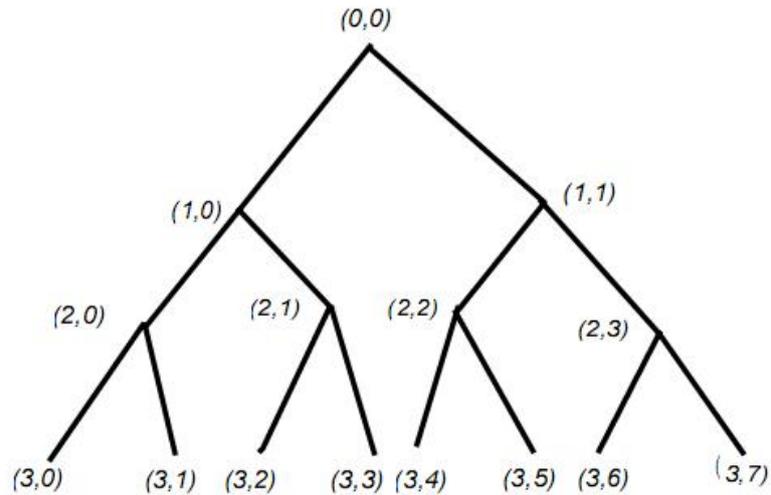


Figure III.14 : Répartition des nœuds dans un arbre de décomposition en paquet d'ondelettes

CONCLUSION

Un aperçu sur les ondelettes continues et discrètes appliqués aux signaux unidimensionnels a bien été détaillé à travers la décomposition en ondelettes discrètes et la décomposition en paquet d'ondelettes. Cette technique qui propose une analyse très fine des signaux permettra par la suite de construire un outil très efficace dans le domaine de traitement de signal en vue de diagnostiquer les machines asynchrones à cage.

Chapitre IV

*Application de la technique des ondelettes au
diagnostic*

INTRODUCTION

L'application de la transformée en ondelette dans le domaine du diagnostic des machines asynchrones à cage a été déjà développée à d'un rythme très rapide. La surveillance et le diagnostic de défaut sont utiles pour assurer le fonctionnement des machines. L'analyse du signal est l'une des méthodes les plus importantes utilisées pour la surveillance et le diagnostic de défaut, dont le but est de trouver une simple et efficace transformée des signaux originaux. Par conséquent, l'information importante contenue dans les signaux peut être extraite. Beaucoup de méthodes d'analyse du signal ont été utilisées pour le diagnostic de défaut, parmi ces méthodes on trouve la FFT (Fast Fourier Transform), une des méthodes les plus extensivement utilisées et les mieux établies. Malheureusement, les méthodes basées sur FFT ne sont pas appropriées à l'analyse des signaux non-stationnaires et ne peuvent pas indiquer l'information inhérente dans ces signaux. Habituellement, les composants non stationnaires contiennent des informations abondantes sur les défauts de la machine donc, il est important d'analyser les signaux non stationnaires. En raison des inconvénients de l'analyse de FFT, il est nécessaire de trouver des méthodes supplémentaires pour l'analyse de la non-stationnarité du signal. L'analyse de Temps-fréquence est la méthode la plus populaire pour l'analyse des signaux de ce type, tels que la distribution de Wigner-Ville (WVD) et la transformée de Fourier à court terme (STFT). Ces méthodes effectuent une transformation du signal unidimensionnel à une fonction bidimensionnelle; et peuvent donc fournir de véritables représentations de temps-fréquence pour le signal, mais chacune des méthodes d'analyse de fréquence-temps souffrent de quelques problèmes [25].

Dans notre travail, l'approche alternative à un tel signal non stationnaire est la transformée en ondelette (TO), qui peut fournir des informations utiles sur n'importe quel signal dans le domaine de temps avec différentes bandes de fréquence. La TO donne la résolution variable de temps pour des bandes de fréquence de court terme de TF, qui donne des résolutions constantes. Ce travail donc, présente l'application de la TO pour traiter et analyser des signaux de la machine qui peut être utilisée pour le diagnostic de défaut de la machine asynchrone à cage d'écureuil.

L'application de la TOD dans le domaine du diagnostic de défauts de la machine asynchrone à cage d'écureuil est en général répartie en deux parties essentielles : une application de la TOD aux signaux électriques tels que les courants statoriques, tensions statoriques, vitesses ...etc, et une application aux signaux de vibration de la machine.

IV.1 APPLICATION DE LA (TO) AUX SIGNAUX ELECTRIQUES

La signature du courant statorique ou le courant moteur représente une source très riche en informations concernant les défauts qui se manifestent souvent dans la machine asynchrone, à cet effet la majorité des travaux du diagnostic sont fondus sur l'analyse du courant statorique soit dans sa partie transitoire ou dans sa partie permanente.

IV.1.1 APPLICATION DE LA TOD AU COURANT STATORIQUE TRANSITOIRE

Le démarrage d'un moteur asynchrone comporte la période qu'elle vient après la mise sous tension. Pendant cette période, la machine accélère de l'arrêt à la vitesse évaluée. Dans une machine asynchrone saine, le courant de démarrage a une amplitude variable, et la figure IV.1 présente un courant de démarrage d'une machine asynchrone à cage avec $4kW$.

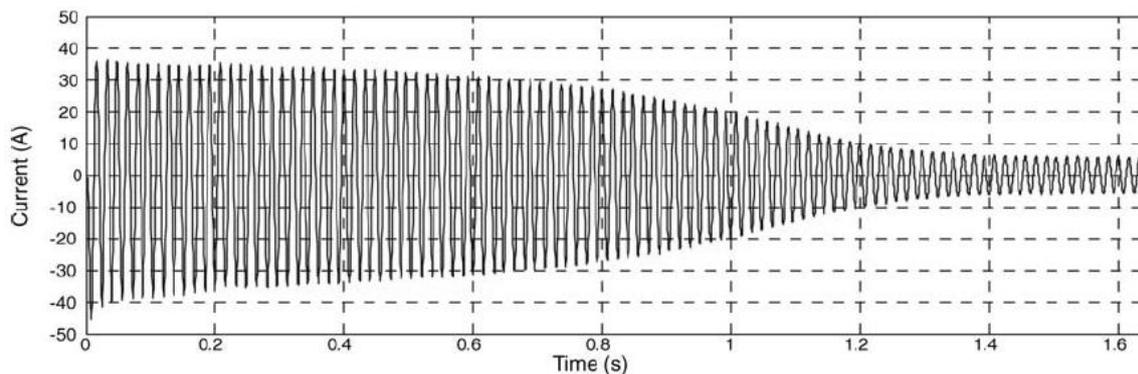


Figure IV.1 : Courant de démarrage statorique d'une machine asynchrone

Quand une rupture de barre rotorique a lieu, une déformation se produit dans l'entrefer. Cette déformation induit plusieurs composants de fréquence dans le spectre du courant statorique [25]. Dans le régime permanent, les fréquences de ces composants dépendent de la vitesse de la machine; parmi ces composants, le plus important utilisé pour le diagnostic des barres cassées du rotor dans les machines asynchrones est l'harmonique gauche du fondamental dont la fréquence est indiquée par :

$$f_{Ls} = f_s (1 \pm 2g) \quad (IV.1)$$

Pendant la période du démarrage il y'a une évolution les harmoniques. Dans la figure IV.2 est tracée cette évolution, calculée pour un transitoire de démarrage simulé. Ce composant peut

être rudement décrit comme onde sinusoïdale, dont la fréquence change continuellement pendant le démarrage avec les changements du glissement (ou vitesse). Les courbes sur la figure IV.2 exposent la variation de la vitesse et de la fréquence de l'harmonique gauche pendant le démarrage respectivement. La fréquence diminue d'une valeur égale à la fréquence d'alimentation ($f = 50$ Hertz) quand la machine est connectée au réseau, et atteint 0 Hertz quand la vitesse du rotor est la moitié de la vitesse de synchronisme ($g=0.5$), elle augmente encore pour atteindre une valeur proche de la fréquence d'alimentation quand le régime permanent est établi [26-30].

Puisque l'amplitude du composant gauche de bande est habituellement beaucoup plus grande que ceux du reste due à la coupure, le courant de démarrage pour une machine avec une barre cassée peut être rapproché par l'ajout du courant de démarrage d'une machine saine plus l'évolution harmonique de la fréquence gauche du fondamental. Cependant, en raison de la basse amplitude de cet harmonique dans le cas du courant, il n'est pas facile de distinguer directement le courant pour une machine défectueuse et celui d'une machine saine. Deux méthodes équivalentes basées sur l'application de la transformée en ondelettes discrètes (TOD) au courant de démarrage sont appliquées pour extraire cet harmonique pendant le démarrage et permettre de diagnostiquer la rupture des barres [26 ,27].

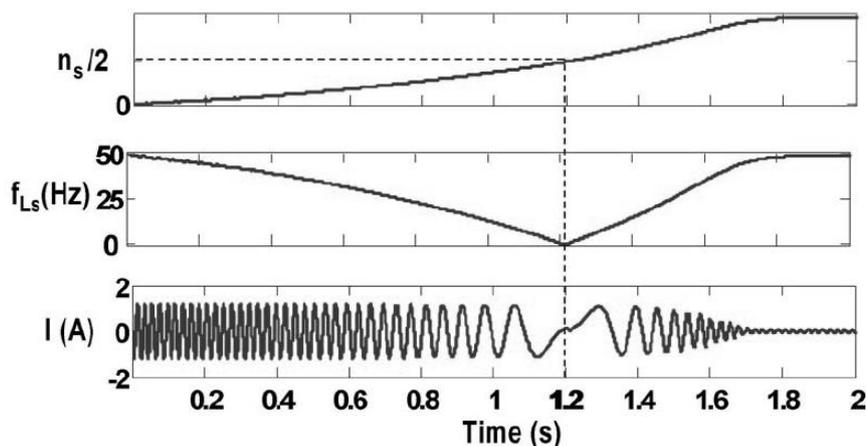


Figure IV.2 : Evolution du composant à gauche en fonction de la vitesse

L'approche est concentrée sur l'analyse des signaux à niveau élevé de détail (et d'approximation) résultant de la décomposition en ondelettes, dont les bandes de fréquence associées sont incluses de 0 jusqu'à la fréquence d'alimentation. La figure IV.3 compare le TOD du courant du démarrage lorsqu'il s'agit de la machine saine (figure IV.3(a)) et de la machine avec une barre cassée (figure IV.3(b)). Pour la machine défectueuse, on peut voir

comment les signaux à niveau élevé D_6 , D_7 et A_7 varient avec l'évolution de la fréquence gauche de bande : il y a des incréments dans l'énergie de D_6 (bande de fréquence $[12,8, 25,6 \text{ Hz}]$), de D_7 (bande de fréquence $[6,4, 12,8 \text{ hertz}]$) et dans des 7 (bande de fréquence $[0, 6,4 \text{ hertz}]$), il y a encore apparition d'oscillations dans D_7 et D_6 . Cette configuration caractéristique des signaux à niveau élevé D_6 , D_7 et A_7 dans le courant de démarrage tient compte d'un diagnostic fiable de la rupture des barres.

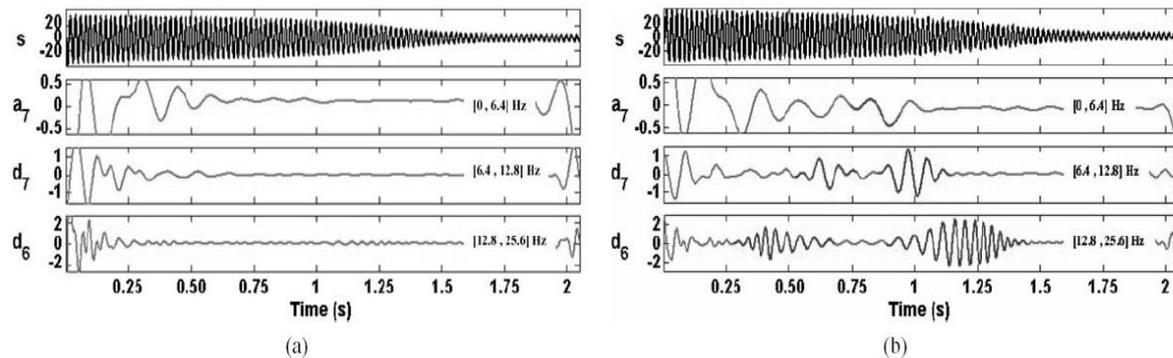


Figure IV.3 : Décomposition du courant du démarrage, a) Machine saine,
b) Machine avec une barre cassée

Puisque selon la théorie des ondelettes, le signal d'approximation au niveau n est l'agrégation de l'approximation au niveau $n - 1$ plus le détail au niveau $n - 1$ (algorithme de MALLAT), il est nécessaire seulement un signal pour refléter l'évolution entière du composant gauche du fondamental. Ce signal est le signal d'approximation dont la bande de fréquence associée s'étend de 0 à f . L'approche proposée est basée sur l'étude de ce signal, comme voie d'extraire l'évolution de l'harmonique et ainsi de diagnostiquer et mesurer la présence des ruptures. La figure IV.4 montre ce signal, obtenu à partir des simulations pour une machine saine (figure IV.4.a) et pour une machine avec deux barres cassées (figure IV.4.b). Comme on le voit, le signal d'approximation ne montre aucune variation pour le premier cas car la machine n'a aucune rupture de barre et, ainsi, la variation du composant gauche de bande de fréquence est négligeable. D'autre part, quand il y a des barres cassées, ce signal prend une évolution qui équilibre pratiquement l'évolution du composant gauche du fondamental pendant le démarrage (figure IV.4.b). On peut voir comment la fréquence de ce signal diminue à zéro et puis augmente encore. D'autre part, ce signal ne reflète pas complètement l'évolution de l'harmonique, puisque sa bande de fréquence ne s'étend pas jusqu'à atteindre la fréquence d'alimentation mais près de cette fréquence.

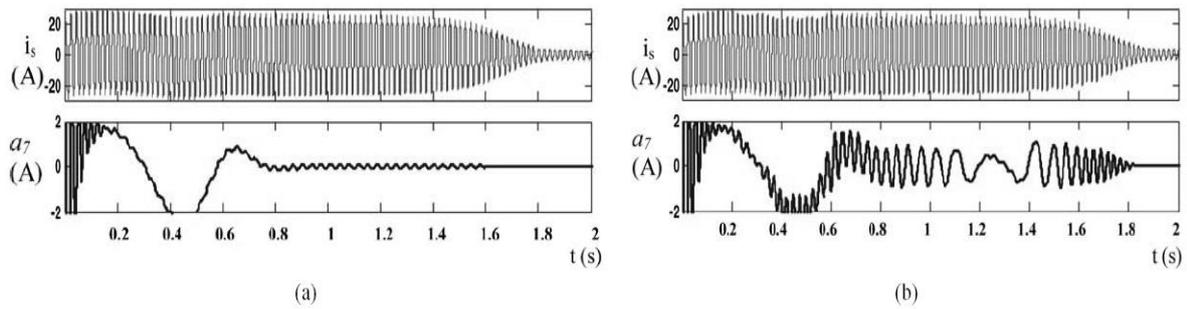


Figure IV.4 : Signal d'approximation A7, a) machine saine
b) machine avec 2 barres cassées

Une méthode utilisant la transformée en ondelettes continue pour extraire l'enveloppe du courant du démarrage statorique est illustrée [28,30], on s'intéressera à la manière d'enlever le fondamental de 50 Hertz dans le signal courant du démarrage et d'obtenir les caractéristiques transitoires et en extrayant l'enveloppe du courant du démarrage. C'est parce qu'un signal transitoire tend à avoir les composants multiplicatifs du signal. Par exemple, considérer le signal transitoire représenté dans la figure IV.5, La figure prouve que le signal transitoire est fait par une multiplication de deux composants de signal, qui sont le composant fondamental du signal transitoire et son enveloppe. Clairement, si le composant fondamental doit être enlevé, le composant à gauche est son enveloppe.

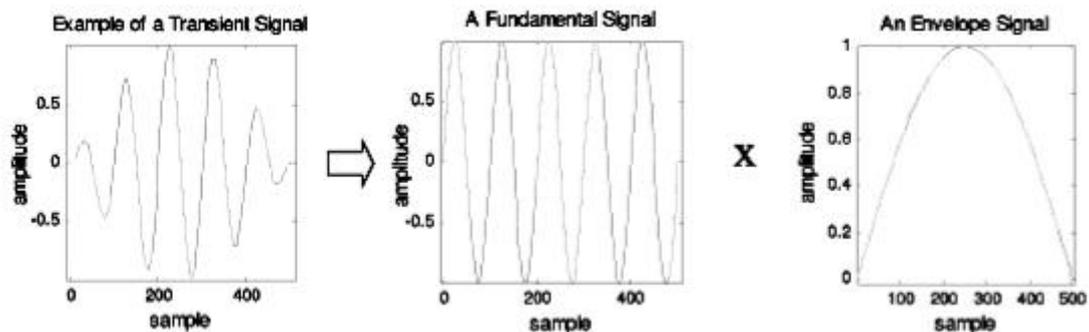


Figure IV.5 : Extraction de l'enveloppe de courant du démarrage

Dans le but d'extraire l'enveloppe d'un signal transitoire, les composants du signal dans le domaine de fréquence doivent être considérés. Dans le domaine de fréquence, le signal transitoire de la figure IV.5 est fait par une convolution du composant fondamental de signal et l'enveloppe du signal transitoire. Cette convolution présente une jupe autour du composant fondamental du signal. Par conséquent, extraire l'enveloppe d'un signal transitoire peut être

réalisé en démodulant le composant fondamental de signal à la bande de base et en filtrant la jupe, qui est équivalente à l'enveloppe du signal transitoire dans le domaine de temps.

Les figures IV.6 et IV.7 montrent l'amélioration obtenue en appliquant la transformée en ondelette continue (TOC) sur l'enveloppe du courant de démarrage au lieu de l'appliquer directement au signal lui-même. La figure IV.6 prouve qu'en appliquant TOC sur l'enveloppe, le composant fondamental de 50 Hertz a été enlevé avec succès. En conséquence, une analyse du transitoire plus précise peut être exécutée et étudiée.

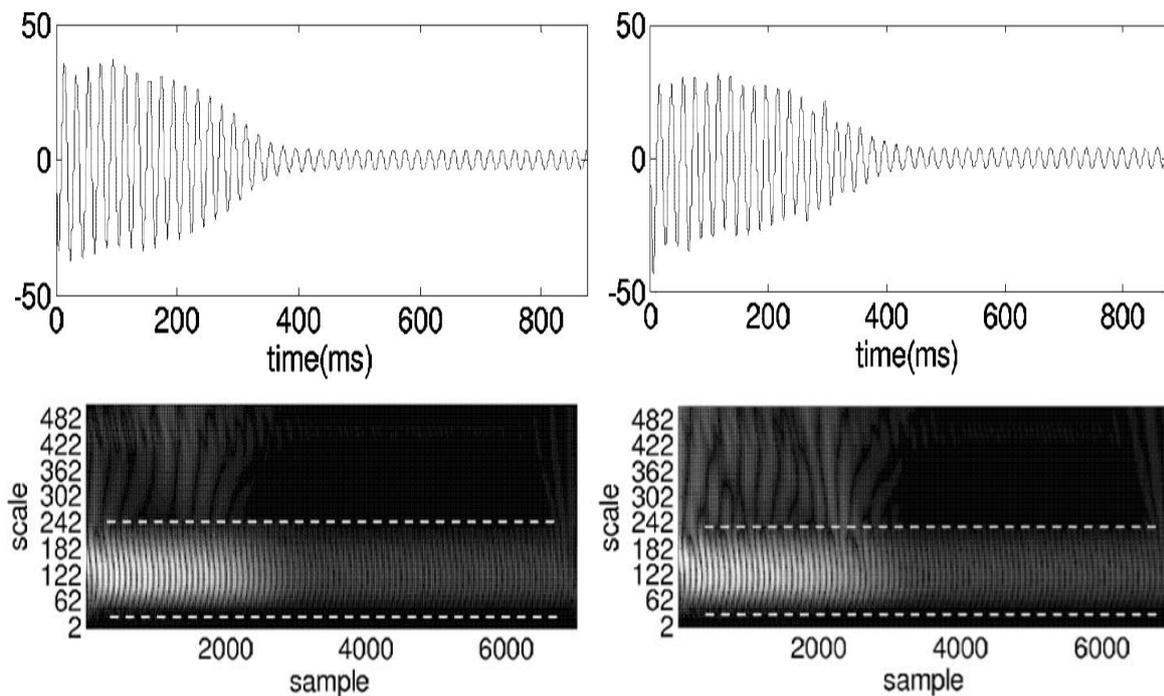


Figure IV.6 : Courants de démarrage d'une machine saine et une machine avec une barre cassée avec leur transformée en ondelettes

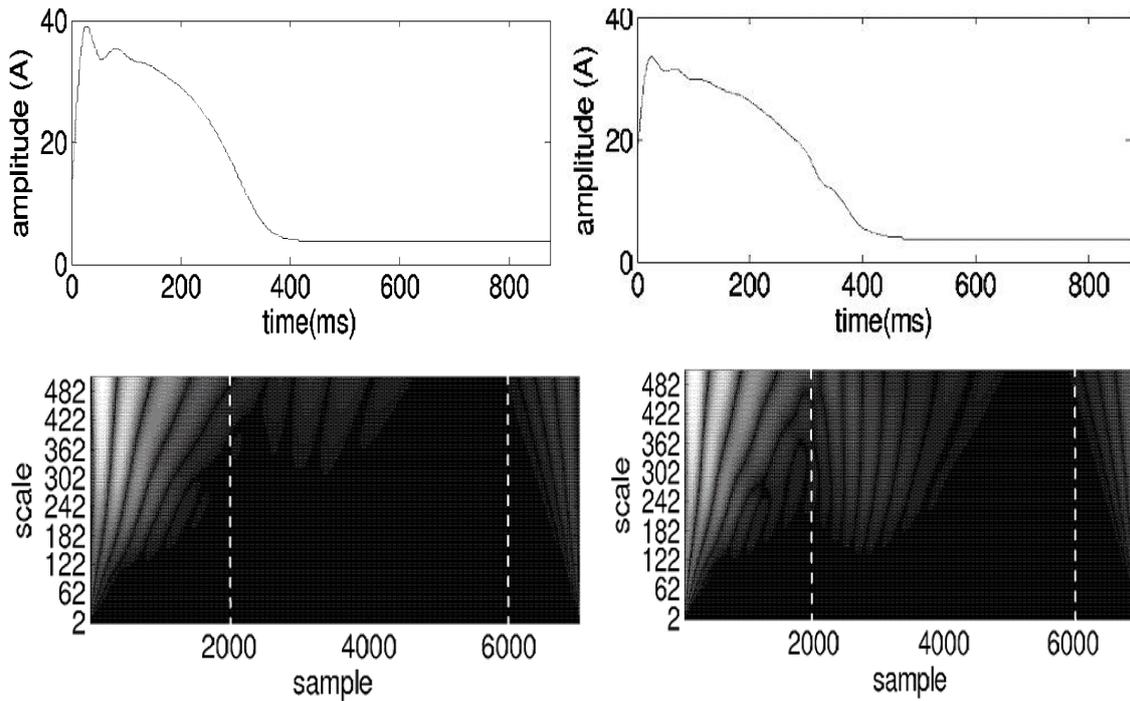


Figure IV.7 : Enveloppe de courants du démarrage d'une machine saine et une machine avec une barre cassée avec leurs transformée en ondelettes

Les modèles décrits dans cette méthode sont confirmés par des résultats de l'analyse par ondelette. Les différences entre les modèles d'un moteur sain et les modèles d'un moteur défectueux avec des barres cassées doivent être mesurées dans la limite des nombres pour une identification plus commode et probablement système de surveillance. Ces différences de modèle sont mesurées en calculant la somme de toutes les valeurs absolues des coefficients d'ondelette entre le premier modèle, qui correspond à la partie initiale de l'enveloppe, et le deuxième modèle, qui correspond à l'extrémité du signal. Puis, la valeur résultante est normalisée selon le nombre d'échantillons utilisés, le nombre d'échelles utilisées, et la somme des coefficients d'ondelette dans le premier modèle et le deuxième modèle.

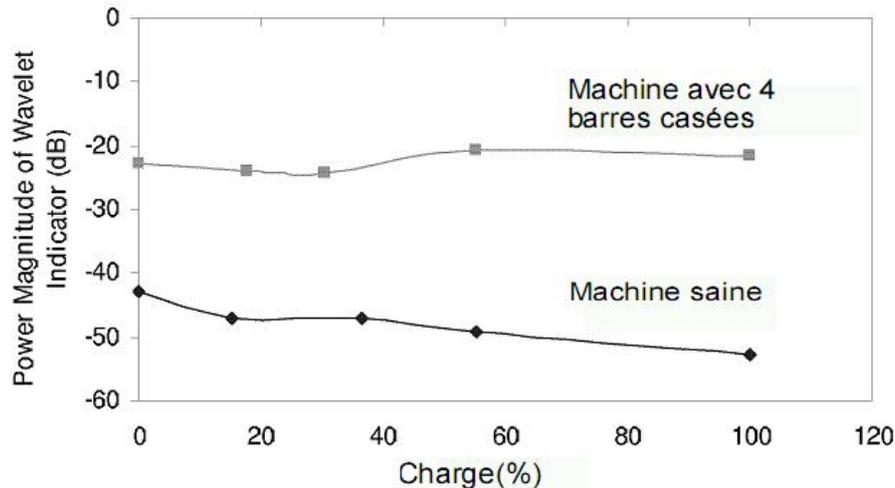


Figure I.V.8 : L'énergie emmagasinée dans la transformée en ondelettes de l'enveloppe

Remarque : Ce type d'analyse par ondelettes du régime transitoire nécessite un transitoire relativement large pour que l'évolution des composants spectraux dus aux défauts soit claire. En effet, et à cause de notre expérimentation qui comporte des machines asynchrones avec des transitoire très rapides (quelques millisecondes) cette méthode d'analyse n'est plus valable ou ne donne pas des résultats vraiment significatifs.

IV.1.2 APPLICATION DE LA TO AU COURANT STATORIQUE EN REGIME PERMANENT

IV.1.2.1 Application de la TOD sans prétraitement des signaux

L'extraction des informations du courant statorique en régime permanent ou à partir d'autres signaux tels que la tension, couple électromagnétique, courant statorique avec prétraitement et vitesse de rotation, est généralement faite en fonctionnement en charge, ce choix est nécessaire à cause de la difficulté rencontrée en fonctionnement à vide pour extraire l'information concernant un défaut dans la machine asynchrone.

L'application de la transformée en ondelettes aux signaux du courant permanents est largement traitée dans plusieurs travaux [31-37]. Basé sur la décomposition multi-résolutionnelle du signal du courant statorique par TOD, la méthode est appliquée aux signatures de la puissance instantanée triphasée, courants statoriques et couple électromagnétique pour la détection de défaut.

L'approche est basée sur l'évaluation d'énergie liée à un niveau élevé de décomposition de TOD, on améliore le diagnostic de défaut de deux manières. D'abord, l'évaluation du glissement est nécessaire pour la localisation des harmoniques liés aux défauts. En second lieu, l'information de décomposition de niveau élevé est exempte de bruit et par conséquent

peut être bien interprétée pour la validation de cette méthode, un dispositif expérimental basé sur une machine asynchrone à cage d'écuriel triphasée avec un système d'acquisition a permis d'acquérir les trois tensions et les trois courants statoriques en même instant. Les résultats montrent l'efficacité de cette méthode pour la détection de défaut de cassures des barres rotoriques [37].

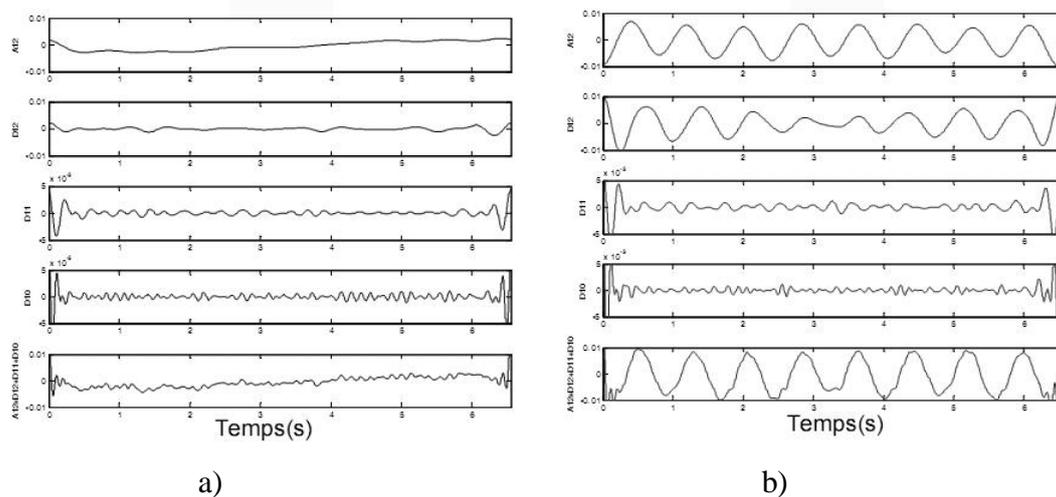


Figure IV.9 : Décomposition en multi-niveau de la puissance instantanée
a) Machine saine, b) Machine avec une barre cassée

Sur la figure IV.9, on peut observer que l'évolution dans les bandes de fréquence d'observation du signal associé au défaut de rotor peut être analysée en utilisant les coefficients $A12$ et $D12$ à $D10$ ou en utilisant seulement le coefficient $A9$ qui fournit toute l'information dans la bande de fréquence qui contient les informations reliées aux défauts.

IV.1.2.2 Application de la TOD avec prétraitement des signaux

Une autre approche basée aussi sur la décomposition du courant statorique en plusieurs niveaux par la transformée en ondelettes discrète, mais cette fois ci le courant est passé par un prétraitement tel que la différentiation, filtrage, extraction du fondamental ...etc [32,33]. La figure IV.10 montre un signal du courant statorique et sa différentiation.

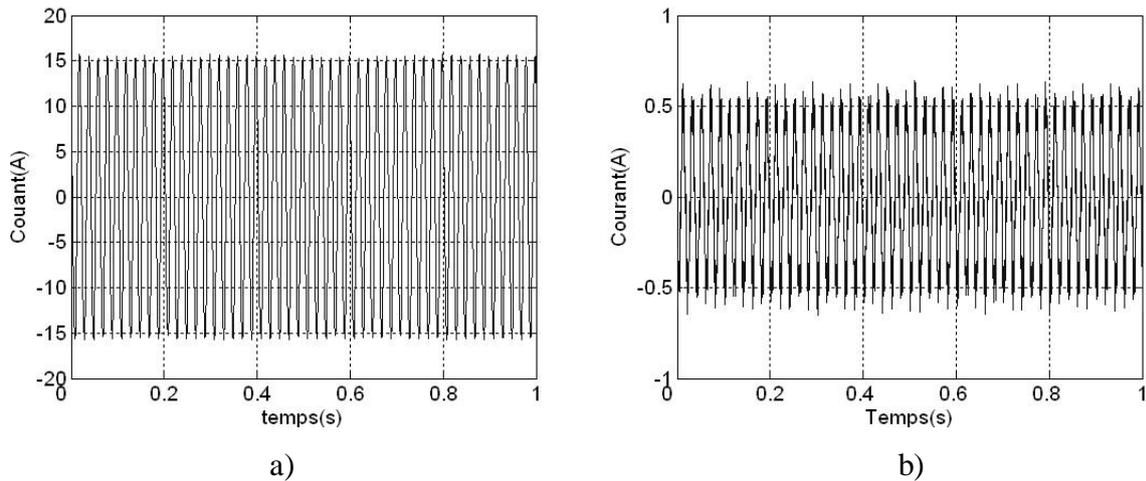


Figure IV.10 : Courant statorique d'une machine saine et sa différentiation

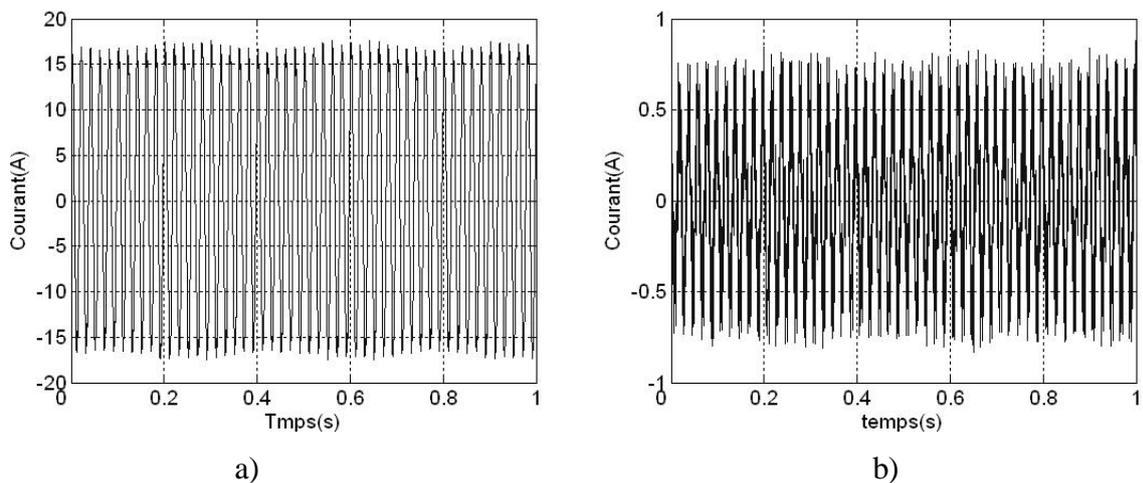


Figure IV.11 : Courant statorique d'une machine avec deux barres cassées et son différentiel

Par comparaison entre figure IV.10 et la figure IV.11, la différence entre les deux signaux courants instantanés n'est pas évidente. Ceci signifie que l'utilisation de la transformée en ondelettes directement sur le signal courant instantané du moteur asynchrone ne peut pas être très efficace. La différentiation du courant instantané par rapport au temps donne un signal plus significatif quand les défauts de cassures des barres rotoriques se produisent dans la machine, c'est à dire plus d'information de défaut est incluse dans le différentiel du signal [30].

L'extraction du fondamental du courant montre que le courant résiduel est très riche en informations dans le cas d'un défaut par rapport à celui d'une machine sans défaut.

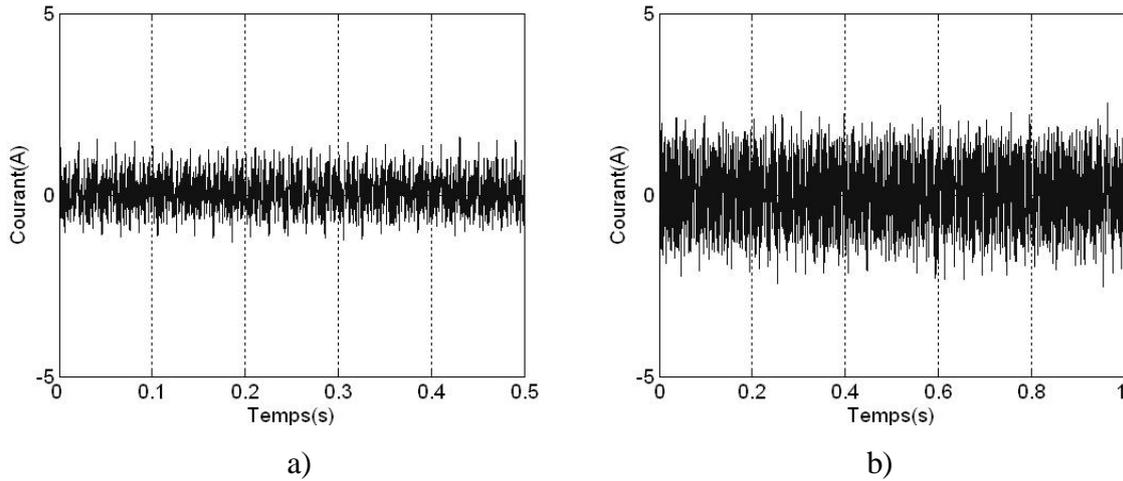


Figure IV.12: Courants résiduels de l'extraction du fondamental du courant statorique
 a) machine saine, b) machine avec 2 barres cassées

Après la différentiation, l'extraction du fondamental du courant statorique ou n'importe quel prétraitement, le diagnostic du défaut est basé sur l'observation et la comparaison entre les niveaux de décomposition qui contiennent l'information du défaut pour différentes machines à diagnostiquer.

Quand le défaut des barres rotoriques, portion d'anneau de court-circuit, court-circuits au niveau des enroulements statoriques du moteur asynchrone apparaît, l'information de défaut du signal du courant statorique est incluse dans chaque bande de fréquence résultante de la décomposition en ondelettes ou en paquet d'ondelettes. En calculant l'énergie associée à chaque niveau ou à chaque nœud de décomposition, on peut construire un outil de diagnostic très efficace.

La valeur propre d'énergie de chaque bande de fréquence est définie par :

$$E_j = \sum_{k=1}^{k=n} |D_{j,k}(n)|^2 \tag{IV.2}$$

Tel que j est le niveau de décomposition ;

Basé sur la valeur propre d'énergie, le vecteur propre est donné par:

$$T = \left[\frac{E_0}{E}, \frac{E_1}{E}, \frac{E_2}{E}, \dots, \frac{E_{2^m-1}}{E} \right] \tag{IV.3}$$

Tel que :

$$E = \sum_{j=0}^{2^m-1} |E_j|^2 \tag{IV.4}$$

Le vecteur propre T contient l'information du signal du courant dans un moteur asynchrone, le tracé de ce vecteur peut être utilisé pour diagnostiquer les défauts dans la machine asynchrone à cage d'écureuil et on peut également identifier le degré de défaut. La déviation de certaine valeur propre indique la sévérité du défaut.

IV.2 APPLICATION DE LA TOD AUX SIGNAUX DE VIBRATION

La présence de n'importe quel type de défaut dans la machine asynchrone change les forces mécaniques et électriques qui agissent dans la machine. Le degré de changement dépend de la nature et de l'intensité du défaut, le changement des vibrations de la machine est l'excitation de certains des harmoniques de vibration. Des investigations analytiques et expérimentales ont permis de constater que certains défauts de la machine peuvent être directement liés à l'harmonique de vibration. La machine asynchrone peut être soumise aux divers types de défauts électriques. L'effet de ces défauts est la déformation dans le flux d'entrefer de la machine. Le degré de déformation dépend du type et du degré de défaut et finalement de la vibration induite. Certains de ces harmoniques ont une valeur dominante dans le spectre de vibration due à l'interaction des harmoniques de flux de machine et de sa structure mécanique. Bien que, les harmoniques induits affectent les composants entiers de fréquence de la vibration, seulement quelques composants sont soumis au changement. Ces composants de fréquence peuvent être utilisés pour détecter la présence des défauts dans la machine. Le tableau IV.1 suivant résume les types communs de défauts électriques de la machine asynchrone à cage d'écureuil et les harmoniques correspondants de vibration, où IX est la fréquence de rotation en tr/s , f est la fréquence du réseau en Hertz, et f_p est la fréquence de pôle $(\Omega_s - \Omega_r)(p/60)$, où p est le nombre de pôles[38-42].

Types de défauts	$f1$	$f2$	$f3$	$F4$	$f5$
Tension d'alimentation déséquilibrée	$1X$	$2f - (f/3)$	$2f$	$2f + (f/3)$	$4f$
Ouverture d'une phase statorique	$1X$	$2f - (f/3)$	$2f$	$2f + (f/3)$	$4f$
Résistances statoriques déséquilibrées; court-circuit spire-spire, phase-neutre et phase-phase.	$1X$	f	$2f$	—	—
Court-circuit dans les laminations	$1X$	$2X$	$2f$	—	—
Pertes fer statoriques	$1X$	$2X$	$2f$	—	—
Cassures de barres rotoriques	$1X + fp$	$1X$	$1X - fp$	$2X$	—
Cassures d'anneaux de court-circuit	$1X + fp$	$1X$	$1X - fp$	—	—
Mauvaise soudure entre les barres du rotor et les anneaux de court-circuit	$1X + fp$	$1X - fp$	—	—	—

Tableau IV.1 : différents type de défauts avec leurs fréquences de vibration [38].

Par exemple, pour une machine ayant 4-pôles, fonctionnant sous un réseau de 50 Hz et tournant avec une vitesse de 1400 tr/mn, les composantes suivantes de vibration apparaissent suite à un défaut de déséquilibre de la tension statorique:

$$f1 = 1400/60 = 23.33 \text{ Hz};$$

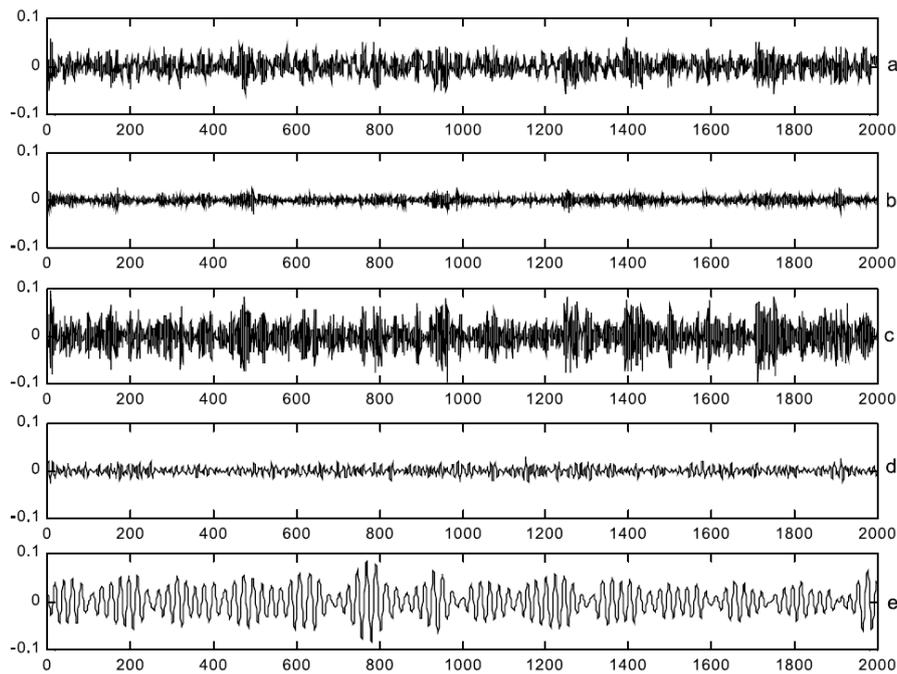
$$f2 = 2.50 - (50/3) = 83.33 \text{ Hz};$$

$$f3 = 2.50 = 100 \text{ Hz};$$

$$f4 = 2.50 + (50/3) = 116.66 \text{ Hz};$$

$$f5 = 4.50 = 200 \text{ Hz}.$$

La décomposition en ondelettes ou en paquet d'ondelettes doit tenir compte de ces fréquences caractéristiques de défauts afin que les bandes de fréquence résulte de la décomposition peuvent couvrir les fréquences caractéristiques. Le calcul de la densité spectrale d'énergie donne une bonne image sur l'information incluse dans chaque décomposition en ondelettes. La figure IV.13 suivante présente le signal de vibration d'une machine asynchrone à cage d'écureuil soumise à un défaut de déséquilibre de tension statique avec la décomposition en ondelettes et la densité spectrale d'énergie associée à chaque signal obtenu par la décomposition [38].



a)

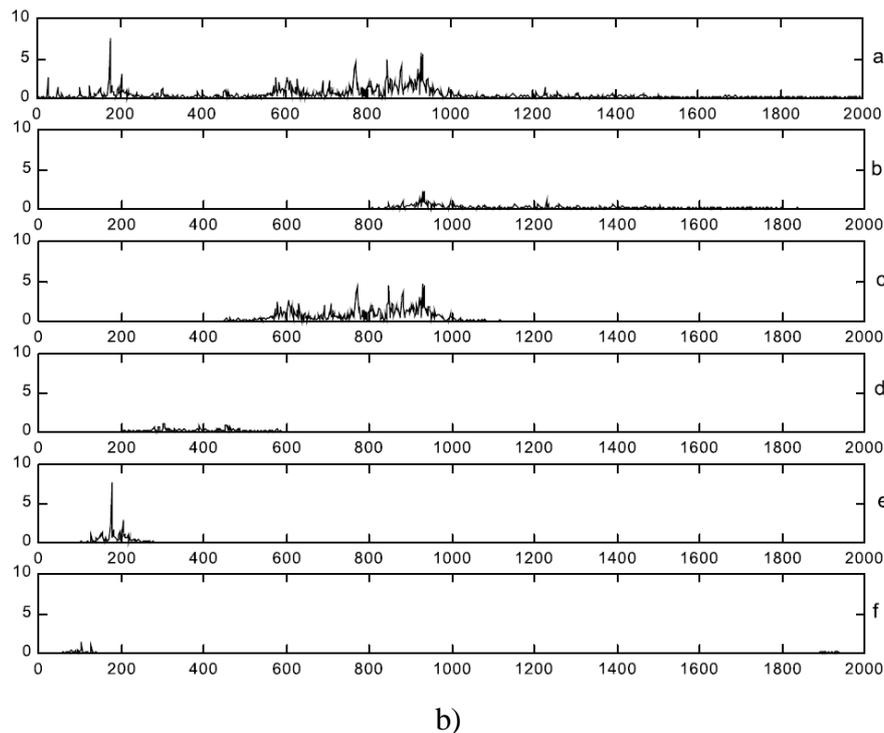


Figure IV.13 : Décomposition en multi-niveau du signal de vibration d'une machine asynchrone avec défaut, a) signaux de détail, b) PSD des signaux de décomposition

Les résultats de la recherche confirment la validité et l'utilité des différentes familles de la transformée en ondelettes qui ont été présentées et mises en application avec des signaux de vibration couvrant les conditions proposées de la machine. Les résultats d'examen des diverses familles des ondelettes montrent différents degrés de succès en reliant la bande décomposée avec l'état de la machine [38]. On conclut que la transformée en ondelettes peut être utilisée efficacement pour indiquer le défaut d'une machine à la fois, alors qu'il ne peut pas traiter les défauts multiples simultanément. Cependant, l'utilisation des ondelettes et de la transformée de Fourier ensemble peut fournir un outil efficace pour extraire des informations importantes sur les conditions de la machine.

IV.3 CRITERE DU CHOIX DE L'ONDELETTE MERE ET L'ORDRE DE DECOMPOSITION

L'extraction des informations des signaux transitoires ou permanents nécessite des choix judicieux pour certains paramètres tels que, la fréquence d'échantillonnage des signaux expérimentaux, le type de l'ondelette, l'ordre de l'ondelette et le niveau de décomposition.

IV.3.1 CHOIX DE LA FREQUENCE D'ECHANTILLONNAGE

Pour une machine asynchrone, l'information significative dans le signal courant statorique est localisée au-dessous de la bande de 0-400 Hz. L'application du théorème de Shannon nous a donné un minimum de 800Hz pour la fréquence d'échantillonnage (f_s). En outre il est nécessaire d'obtenir la résolution correcte. En cas de l'alimentation par onduleur, plusieurs harmoniques pourraient être mélangés si une basse résolution en fréquence est choisie. La résolution minimum requise pour obtenir un bon résultat est de 0.5Hz. L'équation (IV.5) définit le nombre d'échantillons pour avoir la résolution correcte, [26,36] :

$$N_e = \frac{f_s}{R} \quad (IV.5)$$

Telle que R : résolution en fréquence, f_s : fréquence d'échantillonnage et N_e : nombre d'échantillons relevés.

IV.3.2 CHOIX DU NOMBRE DE NIVEAUX DE DECOMPOSITION

Le nombre approprié de niveaux de la décomposition (n_{Ls}) dépend de la fréquence d'échantillonnage (f_s) du signal à analyser. Pour chacune des approches de diagnostic basées sur la décomposition en ondelettes, le nombre de niveau doit être choisi judicieusement afin de permettre aux signaux à niveau élevé (approximation et détails) de couvrir toute la gamme des fréquences le long desquelles le composant dû aux défauts change pendant tous les régimes de fonctionnement.

À partir de la condition suivante, on peut calculer le nombre minimum de niveaux de décomposition nécessaire pour obtenir un signal d'approximation (a_{nf}) de sorte que la limite supérieure de sa bande de fréquence associée soit sous ou au voisinage de la fréquence fondamentale [26] :

$$2^{-(n_{Ls}+1)} f_s < f \quad (IV.6)$$

En effet, le niveau de décomposition du signal d'approximation qui inclut les harmoniques autour du fondamental, est le nombre entier ($n_{Ls}+2$) exprimé par :

$$n_{Ls} = \text{int}\left(\frac{\log(f_s / f)}{\log(2)}\right) \quad (IV.7)$$

Donc pour une fréquence d'échantillonnage de 10KHz, le nombre de décomposition recommandé est de :

$$N_{Ls} = \text{int}\left(\frac{\log(10 * 10^3 / 50)}{\log(2)}\right) + 2 = 9 \text{ niveau} \quad (IV.8)$$

IV.3.3 CHOIX DU TYPE DE L'ONDELETTE MERE

L'ondelette Daubechies 20 (*db20*) est utilisée souvent comme une ondelette mère. Cette fonction d'échelle réduira au minimum le recouvrement entre les bandes de fréquence qui ne peuvent pas être évitées. En fait, le recouvrement n'affecte pas l'exécution de diagnostic dans une vraie application mais il aide à améliorer l'analyse de l'approximation et des détails [26, 31,37,42]. L'ondelette de Morlet est utilisée à sa régularité dans les domaines de temps et de fréquence [43].

CONCLUSION

Les applications de la technique des ondelettes ont couvert presque chaque aspect du diagnostic de défaut. Dans ce chapitre, toutes les applications récentes ont été divisées en trois aspects principaux, y compris l'analyse de temps-fréquence des signaux, l'extraction de dispositif de défaut, la détection de singularité pour des signaux et l'extraction des signaux faibles ainsi que la décomposition des signaux de vibration et l'identification du défaut.

Chapitre V

Resultats expérimentaux

INTRODUCTION

Dans ce dernier chapitre, nous présentons un examen de la technique des ondelettes sur des résultats expérimentaux. Le traitement des signaux est réalisé à l'aide de logiciel MATLAB qui offre un outil de traitement par la technique des ondelettes (WAVELET TOOLBOX), cette boîte d'outils nous permettra de réaliser les différentes applications.

V.1 DESCRIPTION DU BANC D'ESSAI

Pour la validation de la technique des ondelettes par des signaux expérimentaux, nous étions obligés de réaliser un système d'acquisition qui nous permet de relever ces signaux. Ce système d'acquisition comporte :

V.1.1 ALIMENTATION : Une source d'alimentation triphasée équilibrée 127v/220v est utilisée pour l'alimentation directe des différentes machines à diagnostiquer, les câbles d'alimentation doivent être passés par un interrupteur triphasé afin de nous permettre de contrôler la mise en marche.

V.1.2 QUATRE MACHINES ASYNCHRONES A CAGE D'ECUREUIL : dans le but de couvrir la majorité des défauts rotoriques, nous avons utilisé quatre machines asynchrones avec défauts.

Puissance nominale	4	Kw
Tension nominale	220/380	V
Courant nominal	15.3/8.83	A
Vitesse nominale	1435	tr/mn
Facteur de puissance	0.83	
Nombre de paires de pôles	2	
Nombre d'encoches statoriques	36	
Nombre de barres rotoriques	28	
Nombre de spires en série par phase	156	
Inertie de la machine	0.025	Kg.m ²
Coefficient de frottement	0.002	Kg.m ² /s
Résistance d'une phase statorique	1.2	Ω
Coefficient de distribution	0.958	

Tableau V.1 : Caractéristiques principales des machines asynchrones à cage

Les quatre machines sont construites pour les besoins de diagnostic avec des défauts rotoriques comme suit :

- ✓ Machine saine pour l'utilisation de leurs signaux comme référence pour la détection des différents défauts.
- ✓ Machine avec une barre rotorique cassée.
- ✓ Machine avec deux barres rotoriques cassées en adjacence.
- ✓ Machine avec une portion d'anneau de court-circuit enlevée.

La fig.V.1 montre les différents rotors utilisés dans notre test.

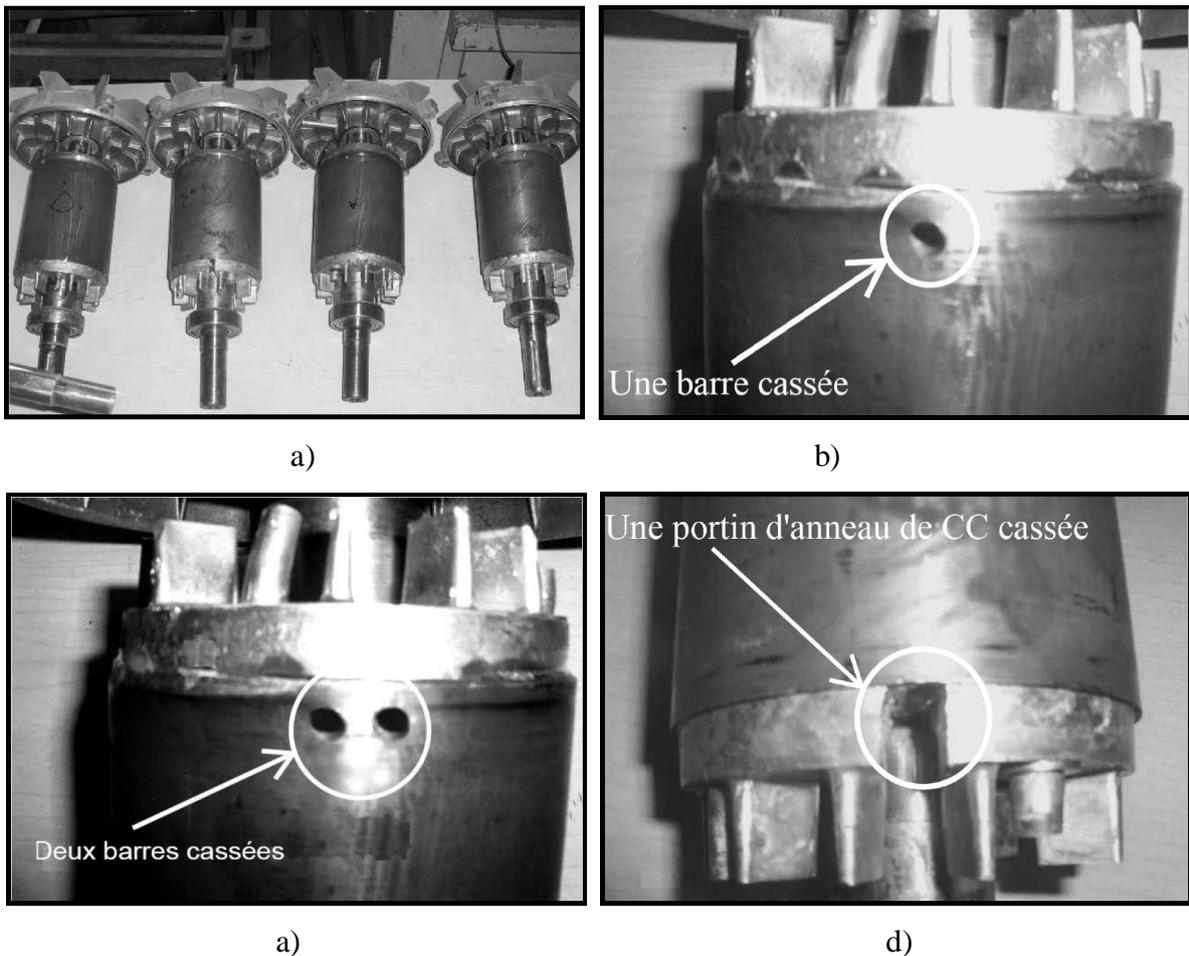


Figure V.1. Différents types de défauts utilisés, (sain + défectueux)

- a) Rotor sain b) Rotor avec une barre cassée, c) Rotor avec deux barres cassées ,
d) Rotor avec une portion d'anneau de court circuit enlevée

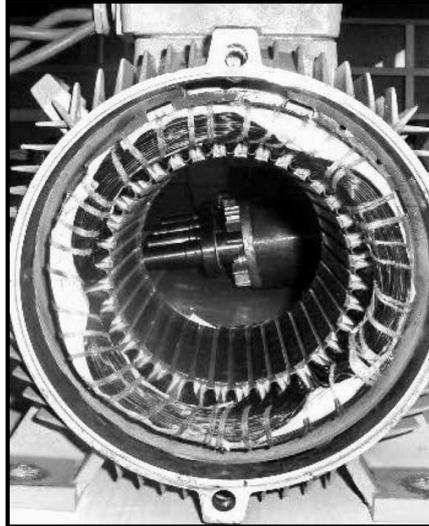


Figure V.2 : Stator de la machine

V.1.3 GENERATEUR A COURANT CONTINU : pour avoir un fonctionnement en charge, nous avons utilisé un générateur à courant continu afin d'obtenir un couple résistant, ce générateur a une puissance utile de $2,4kW$, ce qui limite la charge maximale aux environs de 70% de la charge nominale de la machine asynchrone utilisée.

V.1.4 GENERATEUR TACHIMETRIQUE : monté directement sur l'arbre de la machine pour relever la signature de la vitesse.

V.1.5 CAPTEURS DE COURANT ET DE TENSION : ce sont des capteurs à effet Hall très sensibles et ils peuvent capter des signaux avec des fréquences qui peuvent aller jusqu'à $200kHz$, l'utilisation de ces capteurs nécessite la connaissance de leurs caractéristiques surtout les valeurs maximales du courant et tension à relever. Pour ce faire, le conditionnement du signal est fortement recommandé afin de protéger les capteurs, la Figure V.3 présente une carte qui a été réalisée en vue de conditionner et rassembler les différents signaux.

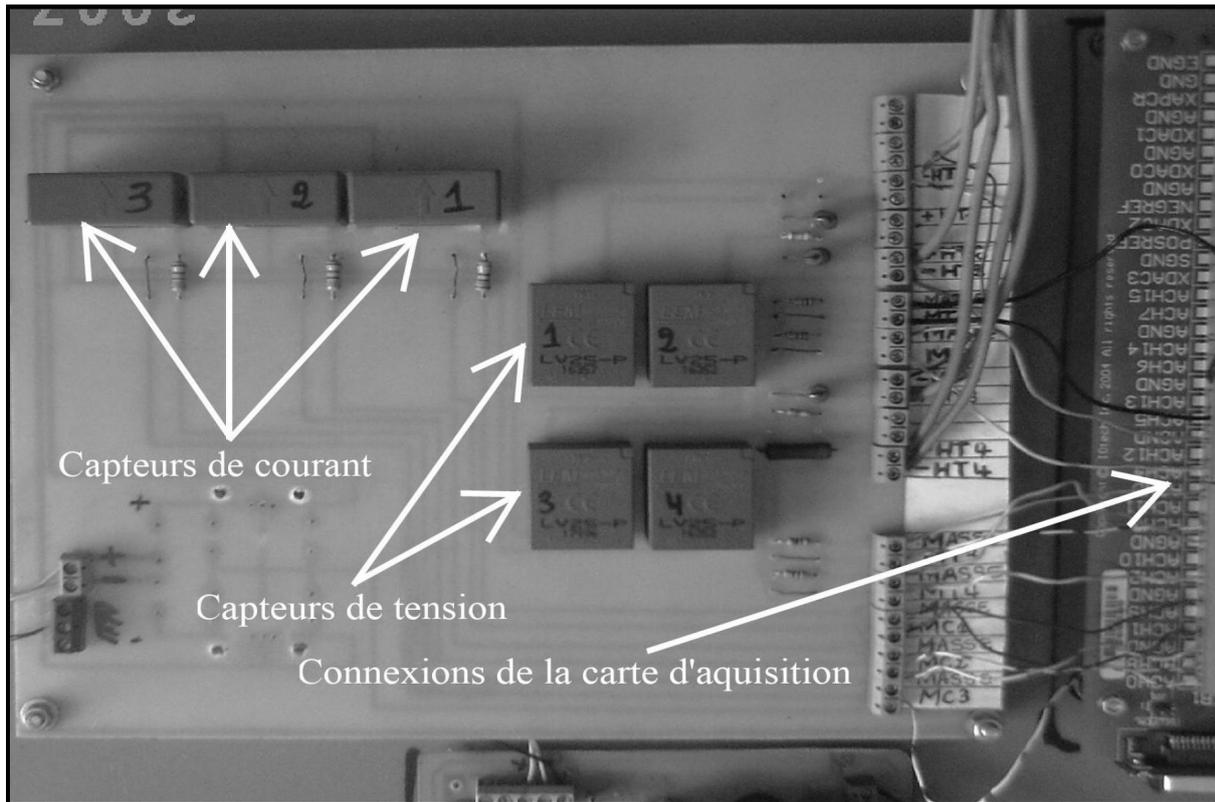


Figure V.3 : Carte pour le conditionnement des signaux

V.1.6 CARTE D'ACQUISITION : Une carte d'acquisition IOTEQ/DAQ series 1005 ayant une fréquence d'échantillonnage de $200kHz$, 16 entrées analogiques, 16 entrées digitales et toutes les entrées peuvent être utilisées comme des sorties, la carte est montée dans un ordinateur et connectée à la carte de conditionnement par câble série pour le transfert des données, en plus la carte a une compatibilité avec plusieurs logiciels comme MATLAB et LABVIEW...etc. Pour notre cas nous avons utilisé le logiciel qui équipe la carte appelée DAQVIEW, ce dernier réalise toutes les tâches nécessaires telles que :

- ✓ Variation de la fréquence d'échantillonnage,
- ✓ Variation du nombre de points à relever,
- ✓ Enregistrement d'un fichier de données sur différents formats (MAT, ASCII, DAT,...etc)
- ✓ Visualisation des signaux en temps réel,
- ✓ Relever plusieurs signaux en même temps,
- ✓ Analyse fréquentielle,

La Figure V.4 représente le schéma du montage préparé au laboratoire incluant tous les éléments précédés. Ce montage permet de relever :

- Les trois courants de phases statoriques
- Les trois tensions statoriques
- La vitesse de rotation

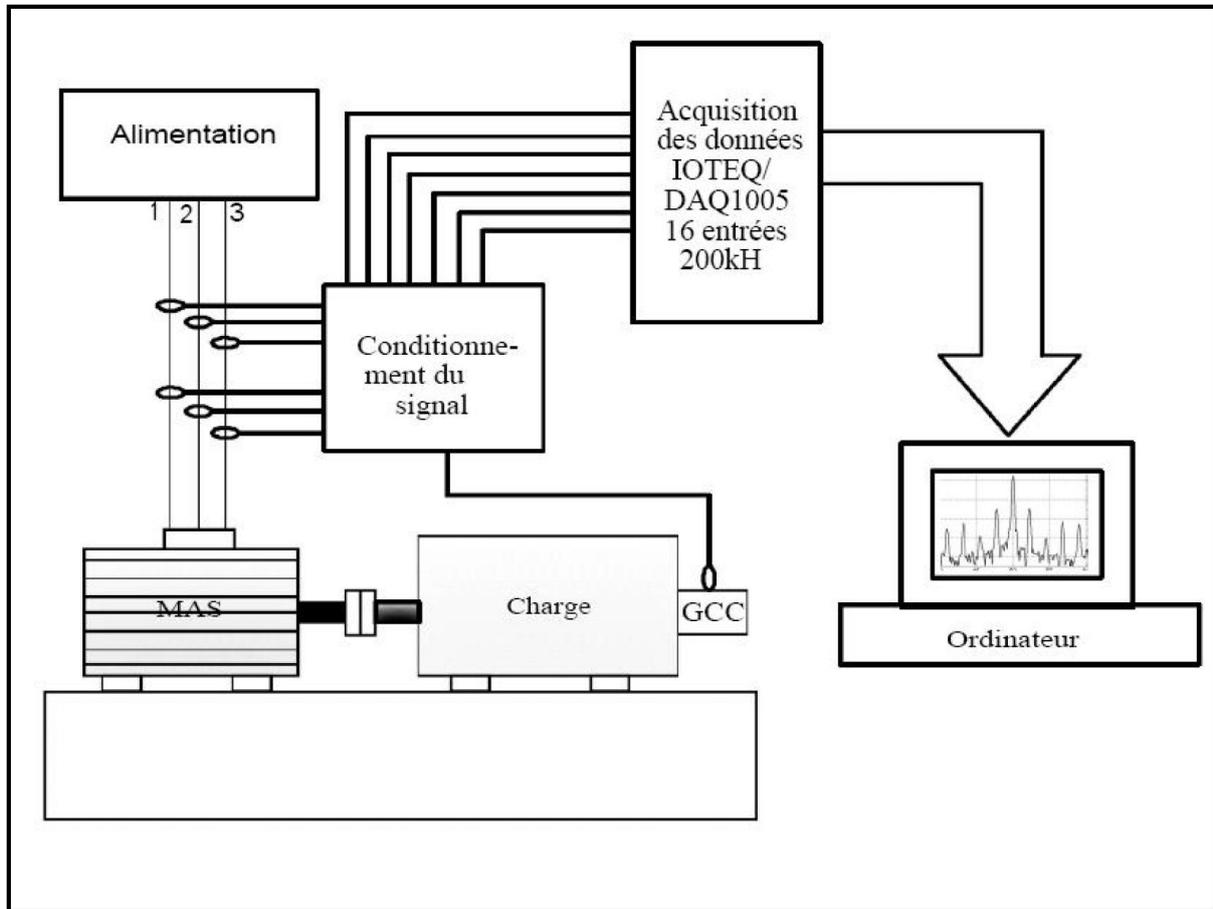


Figure V.4 : Schéma du montage

Pour une meilleure résolution en fréquence et pour éviter l'interférence entre les harmoniques, il faut choisir la bonne configuration pendant l'acquisition des signaux, pour ce faire on a choisi :

- Une fréquence d'échantillonnage de 10kHz ;
- 10s d'enregistrement qui donne un nombre total de 10^5 points enregistrés ;

Ce choix permet d'avoir une résolution R en fréquence très fine tel que :

$$R = \frac{\text{fréquence d'échantillonnage}}{\text{Nombre de points}} = \frac{10000}{100000} = 0.1\text{Hz},$$

Donc : $R=0.1$.

V.2 PRESENTATIONS DE DIFFERENTS SIGNAUX RELEVES

A l'aide du montage précédent, nous avons effectué des tests expérimentaux pour relever la signature des courants statoriques, tensions statoriques et de la vitesse de rotation pour les quatre machines, un essai en fonctionnement en charge (70%), un essai en fonctionnement à vide et un essai de démarrage avec fonctionnement en charge (70%). Les différents signaux relevés sont représentés sur les figures (V.5, V.6 et V.7).

V.2.1 COURANTS STATORIQUES EN REGIME PERMANENT

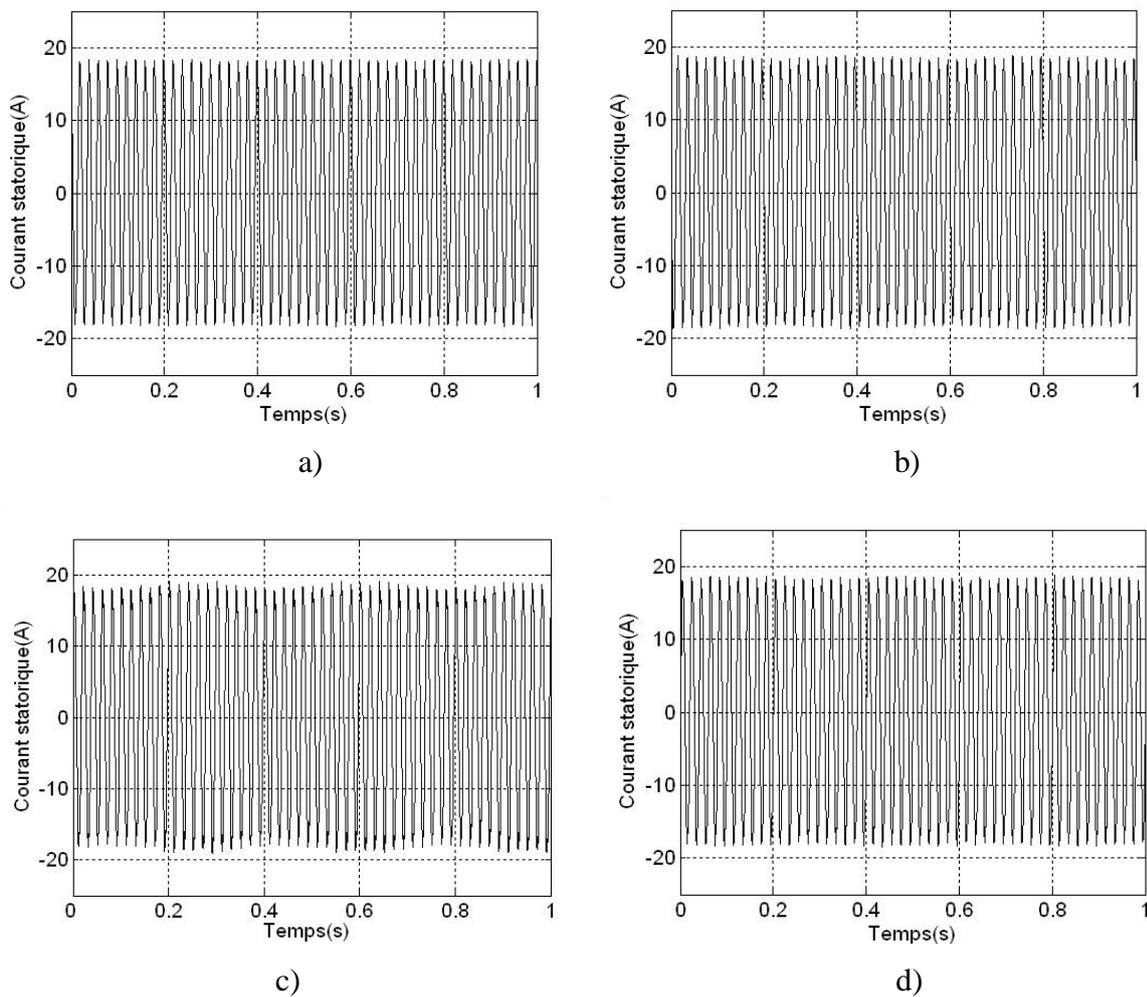


Figure V.5 : Courants statoriques en régime permanent,
 a) Machine saine, b) Machine avec une barre cassée,
 c) Machine avec deux barres cassées d) Machine avec une
 portion d'anneau de court circuit enlevée

V.2.2 TENSIONS STATORIQUES EN REGIME PERMANENT

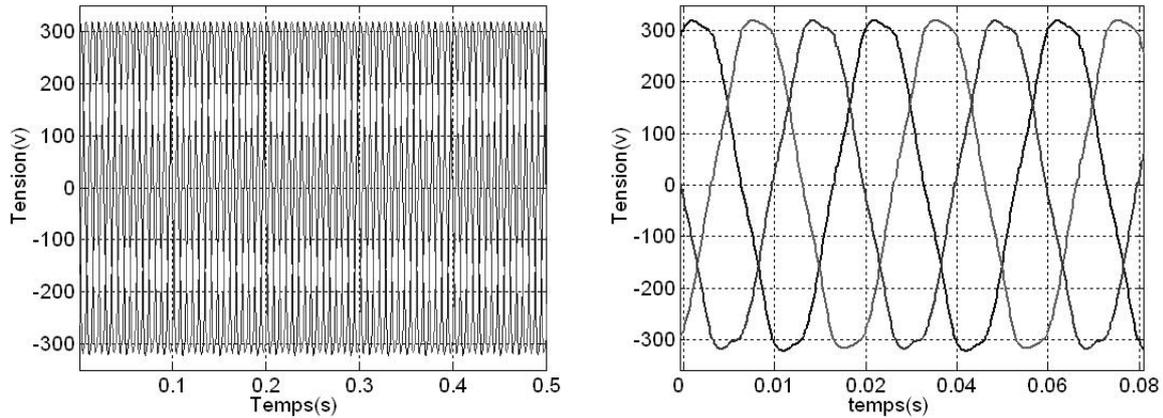


Figure V.6 : Tensions statoriques obtenues pour la machine saine

V.2.3 COURANTS STATORIQUES EN REGIME TRANSITOIRE

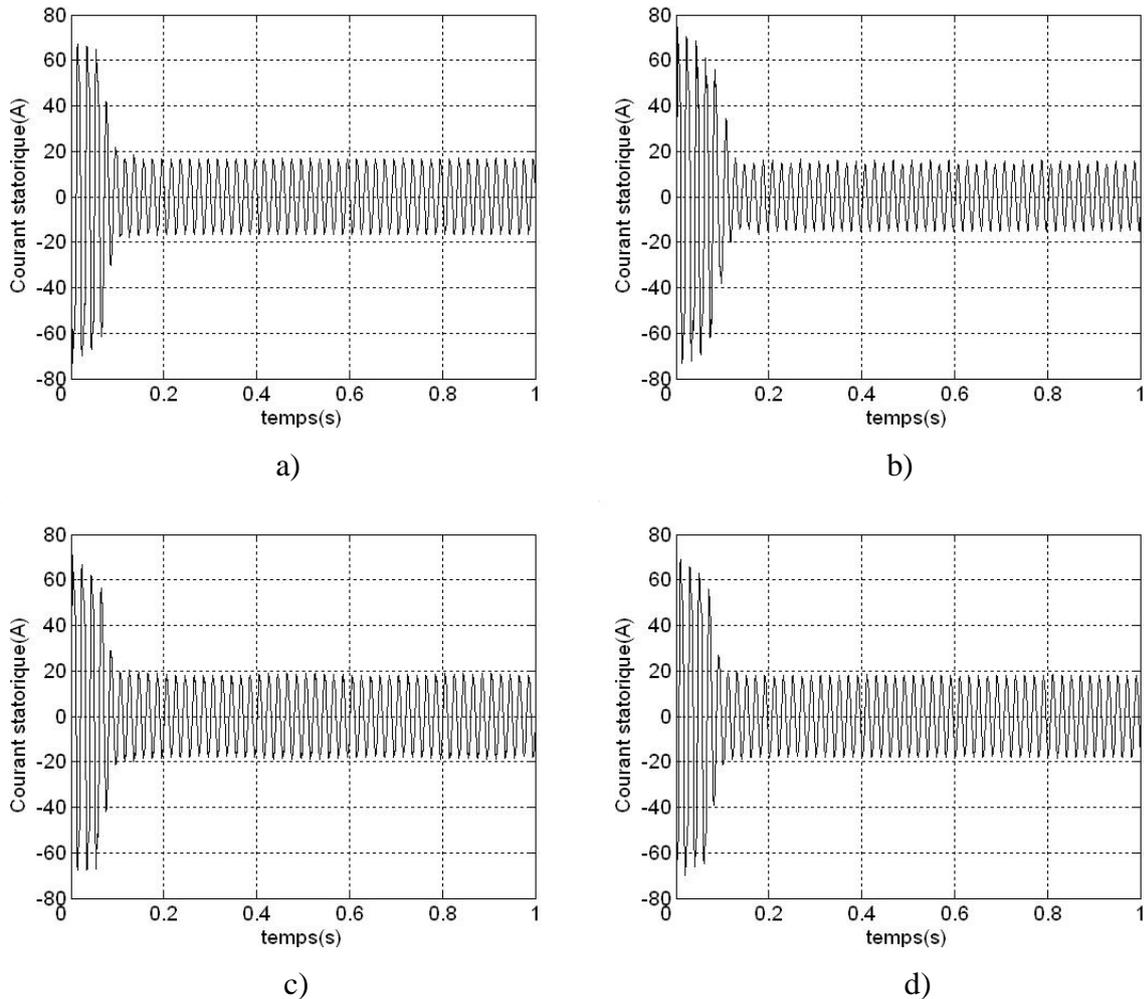


Figure V.7 : Courants du démarrage statoriques
 a) Machine saine, b) Machine avec une barre cassée,
 c) Machine avec deux barres cassées d) Machine avec une portion d'anneau de court circuit enlevée

V.2.4 SPECTRES DES COURANTS STATIQUES

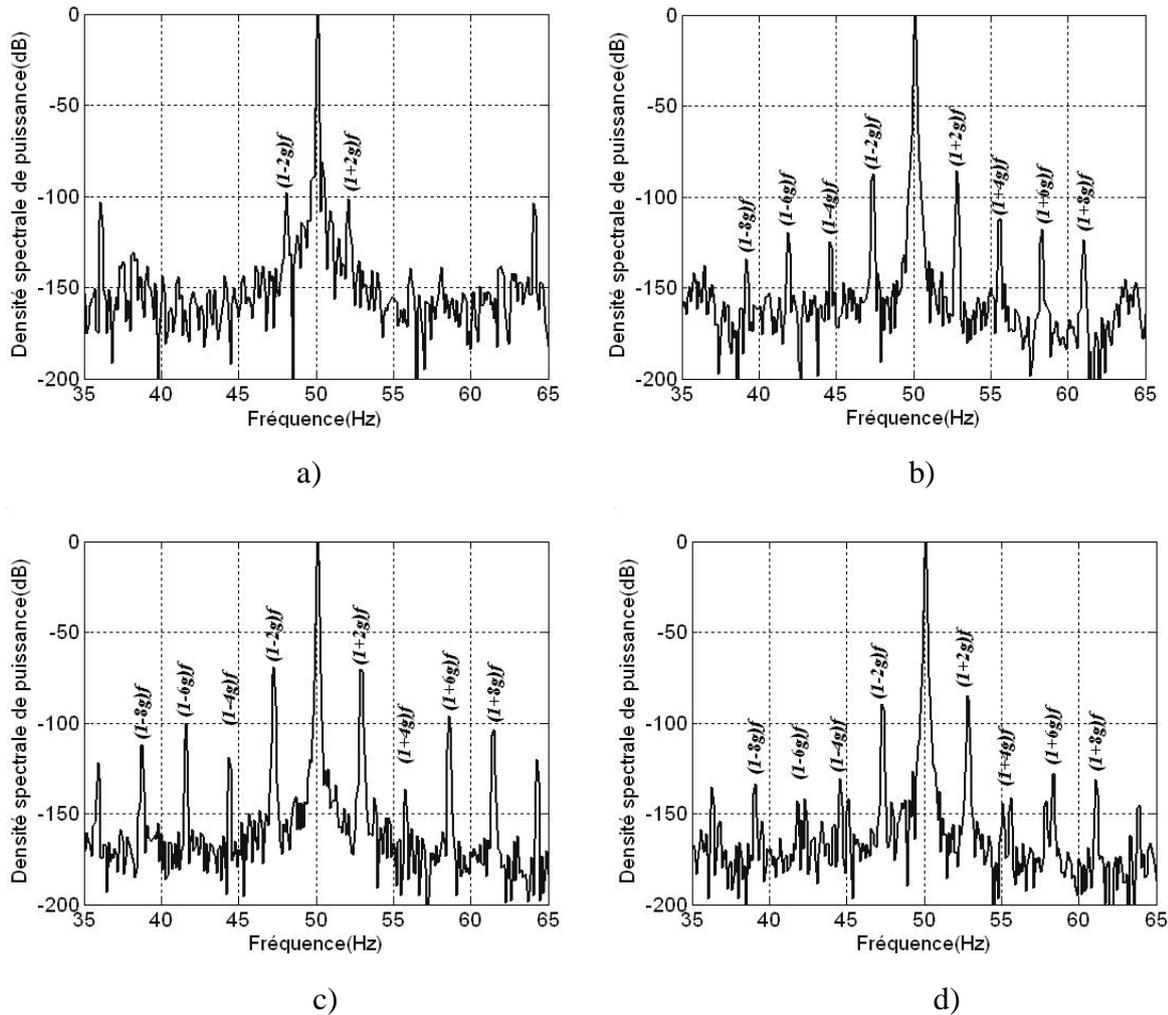


Figure V.8 : Spectres des courants statoriques
 a) Machine saine, b) Machine avec une barre cassée,
 b) Machine avec deux barres cassées d) Machine avec une portion d’anneau de court circuit enlevée

Le calcul de la densité spectrale d’énergie (PSD) des courants statoriques indique clairement l’existence des défauts dans les machines défectueuses, les amplitudes des fréquences $(1+2kg)f$ nous a donné une information sur la défaillance au niveau du rotor. Le Tableau V.2 et la Figure V.9 montrent l’augmentation progressive des amplitudes $(1+2kg)f$ en dB pour les différentes machines.

Rang de l'harmonique	Machine saine	Machine avec une barre cassée	Machine avec deux barres cassées	Machine avec une portion cassée
$k=1$	-98.0	-87.2	-69.3	-89.5
$k=2$	-138.0	-134.36	-119.0	-130.6
$k=3$	-143.5	-119.5	-100.1	-141.7
$k=4$	-152.1	-137.6	-112.1	-135.8

Tableau V.2 : Variation d'amplitude des harmoniques des défauts

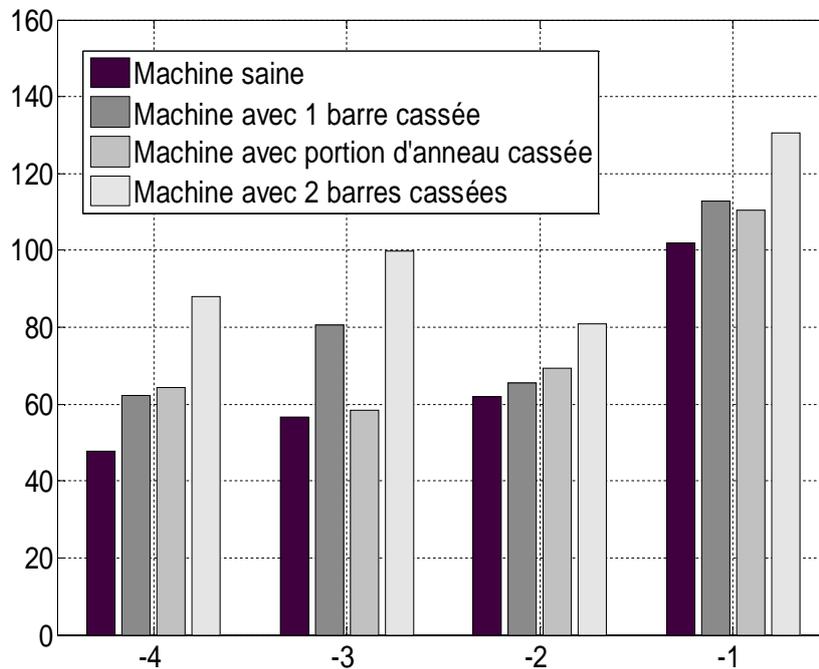


Figure V.9 : Variations de l'amplitude des harmoniques pour les différentes machines

V.3 RESULTATS OBTENUS PAR L'APPLICATION DE LA TECHNIQUE DES ONDELETTES

V.3.1 APPLICATION AU COURANT STATORIQUE SANS PRETRAITEMENT

La décomposition en multi niveau du courant statorique est réalisée à l'aide de l'ondelette mère « Daubechies », le niveau de décomposition nécessaire est calculé d'après la relation:

$$n_{Ls} = \text{int}\left(\frac{\log(f_s / f)}{\log(2)}\right)$$

Avec f : fréquence du réseau, f_s : fréquence d'échantillonnage.

Connaissant $f=50\text{Hz}$ et $f_s=10\text{kHz}$, on peut calculer le nombre de décompositions appropriés qu'est égales à :

$$n_{L_s} + 2 = \text{int}\left(\frac{\log(10^4 / 50)}{\log(2)}\right) + 2 = \text{int}(7.6439) + 2 = 9 \text{ niveau}$$

Le Tableau V.3 indique les différentes bandes de fréquence obtenues par la décomposition en ondelettes discrète.

Niveau	Bandes de fréquences Approximations		Bandes de fréquences Détails	
	$J=1$	$A1$	$0-5000$	$D1$
$J=2$	$A2$	$0-2500$	$D2$	$2500-50000$
$J=3$	$A3$	$0-1250$	$D3$	$1250-2500$
$J=4$	$A4$	$0-625$	$D4$	$625-312.5$
$J=5$	$A5$	$0-312.50$	$D5$	$312.5-625$
$J=6$	$A6$	$0-156.25$	$D6$	$156.25-312.5$
$J=7$	$A7$	$0-78.125$	$D7$	$78.125-156.25$
$J=8$	$A8$	$0-39.0625$	$D8$	$39.0625-78.125$
$J=9$	$A9$	$0-19.5313$	$D9$	$19.53-39.0625$

Tableau V.3 : Bandes de fréquences obtenues par la décomposition en multi niveau

D'après le tableau, les détails qui seront affectés par les harmoniques $(1+2kg)f$ sont :

$D9[19.53-39.0625 \text{ Hz}], D8 [39.0625-78.125 \text{ Hz}], D7 [78.125-156.25 \text{ Hz}]$ et $A6 [0-156.25\text{Hz}]$.

V.3.1.1 Décomposition du courant statorique en multi niveau

L'ondelette mère « Daubechies » de différent ordre est utilisée pour décomposer le courant statorique de chaque machine. Les figures (V.10, V.11 et V12) représentent les signaux de détail et d'approximation ($D9$, $D8$, $D7$ et $A6$) obtenus par la décomposition en multi niveau. Le calcul de l'énergie relative associée à chaque niveau de décomposition nous permet de différencier également la machine saine de celles défectueuses, les figures (V.13, V.14 et V.15) indiquent la variation de cette énergie dans les quatre machines.

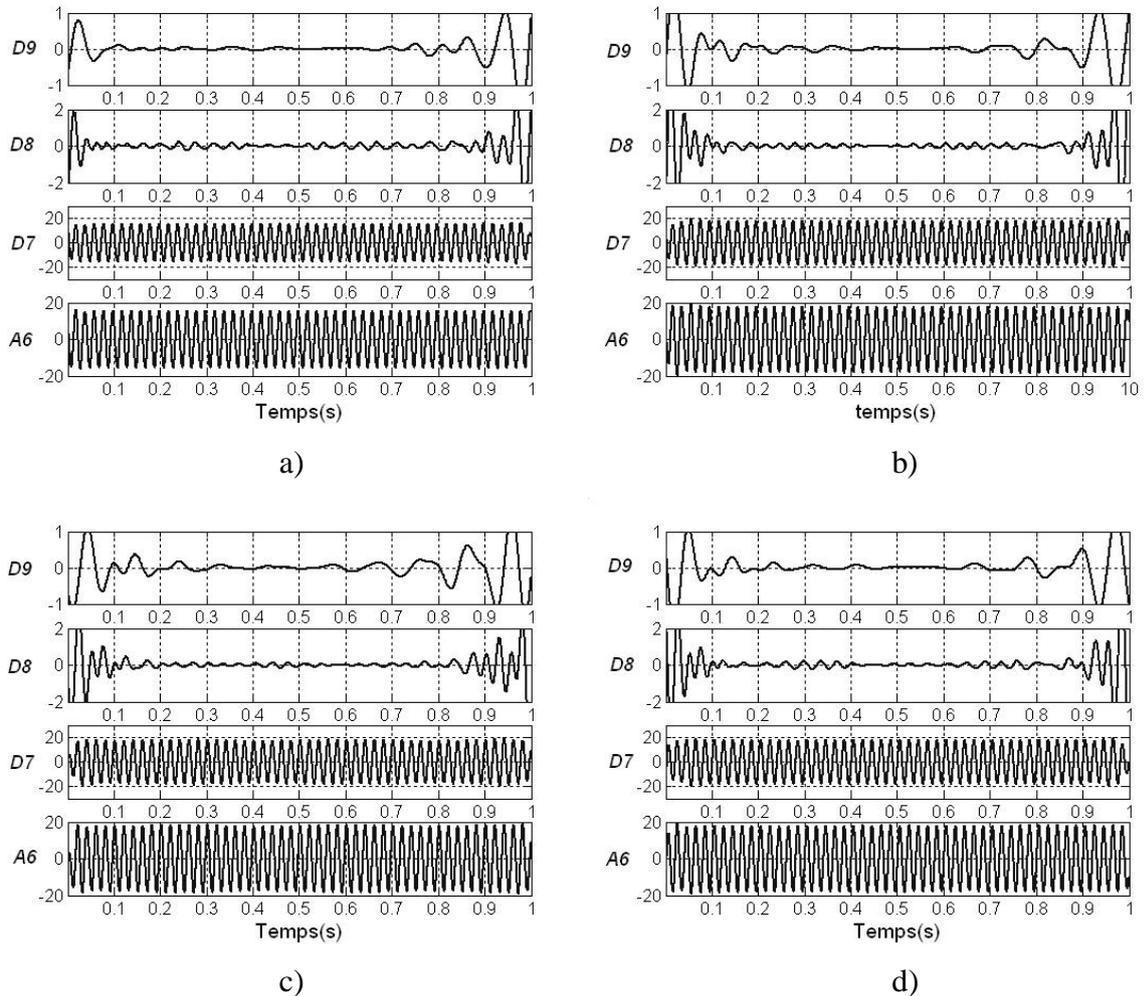


Figure V.10 : Approximations et détails obtenus par l'ondelette *db44*

- a) Machine saine, b) Machine avec une barre cassée
- c) Machine avec deux barres cassées,
- d) Machine avec une portion d'anneau enlevée

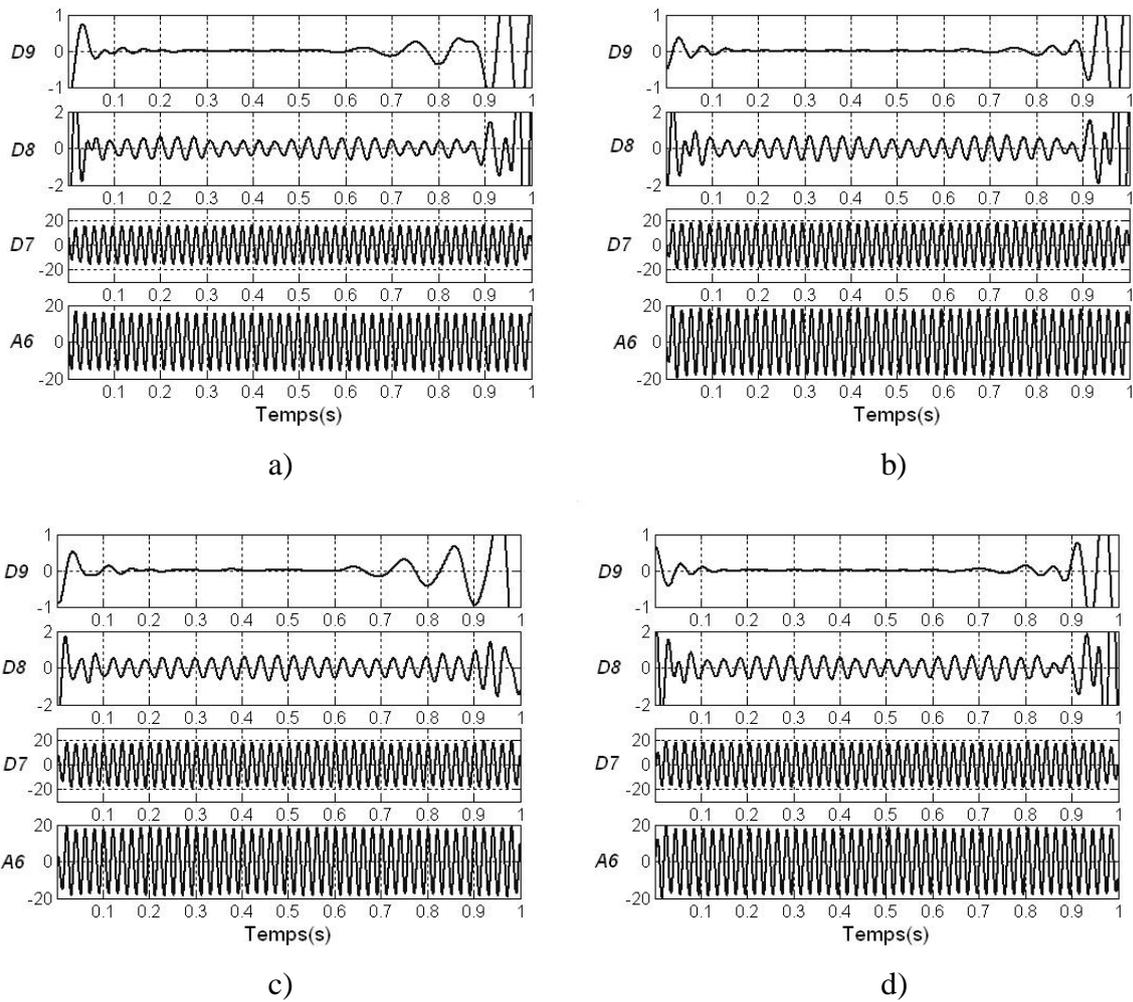


Figure V.11 : Approximations et détails obtenus par l'ondelette *db24*

- a) Machine saine, b) Machine avec une barre cassée
 c) Machine avec deux barres cassées,
 d) Machine avec une portion d'anneau enlevée

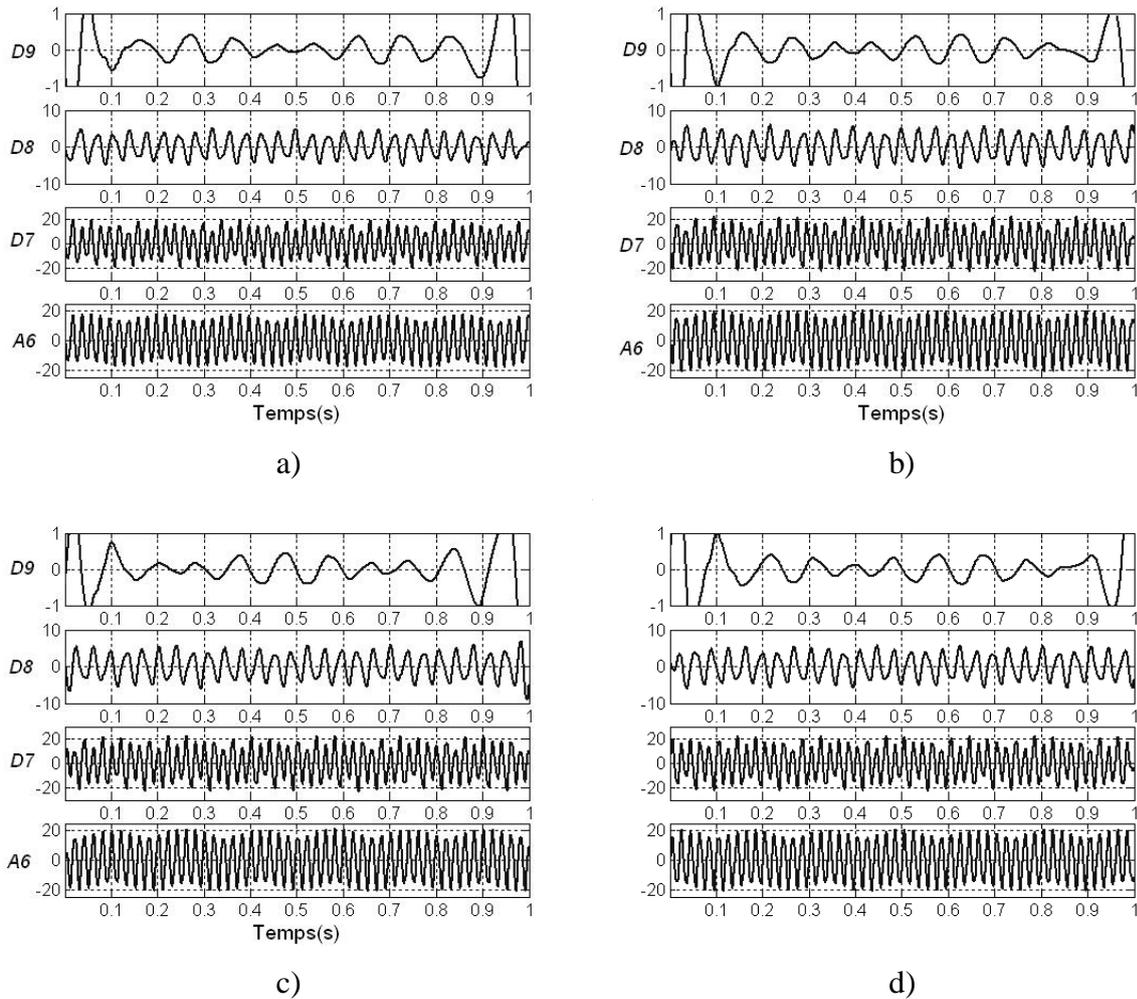


Figure V.12 : Approximations et détails obtenus par l'ondelette *db6*

- a) Machine saine, b) Machine avec une barre cassée
- c) Machine avec deux barres cassées,
- d) Machine avec une portion d'anneau enlevée

Comparons les signaux de détail et d'approximation obtenus pour les machines avec défauts, l'amplitude des coefficients *D8*, *D7* et *A6* est augmentée par rapport à la machine saine. Cette augmentation de l'amplitude dans les signaux *D8*, *D9* et *A6* est due à l'effet que les bandes de fréquence correspondantes sont affectées par les différents types de défauts.

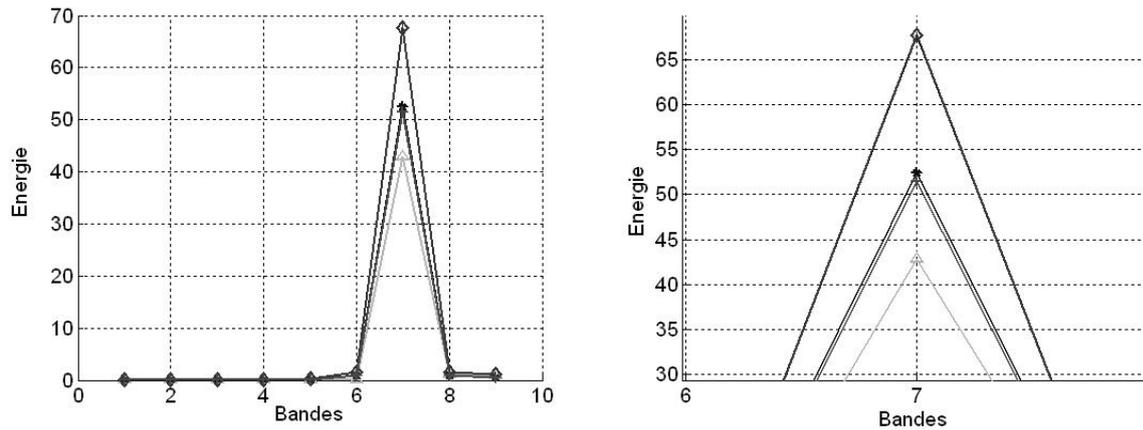


Figure V.13 : Variation de l'énergie dans les bandes de fréquence (*db44*)

—△— : Machine saine, —+— : Machine avec une barre cassée
 —◇— : Machine avec deux barres cassées,
 —*— : Machine avec une portion d'anneau enlevée

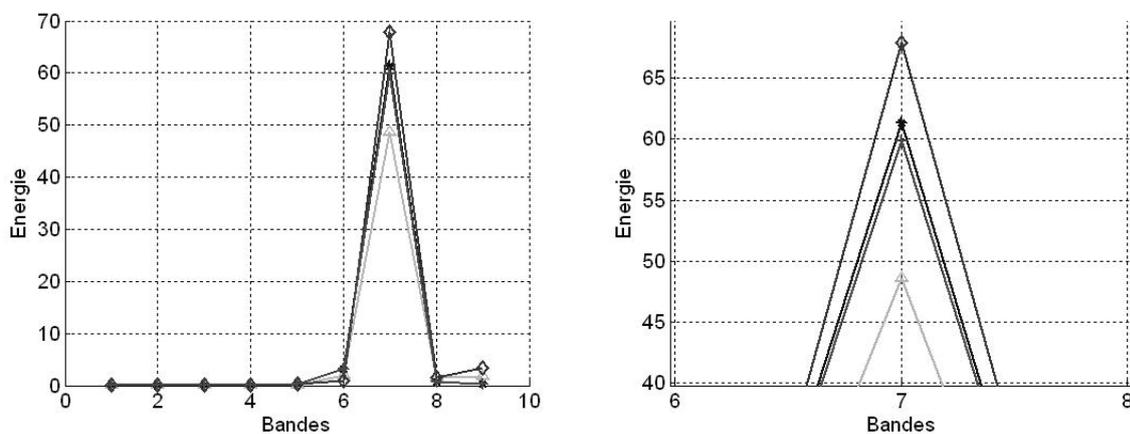


Figure V.14 : Variation de l'énergie dans les bandes de fréquence (*db24*)

—△— : Machine saine, —+— : Machine avec une barre cassée
 —◇— : Machine avec deux barres cassées,
 —*— : Machine avec une portion d'anneau enlevée

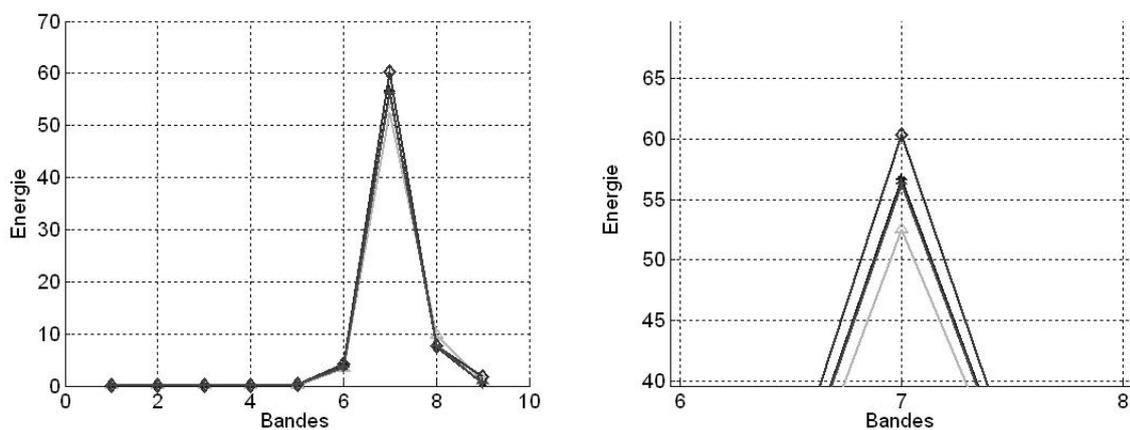


Figure V.15 : Variation de l'énergie dans les bandes de fréquence (*db6*)

—△— : Machine saine, —+— : Machine avec une barre cassée
 —◇— : Machine avec deux barres cassées,
 —*— : Machine avec une portion d'anneau enlevée

Le calcul de l'énergie emmagasinée dans chaque niveau de décomposition confirme l'augmentation observée dans les signaux de détail et d'approximation et surtout dans le niveau 7 qui correspond à la bande qui se trouve au voisinage et au dessous du fondamental. On voit clairement l'effet de défaut rotorique sur l'énergie emmagasinée dans le niveau 7, cette augmentation diffère selon le type de défaut, dans les deux cas de cassure d'une barre et portion d'anneau rotoriques l'énergie augmente par rapport à celle de la machine saine d'une façon égale (55%). L'énergie dans le cas d'une rupture de deux barres rotoriques augmente d'une façon remarquable par rapport au cas de la machine saine et même pour les deux autres machines.

D'après les figures(V.13, V.14 et V.15), on voit que le choix de l'ondelette mère et son ordre a une importance pour différencier les énergies, car lorsqu'on augmente l'ordre de l'ondelette mère, on voit que la différence entre les énergies associées devient plus claire.

V.3.1.2 Décomposition du courant statorique en paquet d'ondelettes

La décomposition en paquet d'ondelettes présente une analyse multi résolutionnelle très fine du signal original, cette résolution nous permet d'avoir dans la zone de fréquence [0-312.5 Hz] huit signaux d'approximation et huit signaux de détail résultant de la décomposition. Les tableaux V.4 et V.5 indiquent les bandes de fréquences en *Hertz* correspondantes à la décomposition en paquet d'ondelettes du courant statorique en 9 niveaux.

0-10000					
0-5000				5000-10000	
0-25000			2500-5000		
0-1250		1250-2500		2500-3750	3750-5000
0-625		625-1250	1250-1875	1875-2500	
0-312.5	312.5-625				

Tableau V.4 : Bandes de fréquences résultantes de la décomposition en paquet d’ondelettes

Dans la machine asynchrone à cage d’écureuil fonctionnant sous réseau de 50 Hz, la zone significative de fréquence se trouve au dessous de 400Hz et d’après le tableau V.4 on s’intéresse seulement à la bande de fréquence (0-312.5Hz).

0-312.5															
0-156.25						156.25-312.5									
0-78.12				78.12-156.25				156.25-234.37				234.37-312.5			
0-39		39-78.12		78.12-117.18		117.18-156.25		156.25-195.31		195.31-234.37		234.37-273.37		273.4-312.5	
0-19.5	19.5-39	39-58.5	58.5-78.12	78.12-97.62	97.62-117.18	117.18-136.68	136.68-156.25	156.25-175.75	175.75-195.31	195.31-214.81	214.81-234.37	234.37-253.87	253.87-273.37	273.37-292.87	292.87-312.5

Tableau V.5 : Bandes de fréquences résultantes de la décomposition en paquet d’ondelettes dans la bande [0-312.5Hz]

Le tableau V.6 donne l'énergie relative associée à chaque bande de fréquence obtenue par la décomposition en paquet d'ondelettes pour les signaux de détail et d'approximation qui sont inclus dans la bande $[0-312.5\text{Hz}]$.

	Machine saine	Machine avec une barre cassée	Machine avec 2 barres cassées	Machine avec portion cassée
<i>0-19.5</i>	<i>64.3080</i>	<i>65.4710</i>	<i>65.4850</i>	<i>65.3270</i>
<i>19.5-39</i>	<i>90.7170</i>	<i>91.2300</i>	<i>91.4240</i>	<i>91.3740</i>
<i>39-58.5</i>	<i>94.6910</i>	<i>94.8120</i>	<i>94.9210</i>	<i>94.8760</i>
<i>58.5-78.12</i>	<i>75.6270</i>	<i>77.0780</i>	<i>77.3580</i>	<i>76.9310</i>
<i>78.12-97.62</i>	<i>85.2350</i>	<i>85.8770</i>	<i>86.2620</i>	<i>85.8160</i>
<i>97.62-117.18</i>	<i>96.9850</i>	<i>97.1370</i>	<i>97.2070</i>	<i>97.1420</i>
<i>117.18-136.68</i>	<i>98.1460</i>	<i>98.2490</i>	<i>98.2210</i>	<i>98.2120</i>
<i>136.68-156.25</i>	<i>13.1710</i>	<i>17.5640</i>	<i>18.0190</i>	<i>4.1030</i>
<i>156.25-175.75</i>	<i>9.1110</i>	<i>9.8170</i>	<i>9.8650</i>	<i>9.1340</i>
<i>175.75-195.31</i>	<i>57.2400</i>	<i>59.9700</i>	<i>60.3070</i>	<i>59.9440</i>
<i>195.31-214.81</i>	<i>71.5510</i>	<i>72.3950</i>	<i>72.3250</i>	<i>72.4950</i>
<i>214.81-234.37</i>	<i>28.0440</i>	<i>29.1340</i>	<i>29.1170</i>	<i>29.6620</i>
<i>234.37-253.87</i>	<i>42.6550</i>	<i>44.6480</i>	<i>44.8180</i>	<i>44.5220</i>
<i>253.87-273.37</i>	<i>85.3030</i>	<i>86.0630</i>	<i>86.2320</i>	<i>86.1520</i>
<i>273.37-292.87</i>	<i>91.4980</i>	<i>91.8910</i>	<i>91.9370</i>	<i>91.8340</i>
<i>292.87-312.5</i>	<i>0.0380</i>	<i>0.0850</i>	<i>0.1340</i>	<i>0.0190</i>

Tableau V.6 : L'énergie relative associée à chaque bande de fréquence obtenue par la décomposition en paquet d'ondelettes

La variation de l'énergie dans les bandes de fréquence pour les quatre machines est représentée sur la figure V.16.

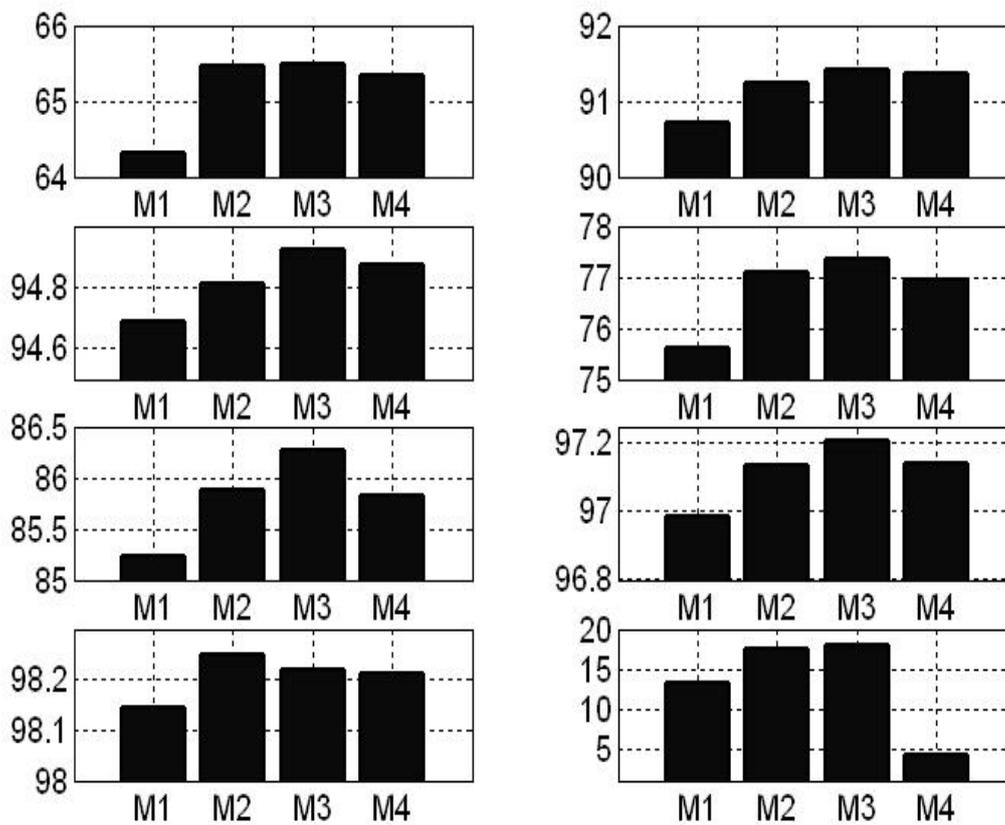


Figure V.16 : Variation de l'énergie dans les bandes de fréquence (*db44*)
M1 : Machine saine, *M2* : Machine avec une barre cassée
M3 : Machine avec deux barres cassées,
M4 : Machine avec une portion d'anneau enlevée

D'après la figure V.16, on remarque que l'énergie emmagasinée dans les 16 bandes de fréquence obtenues au 9^{ième} niveau de décomposition dans les cas des machines défectueuses est supérieure à l'énergie dans le cas de la machine saine. On conclut que la transformée en paquet d'ondelettes représente également un outil très efficace pour le diagnostic, cette efficacité est due à l'effet que la transformée en paquet d'ondelettes mène à une résolution très fine des signaux analysés.

V.3.2 APPLICATION DE LA TOD AU COURANT AVEC PRETRAITEMENT

V.3.2.1 Extraction du fondamental du courant statorique

L'extraction du composant fondamental du courant statorique mène à un signal qui contient seulement les informations nécessaires. Les figures V.17 et V.18 représentent les courants résiduels et leurs spectres résultants de l'extraction du fondamental pour les quatre machines utilisées dans notre opération de diagnostic.

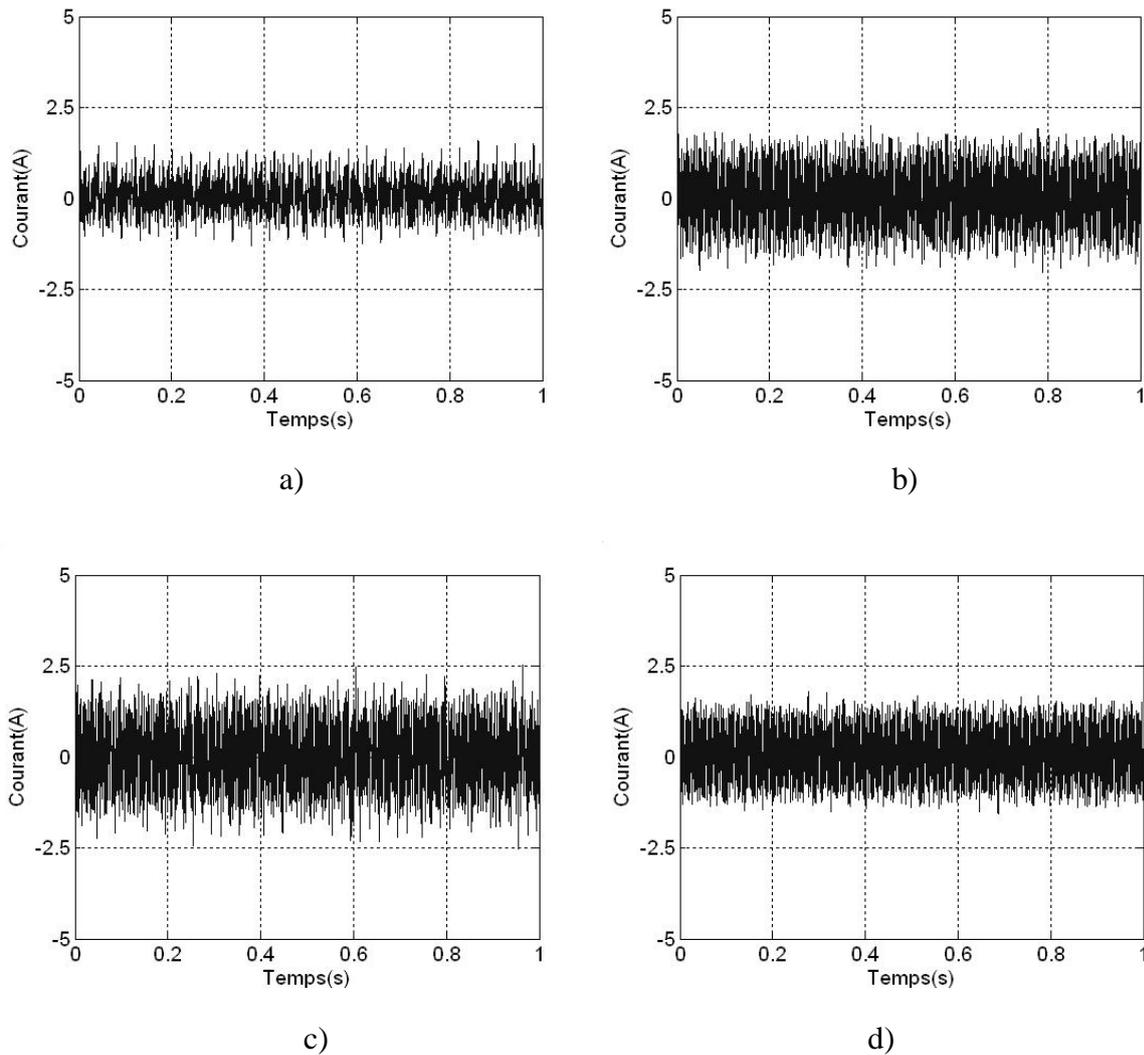


Figure V.17 : Courants résiduels de l'extraction du fondamental

a) Machine saine, b) Machine avec une barre cassée

c) Machine avec deux barres cassées,

d) Machine avec une portion d'anneau enlevée

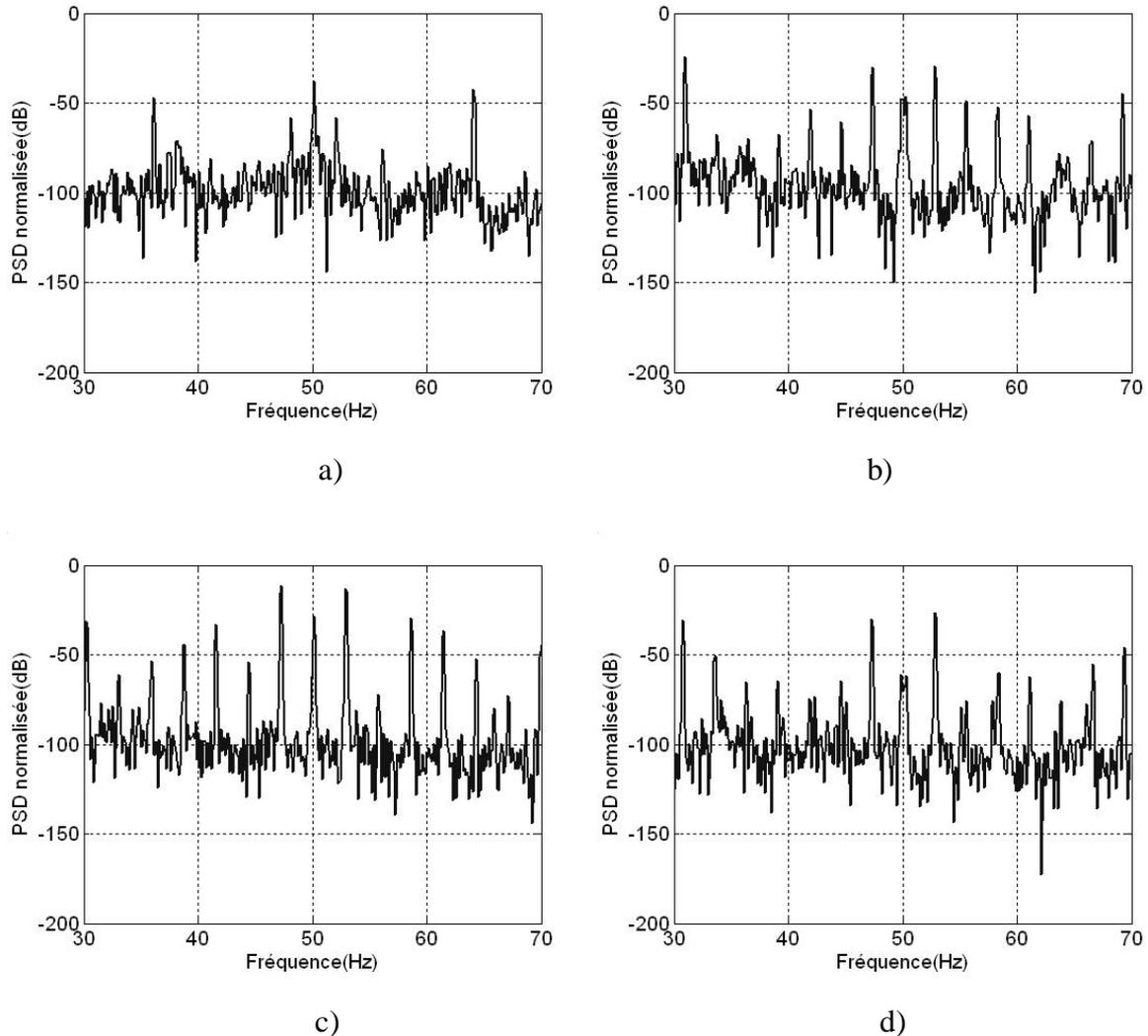


Figure V.18 : Spectres des Courants résiduels
 a) Machine saine, b) Machine avec une barre cassée
 c) Machine avec deux barres cassées,
 d) Machine avec une portion d'anneau enlevée

V.3.2.2 Décomposition du courant résiduel en multi niveau

De la même façon que pour les signaux originaux, on procède à la décomposition des courants résiduels par la transformée en ondelettes discrète. La décomposition est effectuée par l'ondelette mère « Daubechies » d'ordre 8 ($db8$) avec 9 niveaux de décomposition et les figures V.19 et V.20 représentent les premiers signaux de détail et d'approximation obtenus ainsi que l'énergie associée à chaque niveau de décomposition.

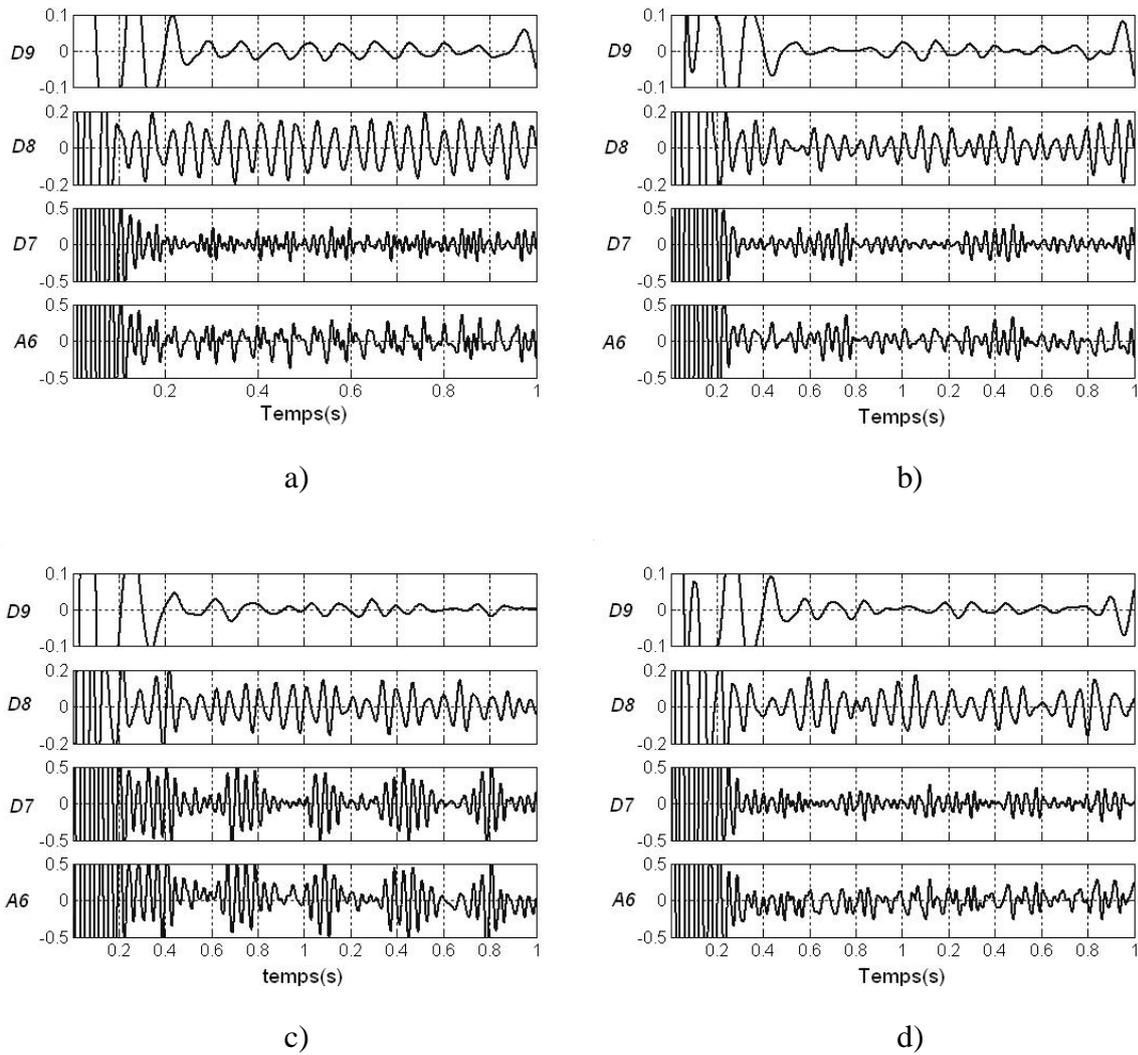


Figure V.19 : Approximations et détails obtenus par l'ondelette *db8* (*D9*, *D8*, *D7* et *A6*)
 a) Machine saine, b) Machine avec une barre cassée
 c) Machine avec deux barres cassées,
 d) Machine avec une portion d'anneau enlevée

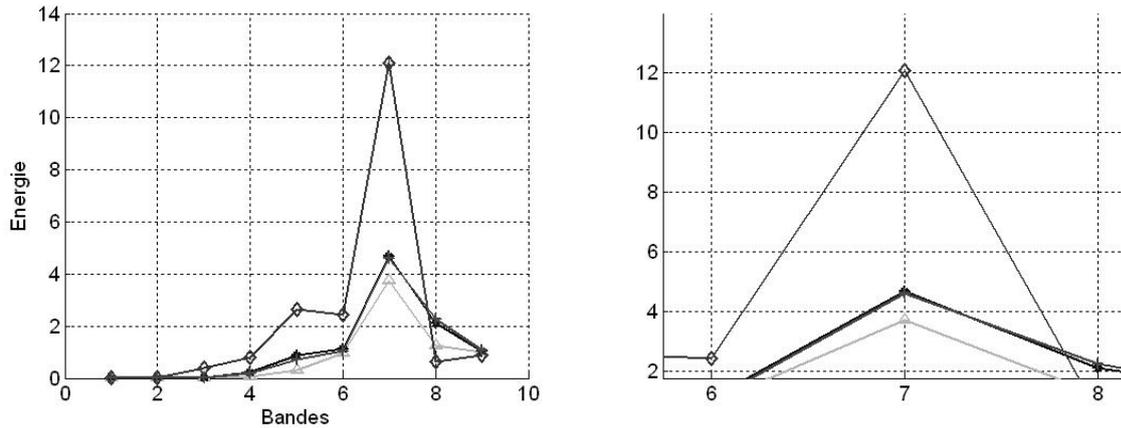


Figure V.20 : Variation de l'énergie dans les niveaux (*db8*)
 — Δ — : Machine saine, —+— : Machine avec une barre cassée
 — \diamond — : Machine avec deux barres cassées,
 —*— : Machine avec une portion d'anneau enlevée

On constate d'après les figures V.19 et V.20 que l'extraction du fondamental a un effet très important dans le diagnostic de défauts. Cet effet est interprété par l'augmentation des amplitudes dans les bandes *D7* et *A6* dans le cas de défaut par rapport au cas sain. L'effet de l'extraction a mené également à une différenciation dans les énergies emmagasinées dans les niveaux entre les différentes machines non seulement au niveau 7 mais cette fois ci aux niveaux 1, 2, 3, 4, 5, 6 et 7.

V.4 ETUDE D'UN CAS D'OUVERTURE D'UNE PHASE STATORIQUE LORS DU FONCTIONNEMENT

L'ouverture d'une phase statorique est l'un des défauts qui se manifeste souvent dans la machine asynchrone, ce défaut est accompagné par un déséquilibre et des à-coups très dangereux dans la machine qui peuvent bruler les bobines à cause des fortes densités de courants qui circulent dans les deux autres phases statoriques.

Pour étudier ce type de défaut, nous avons réalisé un essai d'ouverture d'une phase statorique lors du fonctionnement de la machine, les figures V.21, V.22 et V.23 montrent les signaux de courants et de tensions obtenus sur les deux phases connectées.

V.4.1 SIGNAUX RELEVES LORS DE L'OUVERTURE D'UNE PHASE STATORIQUE

A l'aide du montage précédent et un interrupteur monophasé placé dans une phase statorique (phase b) de la machine asynchrone saine, nous avons enregistré les trois tensions et les deux courants incluant l'ouverture d'une phase statorique. Les figures suivantes représentent le courant et la tension relevés.

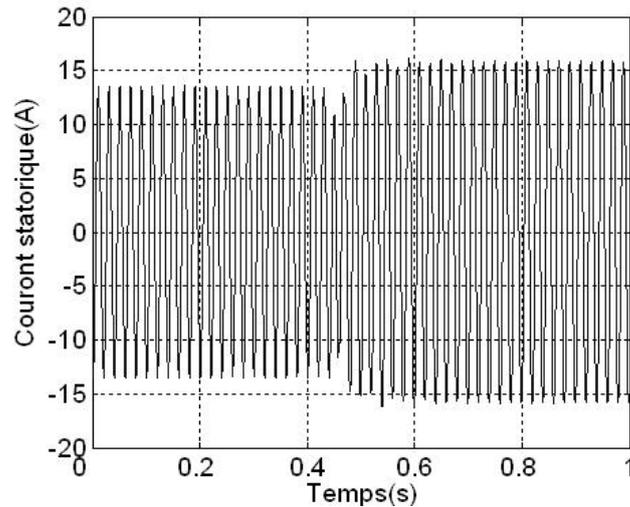


Figure V.21 : Courant statorique dans la phase 'a' lors de l'ouverture de la phase 'b'

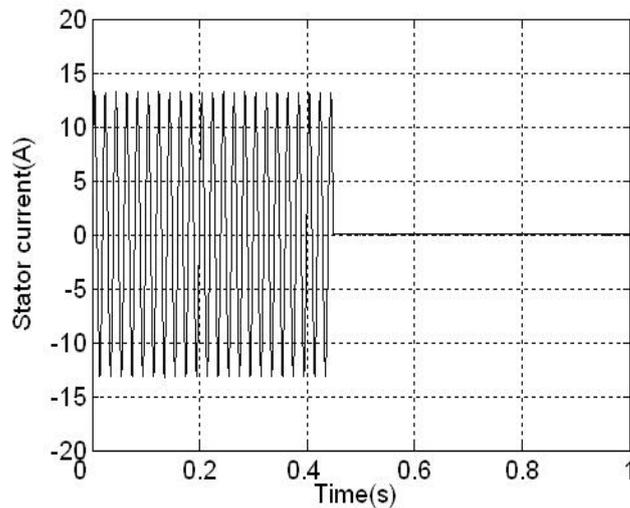


Figure V.22 : Courant statorique dans la phase déconnectée 'b'

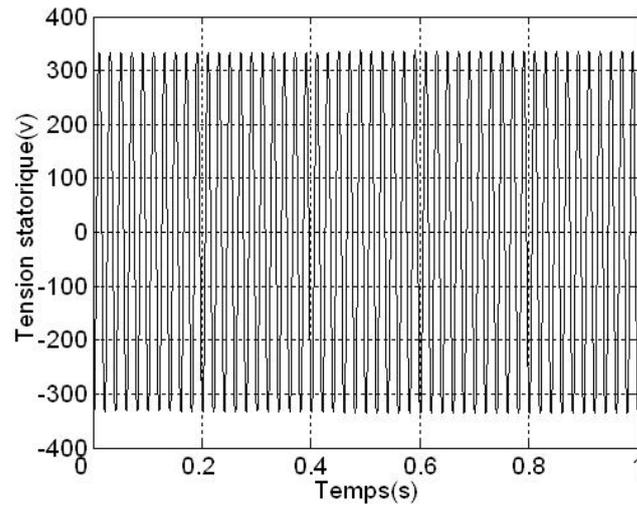


Figure V.23 : Tension statorique ' U_{ca} ' lors de l'ouverture d'une phase ' b '

V.4.2 DECOMPOSITION DU COURANT STATORIQUE EN MULTI NIVEAU

Pour analyser la non-stationnarité qui se produisait dans le courant et la tension statorique lors le l'ouverture d'une phase statorique, nous avons procédé à la décomposition des deux signaux en multi niveau par la transformée en ondelettes discrète en utilisant l'ondelette mère Daubechies. Les figures V.24 représentent les signaux de détail et approximation obtenus.

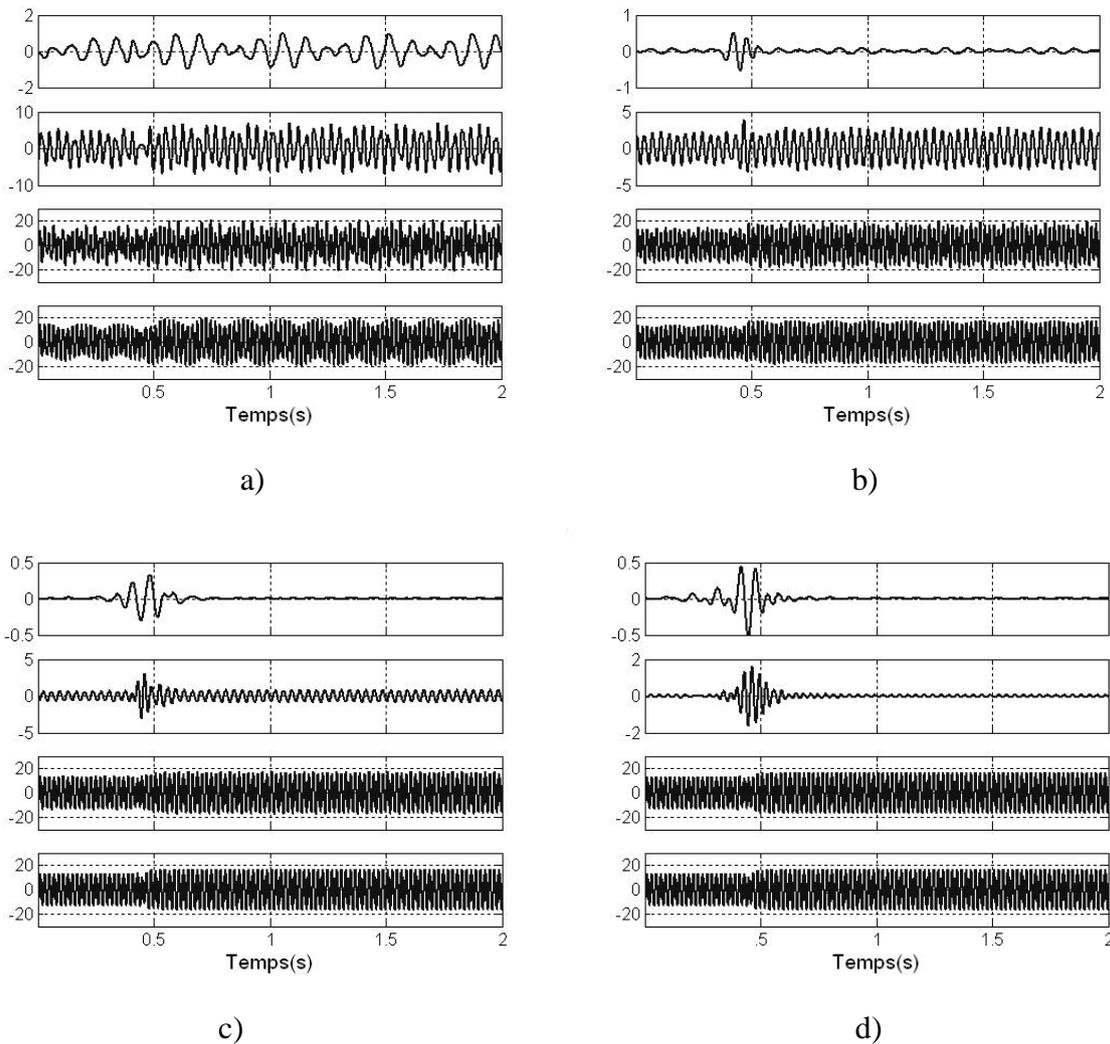


Figure V.24 : Approximations et détails obtenus par la décomposition du courant statorique de la phase 'a' lors de l'ouverture de la phase 'b',
a) *db4*, b) *db10*, c) *db20*, d) *db44*

On constate que l'utilisation de la technique des ondelettes permet d'extraire et de localiser le point de la non-stationnarité dans les signaux non stationnaires. La non-stationnarité qui accompagne l'ouverture d'une phase statorique est extraite dans les deux signaux de détail *D9* et *D8*

V.4.3 DECOMPOSITION EN PAQUET D'ONDELETTES

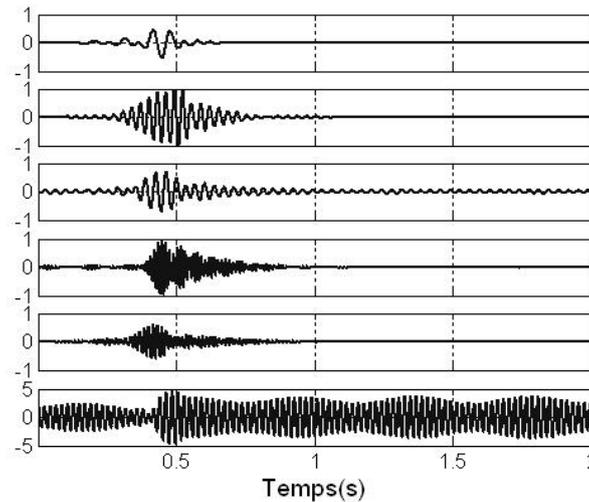


Figure V.25 : décomposition en paquet d'ondelettes du courant de la phase 'a' lors de l'ouverture de la phase 'b',

La décomposition en paquet d'ondelettes confirme les résultats obtenus par la décomposition en multi niveau, la non-stationnarité est détectée dans toutes les bandes de fréquence ainsi l'augmentation de l'amplitude du courant après l'ouverture de la phase.

On conclut que le défaut de l'ouverture d'une phase engendre une variation brusque de fréquence au moment de l'ouverture et une augmentation dans les amplitudes de courants statoriques.

CONCLUSION

L'application de la transformée en ondelettes discrète a mené à des résultats très significatifs en terme de défauts, la décomposition directe du courant statorique en multi-niveau et en paquet d'ondelettes a donné une image réelle sur les différents types de défauts rotoriques de la machine asynchrone à cage ainsi que le calcul de l'énergie relative en chaque niveau de décomposition. Le prétraitement du courant statorique tel que l'extraction du fondamental rend l'opération de diagnostic par la technique des ondelettes plus efficace. La détection de la non-stationnarité engendrée dans le courant statorique lors de l'ouverture d'une phase statorique est obtenue par la décomposition en multi-niveau et en paquet d'ondelettes.

Conclusion Générale

Dans ce travail, deux des applications physiques basées sur la transformée en ondelettes discrète pour le diagnostic des défauts de rupture des barres rotoriques, rupture des portion d'anneau de court-circuit et ouverture d'un phase statorique lors de fonctionnement dans la machine asynchrone à cage d'écureuil sont présentées, validées et optimisées. Le diagnostic est basé sur l'analyse des signaux à niveau élevé obtenus à partir de la décomposition en ondelettes du signal du courant statorique. La première approche est concentrée sur l'étude des signaux d'approximation et de détail résultants de la décomposition en multi-niveau qui contiennent les informations des défauts. Ces signaux permettent la détection de l'évolution des harmoniques caractéristiques liées à la rupture pendant le fonctionnement en charge.

La deuxième approche est basée sur l'étude des signaux d'approximation et de détail, résultants de la décomposition en paquet d'ondelettes. Ces signaux montrent également l'évolution, dans les amplitudes des harmoniques liés au défaut pendant le fonctionnement. Les deux approches sont examinées expérimentalement en utilisant différents ordres d'ondelettes, ce qui nous permet d'optimiser l'utilisation de ce type de diagnostic. Les résultats obtenus montrent que la validité des deux méthodes détectait la présence de la rupture dans une machine asynchrone à cage, même dans certains cas où l'application de l'approche classique, basée sur la transformée de Fourier du courant en régime permanent, ne peut pas être appliquée ou peut mener à la confusion ou à un diagnostic faux. En outre, l'application de la transformée en ondelettes discrète est optimisée, concernant le choix de certains paramètres tels que la fréquence d'échantillonnage, le type de l'ondelette mère, l'ordre de l'ondelette mère ou le nombre de niveaux de décomposition.

Une particularité de la technique des ondelettes, la détection de la non-stationnarité dans un signal est exploitée à travers une décomposition du courant statorique lors de l'ouverture d'une phase. Les résultats montrent l'efficacité de la technique dans ce type de défauts et peut être plusieurs défauts similaires tels que les régimes transitoires, fluctuations de la charge et les défauts de réseaux d'alimentation qui peuvent être extraits à partir d'une simple décomposition en multi-niveau ou en paquet d'ondelettes.

Les approches proposées, basées sur la transformée en ondelettes discrète du signal, peuvent être prolongées pour le diagnostic et la discrimination entre d'autres types de défauts dans les machines électriques.

Références Bibliographiques

Bibliographie

- [1] I. Boldea, S. A. Nasar. « The Induction Machine Handbook », CRC Press LLC, Chapter 1, 2002.
- [2] G. Didier. « Modélisation et Diagnostic de la Machine Asynchrone en présence de Défaillances », Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université Henri Poincaré, Nancy I. Oct 2004.
- [3] S. A. Al Kazzaz Sa'ad, G.K.Singh. « Experimental investigations on induction machine condition monitoring and fault diagnosis using digital signal processing techniques », Electric Power Systems Research 65, pp 179-221, 2003.
- [4] M. E. H. Benbouzid, G. B. Kliman. « What Stator Current Processing Based Technique to Use for Induction Motor Rotor Faults Diagnosis? », IEEE, Transaction on Energy Conversion, VOL 18 n°2, pp 238-244, Jun 2003.
- [5] M. E. H. Benbouzid, M. Vieira, C. Theys. « Induction Motors Faults Detection and Localisation Using Stator Current Advanced Signal Processing Techniques », IEEE, Transaction on Power Electronics, Vol 14 n°1, pp 14-22, Jan 1999.
- [6] M. E. H. Benbouzid. « A review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium for Faults Detection », IEEE Transactions on Industrial Electronics, pp1950-1955, 1998.
- [7] S. Nandi, H .A. Toliyat. « Condition Monitoing and Fault Diagnosis of Electrical Machines », IEEE, Electrical Machines & Power Electronics, pp 197-204, 1999.
- [8] M. E. H. Benbouzid, H. Nejjari, R. Beguenane, M.vieira. « Induction Motor Asymmetrical Faults Detection Using Advanced Signal Processing Techniques ». IEEE Transaction on Energy, vol, 14, No, pp 147-152. June1999.
- [9] T. Boumegoura. « Recherche de Signature Electromagnétique des Défaits dans une Machine Asynchrone et Synthèse d'Observateurs en Vue du Diagnostic », Thèse de Doctorat, Ecole doctorale Electronique, Electrotechnique, Automatique de Lyon, mars 2001.
- [10] L. Baghli, D. Hein, H. Razik, and A. Rezzoug. « Modelling Rotor Cage Induction Motors for Default Detection », International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, September 1997.
- [11] L. Noureddine. « Diagnostic de Défaits au Rotor d'une Machine Asynchrone à Cage d'Ecureuil », Mémoire de Magister, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, Mai 2005.

- [12] 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.
- [13] Touhami Omar, Nouredine 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.
- [14] E. Ritchie, T. Jokinen. « Dynamic Model of Three-phase Squirrel cage Induction Motors with Rotor Faults ». International Conference on Electrical Machines , Vol. 2, 1994.
- [15] 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.
- [16] S. Mallat. « A Wavelet Tour of Signal Processing », Second Edition, ACADEMIC PRESS.
- [17] A.N. Akansu, R. A. Haddad « Multiresolution Signal Decompositionm Transforms, Subbands, and Wavelets », Second Edition, New Jersey Institute of Technology Newark, NJ, ACADEMIC PRESS, 2001.
- [18] Eric HITTI « Sélection d'un banc optimal de filtres à partir d'une décomposition en paquets d'ondelettes. Application à la détection de sauts de fréquences dans des signaux multi-composantes » Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Nantes, Sep 1999.
- [19] V. Perrier « Transformée en Ondelettes Continue Théorie, Applications à l'Imagerie Médicale », Laboratoire de Modélisation et Calcul de l'IMAG Institut National Polytechnique de Grenoble, Cours de l'Ecole Doctorale, Orsay, 12 décembre2005.
- [20] M. BOUHARKAT. « Etude de l'Evolution des Courants Rotoriques d'une Machine Asynchrone à Cage en Régime Dynamique », Thèse doctorat, Département d'Electrotechnique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université de Batna, Février 2006.
- [21] R. Benzid. « Ondelettes et Statistiques d'Ordre Supérieur Appliquées aux Signaux Uni et Bidimensionnels » , Thèse Doctorat, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université de Batna, Septembre 2005.
- [22] T. K. Sarkar, C. Su, R. Adve, M. Salazar-Palma', L. Garcia-Castillo, R. R. Bog. « A Tutorial on Wavelets from an Electrical Engineering Perspective, Part 1: Discrete Wavelet Technique », IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 40, No. 5, pp 49-70, October 1998.

- [23] M. Misiti Y. Misiti G. Oppenheim J. M. Poggi. « Wavelet Toolbox » User's Guide For Matlab, Version 2.1, MATHWORKS.
- [24] G. A. Jiménez, A. O. Munoz, M. A. Duarte-Mermoud. « Fault Detection in Induction Motors Using Hilbert And Wavelet Transforms », Springer-Verlag, ElectricalEngineering, pp-205-220, 2007.
- [25] Z. K. Peng, F. L. Chu. « Application of the Wavelet Transform in Machine Condition Monitoring and Fault Diagnostics: a Review with Bibliography », Mechanical Systems and Signal Processing 18, pp199-221, 2006.
- [26] J. A. Daviu, M. Riera-Guasp, J. Roger-Folch, F. Martínez-Giménez, A. Peris. « Application and Optimization of the Discrete Wavelet Transform for the Detection of Broken Rotor Bars in Induction Machines », Applied and Computational Harmonics Analysis 21, pp 268–279, 2006.
- [27] Jose A. A. Daviu, M. Riera-Guasp, J. R. Folch, *Member*, 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 Applications, vol. 42, No. 4, pp 990-996, juin/août 2006.
- [28] Z. Zhang, Z. Ren, W. Huang. « A Novel Detection Method of Motor Broken Rotor Bars Based on Wavelet Ridge », IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 18, No. 3, pp 417-222, september 2003,
- [29] H. Douglas, P. Pillay. « The Impact of Wavelet Selection on Transient Motor Current Signature Analysis », IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, pp 80-85. 2005
- [30] R. Supangat, N. Ertugrul, W. L. Soong, D. A. Gray, C. Hansen, J. Grieger. « Broken Rotor Bar Fault Detection in Induction Motors Using Starting Current Analysis », HIE, pp 1-10, 2005.
- [31] K. Abbaszadeh, J. Milimonfared, M. Haji, H. A. Toliyat. « Broken Bar Detection in Induction Motor via Wavelet Transform », IEEE Industrial Electronics Society, pp95-99, 2001.
- [32] C. Zhitong, C. Hongping, H. Guoguang, E. Ritchie. « Rotor Fault Diagnosis of Induction Motor based on Wavelet Reconstruction » IEEE, Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems, pp374-377. ICEMS 2001.
- [33] M. Arehpanahi S. H. H. Sadeghi J. Milimonfared H. R. A. Roknabadi « Broken Rotor Bar Detection in Induction Motor via Stator Current Derivative » IEEE, Proceedings of

the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems, pp2202-2206. ICEMS 2005.

[34] C. Combastel, S. Lesecq, S. Petropol, S. Gentil « Model-based and wavelet approaches to induction motor on-line fault detection », *Control Engineering Practice* 10, pp 493–509, 2002.

[35] Y. Zhongming, B. Wu. « Online Rotor Bar Breakage Detection of Three Phase Induction Motors by Wavelet Packet Decomposition and Artificial Neural Network », *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, pp2209-2216, 2001.

[36] J. Cusido, A.Jornet, L. Romeral , J.A. Ortega, A.Garcia. « Wavelet and PSD as a Fault Detection Techniques », *Proceedings of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, pp1397-1400, 2006.

[37] S. H. Kia, H. H. enao, A. M. Mabwe, G. A. Capolino. « Wavelet Based Instantaneous Power Analysis for Induction Machine Fault Diagnosis » *IEEE Industrial Electronics*, pp1229-1234, 2006.

[38] G.K. Singh, S. A. Al Kazzaz Sa'ad. « Vibration Signal Analysis Using Wavelet Transform for Isolation and Identification of Electrical Faults in Induction Machine » *Electric Power Systems Research* 68, pp119-136, 2004.

[39] B. Liu « Selection of Wavelet Packet Basis for Rotating Machinery Fault Diagnosis », *Journal of Sound and Vibration* 284, pp 567–582 , 2005.

[40] V. Purushotham, S. Narayanan, Suryanarayana A.N. Prasad. « Multi-fault Diagnosis of Rolling Bearing Elements Using Wavelet Analysis and Hidden Markov Model Based Fault Recognition », *NDT&E International* 38, 654–664, 2005.

[41] T. W. S. Chow, S. Hai. « Induction Machine Fault Diagnostic Analysis With Wavelet Technique », *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 51, No. 3, pp 558-565, juin 2004.

[42] C. Smitha, C. M. Akujuobi, P. Hamory, K. Kloesel. « An Approach to Vibration Analysis Using Wavelets in an Application of Aircraft Health Monitoring », *Mechanical Systems and Signal Processing* 21,pp 1255-1272, 2007.

[43] T. Liu, J. Huang. « A Novel Method for Induction Motors Stator Interturn Short Circuit Fault Diagnosis by Wavelet Packet Analysis », *IEEE, Electrical Machines and Systems*, Vol. 3, pp 2254-2258, 2005.

[44] F.Niu, J. Huang. « Rotor Broken Bars Fault Diagnosis for Induction Machines Based on the Wavelet Ridge Energy Spectrum », *IEEE, Electrical Machines and Systems*, Vol. 3, pp2274-2277, 2005.

- [45] O. A. Mohammed, N. Y. Abed, S. Ganu. « Modeling and Characterization of Induction Motor Internal Faults Using Finite-Element and Discrete Wavelet Transforms », IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 42, No.10, pp 3434-3436, October 2006.
- [46] A. M. Garcia, T. A. Lipo. « Complex Vector Model of the Squirrel Cage Induction Machine Including Instantaneous Rotor Bar Currents », IEEE, Transactions on Industry Applications, Industry Applications, pp 57-64, 1999.
- [47] J. F. Bangura, R. J. Povinelli, N. A. O. Demerdash, R. H. Brown. « Diagnostics of Eccentricities and Bar/End-Ring Connector Breakages in Polyphase Induction Motors Through a Combination of Time-Series Data Mining and Time-Stepping Coupled FE–State-Space Techniques », IEEE Transactions on industry applications, Vol. 39, No. 4, pp 1005-1013, august 2003.

Résumé

Dans ce mémoire nous avons utilisé la technique des ondelettes dans le but du diagnostic des machines asynchrones à cage d'écureuil. Cette technique qui offre une analyse très fine des signaux unidimensionnels et bidimensionnels à travers une décomposition en ondelettes discrètes ou en paquet d'ondelettes, est utilisée pour extraire les informations nécessaires à partir du courant moteur de la machine. Les différentes applications de la transformée en ondelettes discrète au domaine du diagnostic des défauts ont été validés sur des signaux expérimentaux relevés à partir des machines défectueuses. La décomposition du courant statorique est performée à l'aide de la boîte d'outils « WAVELET TOOLBOX » et les résultats obtenus ont montré l'efficacité de la technique dans la détection des défauts électriques rotoriques et statoriques et même la détection de la non-stationnarité où cette particularité est non disponible dans l'analyse par FFT.

Mots clés : défauts de la machine asynchrone, modélisation de la machine asynchrone à cage, technique des ondelettes.

ملخص

في هذه المذكرة إستعملنا تقنية الموجات بهدف تشخيص أعطاب الآلة اللامتزامنة ذات القفص السنجابي. هذه التقنية التي تعرض تحليلاً دقيقاً للإشارات الأحادية و الثنائية البعد عن طريق تقسيم ألى موجات متقطعة او إلى حزمة موجات، أستعملت لإنتراع المعلومات الضرورية من التيار المحرك للآلة. التطبيقات المختلفة للتحويل المتقطع إلى موجات في مجال تشخيص الأعطاب أختبرت على إشارات حقيقية مرفوعة من آلات بها خلل. تقسيم تيار الساكن أنجز بمساعدة علبه الأدوات « WAVELET TOOLBOX » و النتائج المحصل عليها برهنت فعالية التقنية في اكتشاف الأعطاب في الجزء المتحرك و الساكن وحتى إكتشاف اللاسكونية في حين هذه الخاصية ليست متوفرة في التحليل ب FFT. **الكلمات المفتاحية:** أعطاب الآلة اللامتزامنة، وضع نموذج للآلة اللامتزامنة ذات القفص السنجابي، تقنية الموجات.

Abstract

In this thesis we used the wavelet technique for the diagnosis of the squirrel cage induction machines. This technique which offers a very fine analysis of the one-dimensional and two-dimensional signals through decomposition in discrete wavelets or in wavelet packet is used to extract the necessary information from the motor current of the machine. The different applications of the wavelet discrete transform in the faults diagnosis has been validated on experimental signals acquired from faulty machines. The decomposition of the stator current is performed using the tools box "WAVELET TOOLBOX" and the results obtained dismounts the effectiveness of the technique in the detection of the rotor and stator electric defects and even the detection of no-stationarity where this characteristic is not available in the analysis by FFT.

Key words: induction machine faults, squirrel cage induction machine modeling, wavelets technique.