

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITÉ DE M'SILA
FACULTÉ DES SCIENCES ET DES SCIENCES DE L'INGÉNIORAT

DÉPARTEMENT D'ÉLECTROTECHNIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU
DIPÔLME D'INGENIEUR
D'ÉTAT EN GÉNIE ÉLECTROTECHNIQUE

OPTION : COMMANDE ÉLECTRIQUE

THÈME

DÉTECTION DES DÉFAUTS ROTORIQUES DANS LA MAS
A CAGE PAR LA TECHNIQUE DES ONDELETTES

Proposé et dirigé par :

Mr. LAAMARI Yahia

Présenté par :

DERRADJ Lazhar
MABREK Toufik

ANNÉE UNIVERSITAIRE: 2008/2009

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier tout premièrement Dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.

Nous remercions particulièrement notre promoteur Mr. Yahia. LAAMARI pour avoir d'abord proposée ce thème, pour suivi continuel tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessée de nous donner ses conseils.

Nous remercions également Mr. BENZID. Ridha, pour ses conseils, et son aide.

Nous remercions les membres de jury d'examen pour l'honneur qu'ils me font en participant au jugement de ce travail.

Nous remercions vont aussi à tous les enseignants du département d'électrotechnique qui a contribué à notre formation.

Et enfin nous remercions l'ensemble des collègues de notre Promotion, qui nous ont aidé à réaliser ce modeste travail.

Lazhar - Toufik



Dédicace



Je dédie ce modeste travail :

A Ma très chère mère et mon père

A Mes soeurs

A Mes frères : Feteh, Yacine et Ilyes

A toute ma famille

A mes chers amis : Hamza, Elhage, Badro, Idris, Hicham

Lazhar, Bahaeddine, smail et Abd elnour

A tous les amis d'étude surtout ceux

d'électrotechnique

Promotion 2009

A tous mes voisins & à tous les habitants d'el yachir BBA.

Je vous remercie tous

Toufik





Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A Ma très chère mère et mon père

A Mes sœurs

A Mes frères

A toute ma famille

A mes chers amis

*A tous les amis (es) d'études sur tous ceux
d'électrotechnique promotion 2009*

D. Lazhar.



Sommaire

Introduction générale..... 1

Chapitre I

Constitution et présentation des différents défauts de la machine asynchrone à cage

I.1	Introduction.....	3
I.2	Éléments de constitution de la machine asynchrone.....	3
I.2.1	Stator.....	4
I.2.1.1	Carcasse.....	4
I.2.1.2	Circuit magnétique.....	5
I.2.1.3	Enroulement statorique.....	5
I.2.2	Rotor.....	6
I.2.2.1	Arbre.....	6
I.2.2.2	Cage d'écureuil.....	7
I.2.3	Paliers.....	7
I.2.3.1	Paliers lisses.....	7
I.2.3.1.1	Corps de palier.....	8
I.2.3.1.2	Coussinets.....	8
I.2.3.2	Paliers à roulements.....	8
I.3	Défaillances de la machine asynchrone et leurs origines.....	8
I.3.1	Défaillances d'ordre électrique.....	9
I.3.2	Organigrammes des sources et différents classes des défauts.....	10
I.3.3	Défaillances des circuits électriques statoriques.....	12
I.3.4	Défaillances des circuits électriques rotoriques.....	12
I.3.4.1	Les cassures des barres.....	13
I.3.4.2	Cassure d'une portion d'anneau de court-circuit.....	13
I.3.5	Défaillances d'ordre mécanique.....	14
I.3.5.1	Défaillances des roulements.....	14
I.3.5.2	Défaillances du flasque.....	15
I.3.5.3	Défaillances de l'arbre.....	15
I.3.6	Effets des défauts mécaniques sur la machine asynchrone.....	15



I.3.6.1 Oscillation du couple.....	15
I.3.6.2 Désalignement.....	16
I.3.6.3 Excentricité.....	17
I.3.6.3.1 Excentricité statique.....	17
I.3.6.3.2 Excentricité dynamique.....	17
I.3.6.3.3 Excentricité mixte.....	17
I.4 Conclusion.....	18

Chapitre II

Modélisation de la machine asynchrone à cage

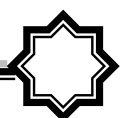
II.1 Introduction.....	19
II.2 Hypothèses simplificatrices.....	19
II.3 Calcul des inductances.....	19
II.3.1 Stator.....	19
II.3.2 Rotor.....	20
II.3.3 Stator rotor.....	21
II.4 Mise en équation.....	22
II.4.1 Stator.....	22
II.4.2 Rotor.....	24
II.5 La transformation de N_r grandeurs équilibrées vers deux grandeurs dq.....	29
II.5.1 La matrice de résistance du modèle dq équivalent.....	31
II.5.2 La matrice d'inductance du modèle dq équivalent.....	37
II.6 Simulations et interprétations des résultats.....	39
II.6.1 Simulation.....	39
II.6.1.1 Résultats de la simulation.....	40
II.6.1.1.1 Cas d'une machine saine.....	40
II.6.1.1.2 Cas d'une machine avec défaut rotorique.....	43
II.6.1.1.2.1 Cassure d'une barre.....	43
II.6.1.1.2.2 Cassure de deux barres.....	45
II.7 Conclusion.....	48



Chapitre III

Méthodes de diagnostic et application de l'analyse spectrale

III.1	Introduction.....	49
III.2	Méthode interne.....	50
III.2.1	Méthode de redondance analytique et matérielle.....	50
III.2.2	Méthode du modèle.....	51
III.2.2.1	Techniques d'identification.....	51
III.2.2.2	Techniques d'estimation d'état.....	51
III.2.2.3	Techniques des résidus.....	51
III.3	Méthode externe.....	52
III.3.1	Diagnostic basé sur les réseaux neurone.....	52
III.3.2	Diagnostic par systèmes experts.....	52
III.3.3	Diagnostic par logique floue.....	53
III.3.4	Les méthodes de reconnaissance des formes.....	53
III.3.5	Diagnostic basé sur le traitement des signaux.....	55
III.3.5.1	Analyse cepstrale.....	55
III.3.5.2	Le spectrogramme.....	55
III.3.5.3	La transformé de Fourier rapide (FFT).....	55
III.3.5.4	La transformation de Fourier à court terme (TFCT).....	56
III.3.5.5	Analyse temps-échelle.....	56
III.4	Résultat de simulation d'analyse spectrale.....	57
III.4.1	Analyse spectrale du courant statorique par FFT.....	58
III.4.1.1	Cas d'un moteur sain.....	58
III.4.1.2	Cas d'un moteur avec deux barres adjacentes cassées.....	59
III.4.1.3	Effet de nombre et de la position des barres cassées.....	60
III.4.2	Analyse spectrale du courant statorique par le spectrogramme.....	61
III.5	Conclusion.....	63



Chapitre IV

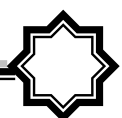
Technique des ondelettes et son application au diagnostic de la MAS

IV.1	Introduction.....	64
IV.2	Historique.....	64
IV.3	Rappels sur la transformée de Fourier.....	65
IV.4	La transformée en ondelettes.....	66
IV.5	Application de la (TO) aux signaux électriques.....	66
IV.6	Transformée en ondelettes continues (TOC).....	66
IV.6.1	Conditions d'application.....	67
IV.6.2	Procédure de calcul des coefficients d'ondelettes.....	68
IV.7	Transformée en ondelettes discrète (TOD).....	70
IV.8	La différence entre la TOC et TOD.....	71
IV.9	Quelque type des ondelettes.....	71
IV.10	Exemple de l'ondelette de Morlet (complexe).....	71
IV.11	Application de la technique des ondelettes au diagnostic de la MAS.....	72
IV.12	Résultats de simulation par la transformée en ondelettes continues.....	72
IV.12.1	Résultats de simulation d'un fonctionnement avec machine saine.....	73
IV.12.2	Résultats de simulation d'un fonctionnement avec cassure d'une seule barre.....	74
IV.12.3	Résultats de simulation d'un fonctionnement avec cassure de deux barres adjacents dans le même temps.....	76
IV.12.4	Résultats de simulation d'un fonctionnement avec cassure de deux barres adjacents à temps différent.....	77
IV.13	Comparaison entre les différentes méthodes d'analyse du signal utilisées dans notre cas... 79	79
IV.14	Conclusion.....	81
	Conclusion générale.....	82
	Annexes	
	Bibliographie	



Liste des symboles

- g : Glissement.
 P : La puissance
 P : Opérateur de Laplace
 p : Nombre de paires de pôles de la machine.
 s, r : Indices stator et rotor respectivement.
 N_r : Nombre de barres rotoriques.
 N_s : Nombre de spires par phase statorique.
 m : Nombre de phases statiques.
 μ_0 : Perméabilité magnétique de l'entrefer.
 L : Longueur du rotor.
 J : Moment d'inertie.
 R : Rayon moyen de l'entrefer.
 e : L'épaisseur de l'entrefer.
 α : L'angle électrique entre deux mailles rotoriques.
 L_{Sp} : Inductance propre d'une phase statorique.
 L_{rp} : Inductance propre d'une maille rotorique.
 L_b : Inductance d'une barre rotorique.
 f_s : Fréquence d'alimentation.
 L_b : Inductance d'une barre rotorique.
 L_e : Inductance total de l'anneau de court-circuit.
 L_{sc} : Inductance cyclique.
 I_e : Courant dans l'anneau de court- circuit.
 I_{bK} : Courant de barre.
 I_{rK} : Courant dans la boucle rotorique.
 I_{eK} : Courant dans une portion d'anneau.
 Φ_{psm} : Le flux principal.



M_s : Mutuelle entre phase statorique.

M_{rr} : La mutuelle entre deux mailles rotoriques.

B_{sm} : L'induction due à la bobine statorique de la phase m .

I_{sabc} : Courants des phases statoriques.

V_{sabc} : Les tensions statoriques.

Φ_{sabc} : Les flux statoriques.

θ : Position du rotor.

w : Vitesse de rotation mécanique.

R_e : Résistance totale de l'anneau de court-circuit.

R_s : Résistance de l'enroulement statorique.

R_r : Résistance rotorique.

d, q : Indices pour les composantes de PARK directe et quadrature, respectivement.

L_{sl} : L'inductance de fuite.

Φ_{smrk} : Le flux produit par la bobine statorique de la phase m induit dans la maille rotorique k .

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

Ψ : Ondelette mère.

φ : Fonction d'échelle.

a : Paramètre d'échelle.

b : Paramètre de translation.

C_ψ : Coefficient de l'ondelette mère Ψ .

$\hat{\Psi}$: Transformée de Fourier de la fonction Ψ .

$h(n)$: Filtre passe bas.

$g(n)$: Filtre passe haut.

Liste des tableaux

I.1 : Répartition des défauts (IEEE, EPRI). (Page 8)

II.1 : Inductances de la machine asynchrone à cage. (Page 22)

III.1 : Les différentes cassures des barres. (Page 62)



Liste des figures

- I.1** : Machine asynchrone triphasée. (Page 4)
- I.2** : Stator d'une machine asynchrone base tension. (Page 5)
- I.3** : Rotor à cage d'écureuil. (Page 7)
- I.4** : Répartition détaillée des défauts (EPRI). (Page 9)
- I.5** : Sources de défauts de la machine asynchrone à cage. (Page 10)
- I.6** : Principaux défauts de la machine asynchrone et leurs causes. (Page 11)
- I.7** : Rupture réelle des barres rotoriques. (Page 13)
- I.8** : Rupture d'une barre et d'un anneau de court circuit. (Page 13)
- I.9** : Roulement à billes. (Page 14)
- I.10** : Types de désalignement. (Page 16)
- I.11** : Types d'excentricité. (Page 17)
-
- II.1** : Circuit équivalent d'un rotor à cage d'écureuil. (Page 20)
- II.2** : Induction produite par une maille du rotor. (Page 20)
- II.3** : Position de la maille rotorique K par rapport à la bobine statorique de la phase ($m = 0$). (Page 21)
- II.4** : Représentation d'une maille rotorique. (Page 24)
- II.5** : Projection du modèle multi enroulement sur le modèle dq. (Page 29)
- II.6** : Schéma bloc de simulation du modèle de la MAS à cage d'écureuil. (Page 40)
- II.7.a** : Le couple électromagnétique (cas d'une machine saine). (Page 41)
- II.7.b** : La vitesse (cas d'une machine saine). (Page 41)
- II.7.c** : Courant statorique i_{as} (cas d'une machine saine). (Page 41)
- II.7.d** : Courant statorique i_{bs} (cas d'une machine saine). (Page 41)
- II.7.e** : Courant de la barre 1 (cas d'une machine saine). (Page 41)
- II.7.f** : Courant de la barre 2 (cas d'une machine saine). (Page 41)
- II.7.g** : Courants des barres rotoriques (cas d'une machine saine). (Page 42)
- II.7.h** : Courants statoriques (cas d'une machine saine). (Page 42)
- II.7.i** : Courant i_{dr} (cas d'une machine saine). (Page 42)



- II.7.j** : Courant i_{qr} (cas d'une machine saine). (Page 42)
- II.7.k** : Courant i_{ds} (cas d'une machine saine). (Page 42)
- II.7.l** : Courant i_{qs} (cas d'une machine saine). (Page 42)
- II.8.a** : Le couple électromagnétique (cassure d'une barre). (Page 44)
- II.8.b** : La vitesse (cassure d'une barre). (Page 44)
- II.8.c** : Courant statorique i_{as} (cassure d'une barre). (Page 44)
- II.8.d** : Courant de la barre 1 (cassure d'une barre). (Page 45)
- II.9.a** : Le couple électromagnétique (cassure de deux barres). (Page 46)
- II.9.b** : La vitesse (cassure de deux barres). (Page 46)
- II.9.c** : Courant statorique i_{as} (cassure de deux barres). (Page 46)
- II.9.d** : Courant de la barre 1 (cassure de deux barres). (Page 47)
- II.9.e** : Courant de la barre 2 (cassure de deux barres). (Page 47)
- III.1** : Synoptique de classement des méthodes de diagnostic. (Page 49)
- III.2** : Principe de fonctionnement de la méthode de redondance analytique. (Page 50)
- III.3** : Procédure de diagnostic basée sur la technique de la reconnaissance des formes. (Page 54)
- III.4** : Courant statorique état sain. (Page 57)
- III.5** : Courant statorique avec deux barres cassées. (Page 57)
- III.6** : Fenêtre de Hanning de l'analyse spectral pour un moteur sain. (Page 58)
- III.7** : Les différentes fenêtres de FFT pour cassure de deux barres adjacentes. (Page 59)
- III.8** : Fenêtre de Hanning pour différentes cassures de barre. (Page 60)
- III.9** : Spectrogramme du courant statorique. (Page 61)
- IV.1** : Quelques formes des ondelettes usuelles. (Page 71)
- IV.2.a** : La transformée en ondelettes de Daubechies du courant d'une phase statorique (cas d'une machine saine). (Page 73)
- IV.2.b** : Représentation de la transformée en ondelettes Gaussien du courant d'une phase statorique (cas d'une machine saine). (Page 73)
- IV.2.c** : Représentation de la transformée en ondelettes de Meyer du courant d'une phase statorique (cas d'une machine saine). (Page 73)
- IV.2.d** : Représentation de la transformée en ondelettes de Morlet du courant d'une phase statorique (cas d'une machine saine). (Page 73)



- IV.2.e** : Représentation de la transformée en ondelettes Gaussien complexe du courant d'une phase statorique (cas d'une machine saine). (Page 74)
- IV.3.a** : Représentation de la transformée en ondelettes de Daubechies du courant d'une phase statorique (cassure d'une barre). (Page 74)
- IV.3.b** : Représentation de la transformée en ondelettes Gaussien du courant d'une phase statorique (cassure d'une barre). (Page 74)
- IV.3.c** : Représentation de la transformée en ondelettes de Meyer du courant d'une phase statorique (cassure d'une barre). (Page 75)
- IV.3.d** : Représentation de la transformée en ondelettes de Morlet du courant d'une phase statorique (cassure d'une barre). (Page 75)
- IV.3.e** : Représentation de la transformée en ondelettes de Gaussien complexe du courant d'une phase statorique (cassure d'une barre). (Page 76)
- IV.4.a** : Représentation de la transformée en ondelettes de Daubechies du courant d'une phase statorique (cassure de deux barres adjacentes dans le même temps). (Page 76)
- IV.4.b** : Représentation de la transformée en ondelettes de Gaussien du courant d'une phase statorique (cassure de deux barres adjacentes dans le même temps). (Page 76)
- IV.4.c** : Représentation de la transformée en ondelettes de Meyer du courant d'une phase statorique (cassure de deux barres adjacentes dans le même temps). (Page 76)
- IV.4.d** : Représentation de la transformée en ondelettes de Morlet du courant d'une phase statorique (cassure de deux barres adjacentes dans le même temps). (Page 76)
- IV.4.e** : Représentation de la transformée en ondelettes de Gaussien complexe du courant d'une phase statorique (cassure de deux barres adjacentes dans le même temps). (Page 76)
- IV.5.a** : Représentation de la transformée en ondelettes de Daubechies du courant d'une phase statorique (cassure de deux barres adjacentes à temps différent). (Page 77)
- IV.5.b** : Représentation de la transformée en ondelettes de Gaussien du courant d'une phase statorique (cassure de deux barres adjacentes à temps différent). (Page 77)
- IV.5.c** : Représentation de la transformée en ondelettes de Meyer du courant d'une phase statorique (cassure de deux barres adjacentes à temps différent). (Page 78)
- IV.5.d** : Représentation de la transformée en ondelettes de Morlet du courant d'une phase statorique (cassure de deux barres adjacentes à temps différent). (Page 78)
- IV.5.e** : Représentation de la transformée en ondelettes de Gaussien complexe du courant d'une phase statorique (cassure de deux barres adjacentes à temps différent). (Page 78)
- IV.6** : Récapitulatif des résultats obtenus dans le cas d'une cassure de deux barres adjacentes à $t=1s$. (Page 80)



Introduction générale

Le cadre de ce travail, est le diagnostic des défauts rotoriques dans les machines asynchrones triphasés à cage d'écureuil. La machine asynchrone à cage est une composante clé de la plupart des équipements industriels, elle est 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 [1,2]

Par ailleurs, le progrès réalisé en matière d'électronique de puissance facilite la commande de cette machine et la rendant ainsi très utilisée 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 surveillance est un moyen de garantir le bon fonctionnement des systèmes. Le diagnostic fait partie de la surveillance. Il a pour objectif de détecter d'une manière précoce un défaut avant qu'il ne conduise à une défaillance totale dans l'installation industrielle. Les deux principales tâches de diagnostic sont : la détection et la localisation des défauts. La détection consiste à signaler l'existence du défaut, tandis que la localisation à pour objet de trouver le type de défaut.

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 [2].

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 obtenus par simulation sur Matlab. Cette technique propose une analyse très fine des signaux, offrir une représentation des signaux dans un plan temps-échelle (ou temps -fréquence) et permet de détecter d'éventuels défauts dans le rotor (cassure de barres) voire aussi la non-stationnarité dans les signaux où cette particularité est non disponible dans les techniques classiques.

Le présent manuscrit comporte quatre chapitres répartis comme suit :

Le premier chapitre de ce document rappelle le contexte de l'étude : en premier temps les éléments de construction de la machine à cage d'écureuil et ensuite les différents défauts qui se manifestent souvent dans cette machine ainsi que leurs causes.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation et la formulation mathématique du modèle multi-enroulement de la machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil, suivi de résultats de simulation du modèle de la machine à l'état sain et en présence de défauts.

Dans le troisième chapitre on présente les diverses méthodes de diagnostic. On termine ce chapitre par la présentation des résultats de simulations des défauts étudiés à travers l'analyse spectrale du courant d'une phase statorique, en utilisant la transformation de Fourier rapide FFT.

Le quatrième chapitre est consacré 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 suivi d'une comparaison entre cette nouvelle technique et la transformation de Fourier rapide STFT.

Enfin, une conclusion générale comportera une synthèse du travail effectué.

I.1 Introduction

La machine asynchrone, connue également sous le terme anglo-saxon « **Induction machine** », est une machine à courant alternatif polyphasée ne disposant d'aucune connexion entre son rotor et son stator. L'interaction entre le champ créé par l'inducteur (généralement le stator) et le courant induit au niveau du bobinage ou bien des barres, selon le type de machine, de l'induit (généralement le rotor) engendre le couple électromagnétique. Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de ces machines n'est pas forcément proportionnelle à la fréquence des courants qui la traversent.

La croissante 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.

Dans ce chapitre, 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 constituant cette machine, nous présentons un aperçu sur les différents défauts pouvant survenir dans la machine ainsi que leurs causes.

I.2 Eléments de constitution de la machine asynchrone

Généralement les machines tournantes sont toutes constituées d'une partie fixe et d'une partie tournante, la machine asynchrone ne déroge pas à cette règle cependant ses constituants présentent quelques singularités et dans ce qui suit nous présentons les différents éléments qui la constitue et pouvant être classés comme suit [3] :

- Le stator : partie fixe de la machine ;
- Le rotor : partie mobile ;
- Les paliers: organes mécaniques permettant la rotation du rotor et le maintien des différents sous-ensembles.

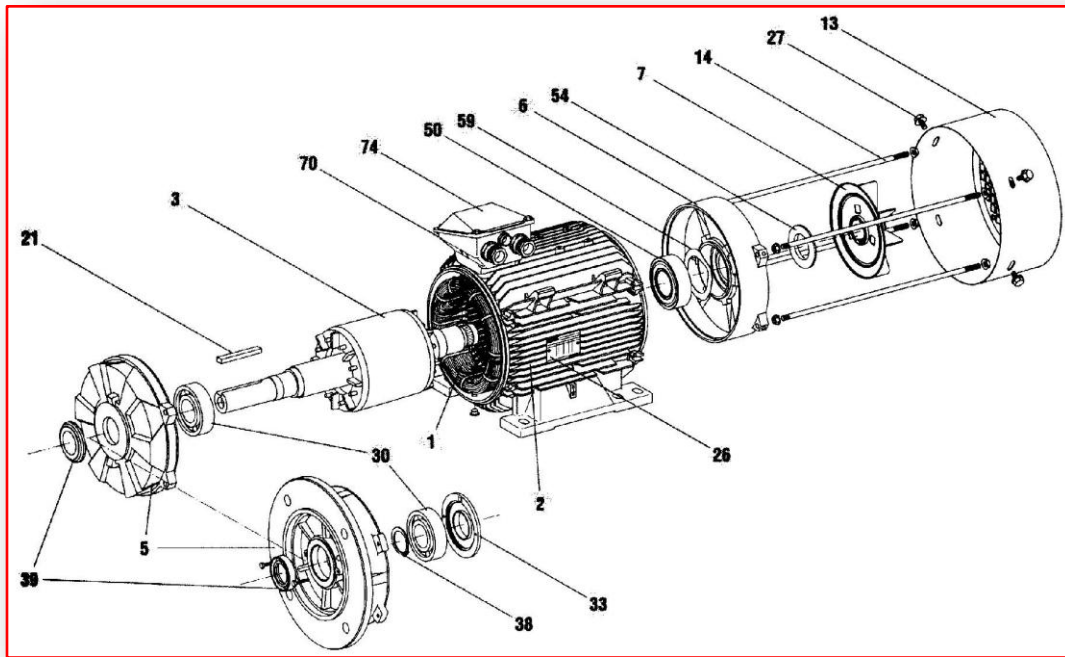


Figure 1.1 Machine Asynchrone Triphasée [4]

1 : Stator bobiné	38 : Circlips de roulement côté
2 : Carter	21 : Clavette
3 : Rotor	30 : Roulement côté
26 : Plaque signalétique accouplement	50 : Roulement arrière
27 : Vis de fixation du capot	39 : Joint côté accouplement
5 : Flasque côté accouplement	33 : Chapeau intérieur côté
6 : Flasque arrière accouplement	54 : Joint arrière
7 : Ventilateur	59 : Rondelle de précharge
13 : Capot de ventilation accouplement	70 : Corps de boîte à bornes
14 : Tiges de montage	74 : Couvercle de boîte à bornes

1.2.1 Stator

Le stator de la machine asynchrone est composé de différentes parties, dont on présente les caractéristiques et le rôle ci-dessous.

1.2.1.1 Carcasse

La carcasse sert de support, joue le rôle d’enveloppe, assure la protection contre les agents extérieurs et guide l’air de ventilation ; elle agit aussi parfois comme échangeur thermique. Elle peut être réalisée en métal coulé (fonte, acier ou aluminium) dans le cas des petites machines, par exemple le moteur asynchrone à ailettes de refroidissement.

Pour des puissances plus importantes, supérieures à quelques centaines de kilowatts, la construction mécano soudées impose, réalisée en tôles d'acier découpées, cintrées et soudées. Les carcasses sont étudiées pour recevoir le circuit magnétique bobiné et, éventuellement, un échangeur thermique, incorporé ou non, et des paliers flasques.

1.2.1.2 Circuit magnétique

Le circuit magnétique a pour principale rôle la canalisation des lignes d'induction magnétiques, le maintien des conducteurs du bobinage et la conduction thermique des conducteurs vers les zones de refroidissement. Le circuit magnétique doit donc présenter à la fois des propriétés magnétiques, des caractéristiques mécaniques déterminées et une bonne conductivité thermique. Les pertes les plus importantes au niveau du circuit magnétique sont les pertes fer par hystérésis et par courants de Foucault afin de les réduire, le circuit magnétique est généralement fait de fines tôles au silicium d'épaisseur inférieure à 1 mm. Les pertes massiques sont d'autant plus faibles que la teneur en silicium est élevée, en revanche, la perméabilité magnétique diminue avec l'augmentation de cette teneur.

1.2.1.3 Enroulement statorique

L'enroulement statorique, généralement de type polyphasé, est constitué de conducteurs répartis dans des encoches réalisées sur la tôle magnétique débouchant sur l'entrefer. Selon la répartition des conducteurs à l'intérieur des encoches on peut réaliser :

- Un bobinage en un étage, où tous les conducteurs d'une encoche appartiennent à une même phase, utilisé pour les machines de faible puissance ou pour des applications spécifiques ;
- Un bobinage en deux étages, où tous les conducteurs d'un étage situés dans une encoche appartiennent à une même phase et sont reliés électriquement en série ; suivant la valeur du pas de bobinage, il peut arriver que deux phases cohabitent dans la même encoche ; ces bobinages sont du type imbriqué ou ondulé (suivant le type de la machine et le constructeur) et sont couramment utilisés dans les machines de moyenne et forte puissance.

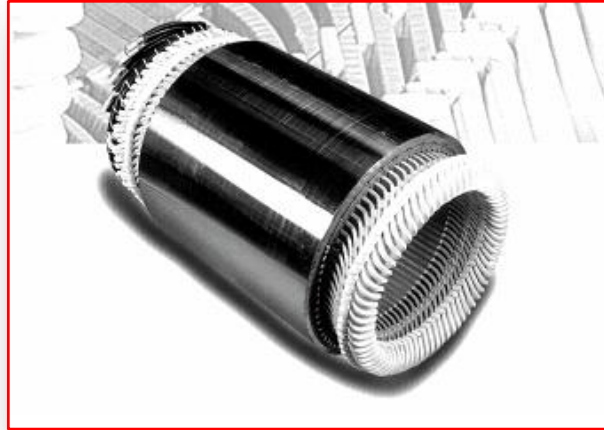


Figure I.2 Stator d'une machine asynchrone base tension [3]

I.2.2 Rotor

Le rotor des machines asynchrone est généralement constitué : d'un arbre qui supporte un circuit magnétique dont le rôle est similaire à celui du circuit magnétique statorique et un bobinage ou bien une cage d'écuriel. Les différents types de machines asynchrones se distinguent que par leurs rotor qui peut être bobiné ou bien à cage. Ce dernier sera présenté ci-dessous.

I.2.2.1 Arbre

L'arbre de la machine électrique, supporté par un ou plusieurs paliers, est un organe de transmission du mouvement de rotation et sert de support au corps du rotor, au circuit magnétique et aux enroulements tournants. L'arbre est en acier moulé ou forgé dont les caractéristiques mécaniques sont choisies après avoir déterminé les contraintes maximales qui apparaissent lors des efforts permanents ou accidentels qui peuvent être classées en quatre catégories :

- Les efforts de flexion qui résultent des effets de la pesanteur, de la force centrifuge qui s'exerce sur l'arbre lui-même et sur les organes qu'il supporte, de l'attraction magnétique radiale différentielle et des forces extérieures éventuelles ;
- Les efforts de torsion qui ont principalement pour origine le couple électromécanique transmis ;
- Les efforts radiaux et tangentiels locaux qui ont pour cause la force centrifuge qui s'exerce sur l'arbre lui-même et sur les organes qu'il supporte ;
- Les efforts axiaux de traction et de compression dus soit à l'action de la pesanteur pour les machines verticales, soit aux réactions axiales de la machine accouplée.

1.2.2.2 Cage d'écureuil

La cage est constituée de barres conductrices, régulièrement réparties, court-circuitées à leurs extrémités par deux anneaux conducteurs, le tout rappelant la forme d'une cage d'écureuil (figure I.3). Les cages sont généralement coulées directement dans les encoches rotoriques et sont en cuivre ou en laiton pour les machines de grandes puissances et fait d'aluminium coulé sous pression pour la basse et moyenne puissance. Bien que la cage soit coulée directement dans les encoches faites au niveau du circuit magnétique, donc présentant peu ou pas d'isolation par rapport à ce dernier, les courants de fuite restent faibles sauf dans le cas de rupture de barres. Les rotors à cage présentent, relativement aux rotors bobinés, les avantages suivants :

- Démarrage de la machine sans avoir recours à un rhéostat ;
- Une petite réactance de fuite donc un meilleur facteur de puissance ;
- Un meilleur rendement, à condition que la résistance de la cage ne soit pas augmentée.

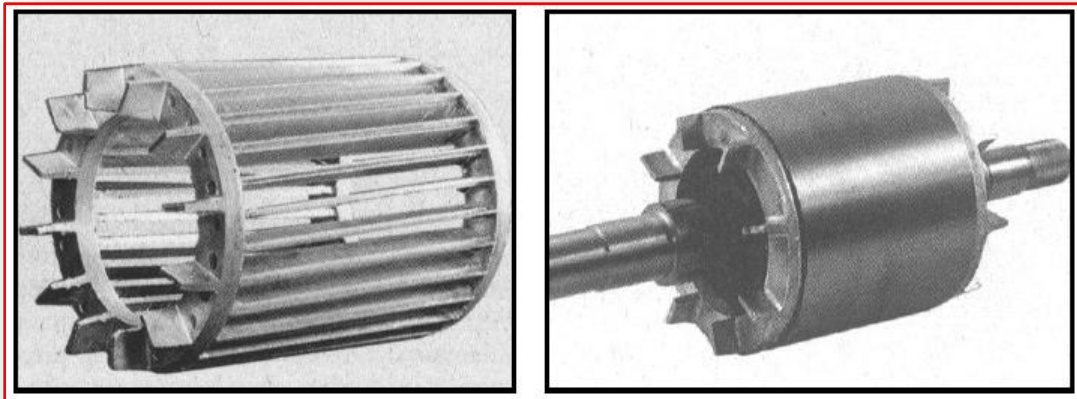


Figure I.3 Rotor à cage d'écureuil [3]

1.2.3 Paliers

Les paliers ont pour rôle de soutenir le rotor et permettre sa libre rotation, les déplacements axiaux sont bloqués par un calage longitudinal sur l'un des paliers, sur le second palier ces déplacements sont laissés libre pour compenser la dilatation thermique de l'arbre. Les dissymétries des réluctances du circuit magnétique engendrent des courants dans l'arbre qui sont éliminés par isolation électrique de l'un des paliers par une feuille isolante. On distingue deux types de paliers :

- Paliers lisses ;
- Paliers à roulements.

1.2.3.1 Paliers lisses

Ces types de paliers comportent deux parties principales qui sont le corps de palier et le coussinet.

1.2.3.1.1 Corps de palier

Le corps de palier constitue le bâti et le support du coussinet, dans les paliers flasques il est généralement fixé sur la carcasse et dans le cas des paliers pieds, utilisés pour les machines de grandes dimensions et de masses supérieures à 20t, il est désolidarisé de la carcasse.

1.2.3.1.2 Coussinets

Selon le diamètre de l'arbre, le coussinet peut être une simple douille en cuivre (pour les diamètres d'axe inférieur à 80mm) ou bien réalisé en deux pièces (dans le cas des diamètres supérieurs à 80mm) et est généralement monté sur rotule dans le corps de palier. Les coussinets sont faits de fonte ou d'acier moulé et la surface interne est recouverte d'alliage antifriction.

1.2.3.2 Paliers à roulements

Les paliers à roulement sont utilisés dans le cas des machines de masse inférieure à 20 t. Leurs avantages vis-à-vis des paliers lisses sont un faible encombrement, donc réduction de la longueur de la machine, réduction des pertes par frottement et de faibles jeux et usures mais présente une sensibilité aux vibrations et aux surcharges accidentelles.

1.3 Défaillances de la machine asynchrone et leurs origines

La machine asynchrone s'est imposée par rapport aux autres types de machines grâce à sa robustesse et son faible coût de fabrication, néanmoins elle peut présenter parfois des défauts mécaniques ou électriques pouvant toucher ses différents organes. Différentes études statistiques ont été effectuées afin de déterminer la répartition des pannes dans les différentes parties des machines, les résultats des études les plus significatives [3] sont donnés dans le tableau suivant :

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

Tableau I.1 Répartition des défauts (IEEE, EPRI) [5].

Selon l'étude effectuée par l'EPRI (Electric Power Research Institute) sur des machines utilisées pour différentes applications dans de multiples domaines industriels, la figure I.3 donne la répartition détaillée des différents défauts.

D'autres études [4] ont montré que le taux de défauts de roulements est plus grand dans le cas des machines de forte puissance (100kW à 1MW) et cela s'explique par des contraintes mécaniques importantes appliquées aux machines de cette gamme de puissance. Avec le développement des isolants électriques entre 1973 et 1988 les pannes au stator ont diminué de manière significative ; elles sont passées de 78% à 60%, alors que les pannes au rotor ont augmenté de 12% à 22%.

I.3.1 Défaillances d'ordre électrique

Les défaillances d'ordre électrique sont des défauts qui touchent les parties électriques de la machine. Elles peuvent affecter aussi bien le bobinage dans le stator que la cage d'écureuil au niveau du rotor.

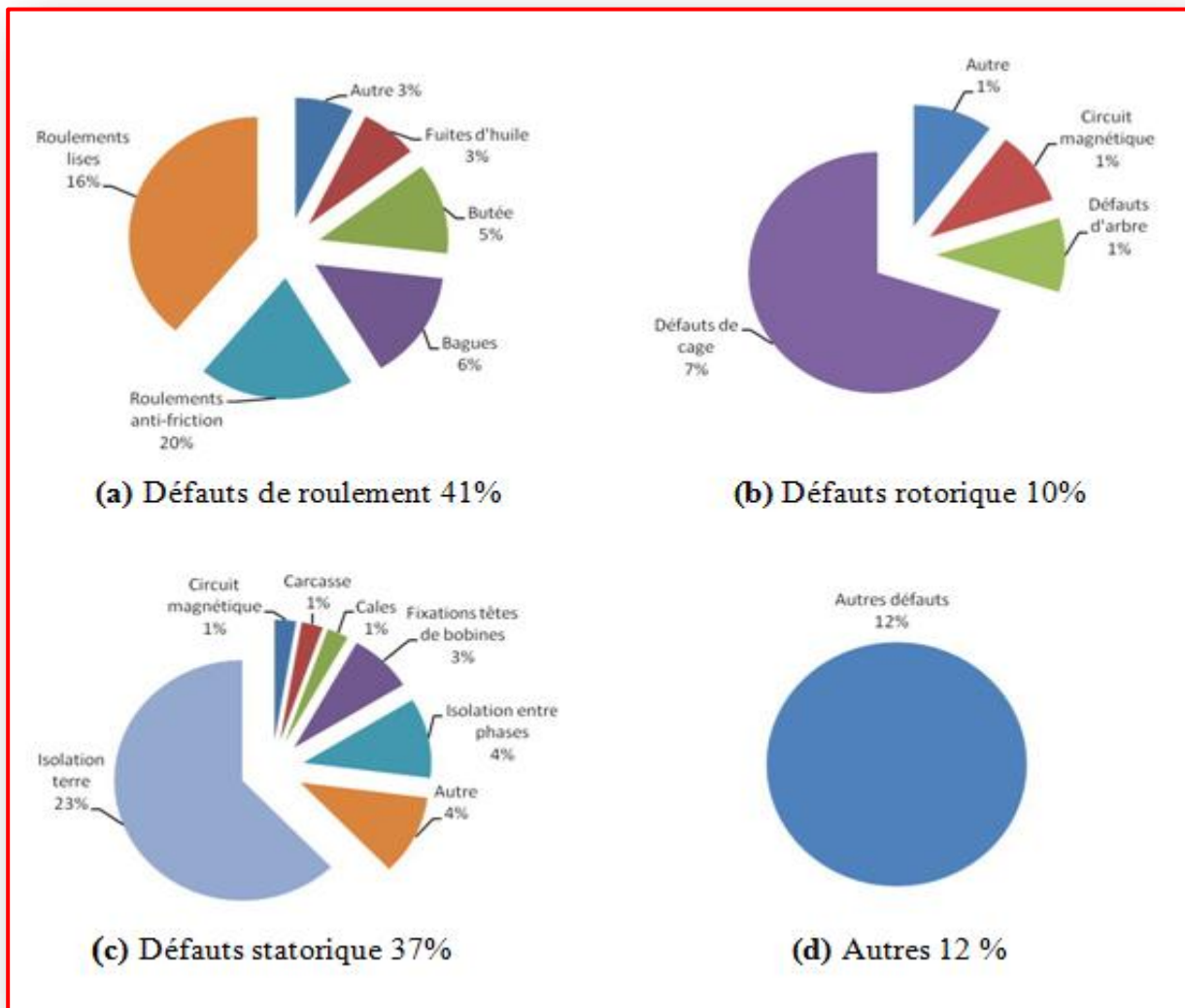


Figure I.4 Répartition détaillée des défauts (EPRI) [5].

I.3.2 Organigrammes des sources et différents classes des défauts

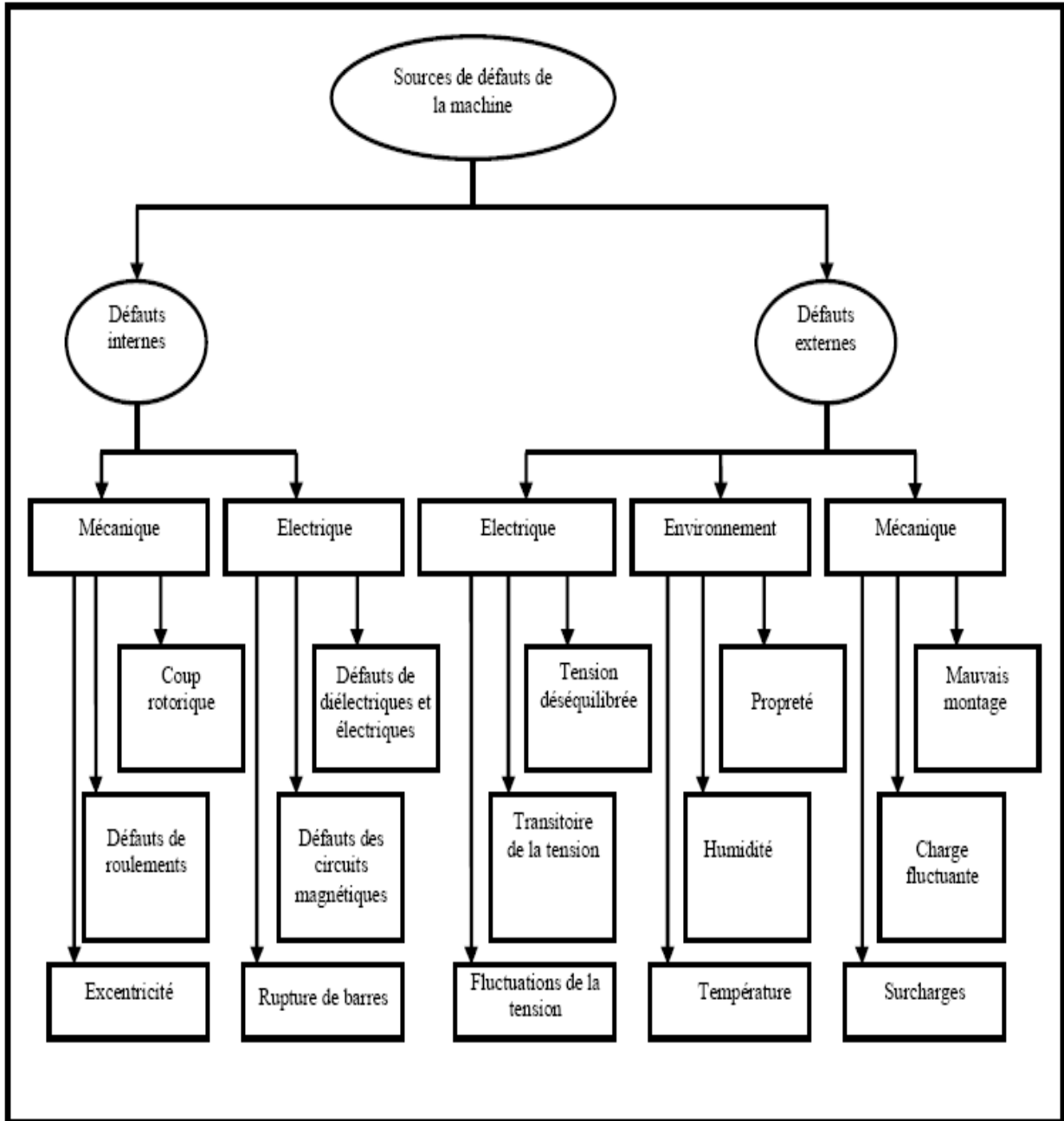


Figure I.5 Sources de défauts de la machine asynchrone à cage [2].

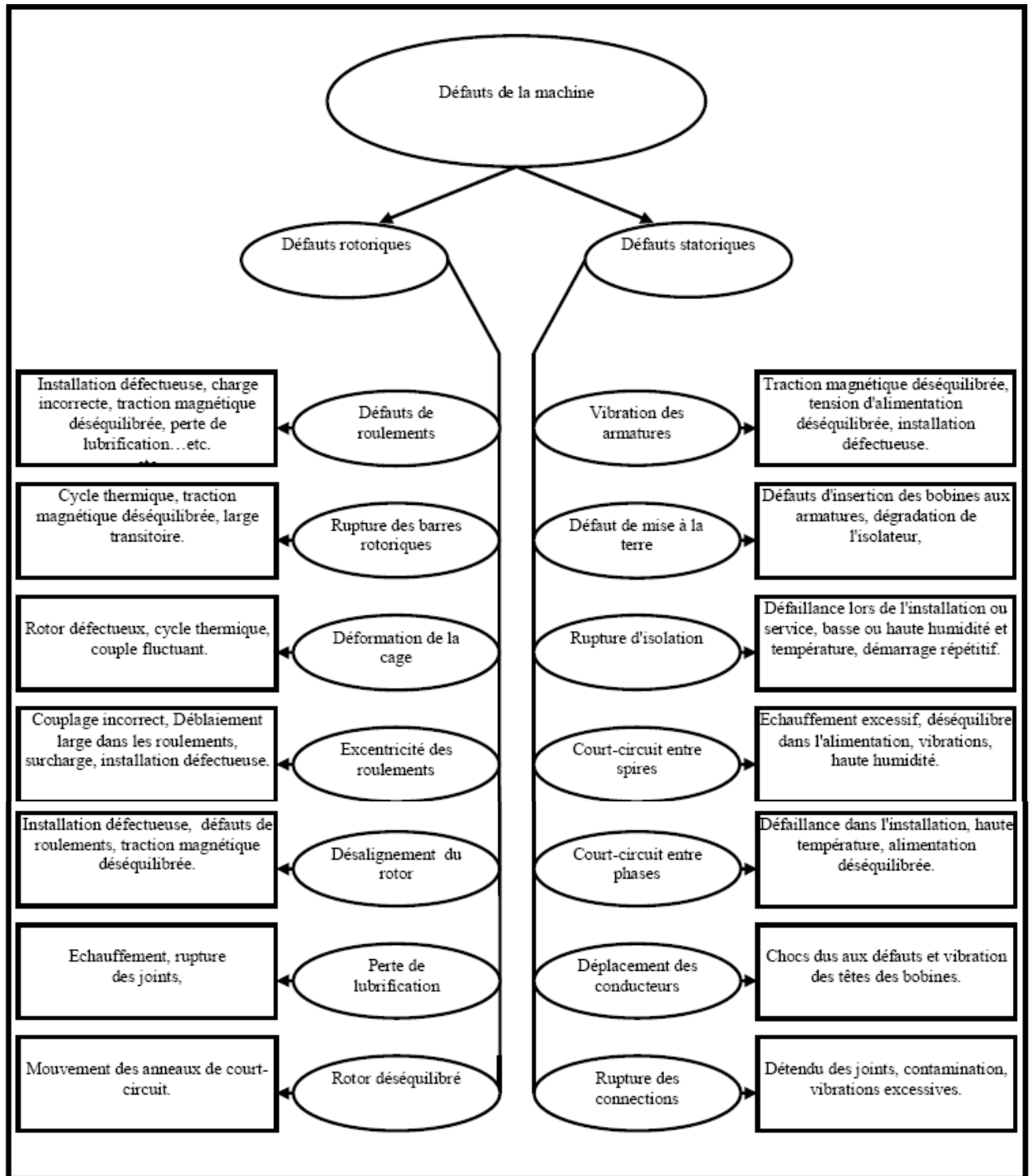


Figure I.6 Principaux défauts de la machine asynchrone et leurs causes [2].

1.3.3 Défaillances des circuits électriques statoriques

Les défaillances des circuits électriques statoriques peuvent avoir diverses origines. A titre d'exemples, on peut citer :

- Rupture d'isolation,
- Les courts-circuits entre phases : provoquent un arrêt net de la machine,
- Les courts-circuits entre phase et neutre : provoquent un déséquilibre des phases,
- Les courts-circuits inter-spires : ce sont les plus couramment rencontrés et les plus nuisibles, ils se produisent à l'intérieur des encoches,
- Rupture des connexions.

Ces défauts ont généralement pour cause principale le vieillissement prématuré des isolants dû aux vibrations et échauffements excessifs de la machine ainsi qu'aux surtensions provoquées par les circuits de commande [5].

Ces types de défaillances entraînent :

- Un changement de la densité de flux magnétique dans l'entrefer,
- Un changement de la signature du courant statorique,
- Un changement de la fonction de transfert de la machine,
- Des vibrations,
- Un échauffement de la machine.

1.3.4 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.

1.3.4.1 Les cassures des barres

Ces défauts apparaissent au niveau du rotor. Ce sont les défauts les plus fréquents. Ils se présentent par des ruptures totales ou partielles d'une (s) barre (s) au niveau de la cage d'écureuil. Ils se traduisent par une augmentation de la résistance équivalente d'un enroulement rotorique. Ces pannes rotoriques engendrent malheureusement des ondulations dans le couple électromagnétique qui elles mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation de la machine. Ce qui génère des défauts mécaniques en plus dans la machine.

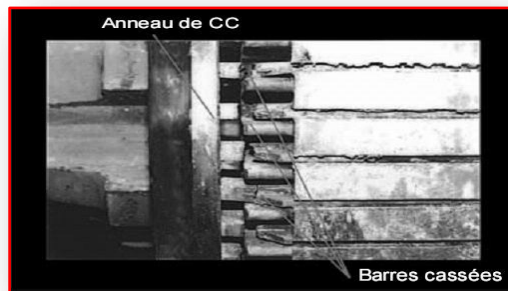


Figure I.7 Rupture réelle des barres rotoriques [6].

1.3.4.2 Cassure d'une portion d'anneau de court-circuit

Les cassures de portion d'anneaux sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations entre les barres et les anneaux. Les anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. Un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement ou une surcharge du couple et donc de courant peuvent entraîner leur cassure. La cassure d'une portion d'anneau engendre un comportement similaire à celui de la cassure de barres. Suite à l'apparition de ces défauts, la machine continue à fonctionner, il est donc très difficile de détecter ces défaillances si la machine est en régime de défauts. Le courant que conduit une barre cassée se répartit sur les autres barres, ces dernières seront surchargées, ce qui conduit à leurs ruptures, et par la suite la rupture d'un nombre plus important de barres, dans la machine.

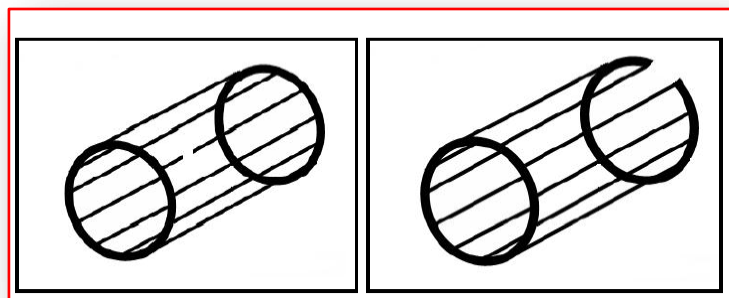


Figure I.8 Rupture d'une barre et d'un anneau de court circuit [7].

I.3.5 Défaillances d'ordre mécanique

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.3.5.1 Défaillances des roulements

Les roulements sont l'une des causes les plus importantes des défaillances des machines tournantes. Ils se composent généralement de :

- De deux bagues : une bague intérieure et une bague extérieure,
- De corps roulants permettant la rotation relative de ces deux bagues,
- D'une cage séparant les corps roulants.

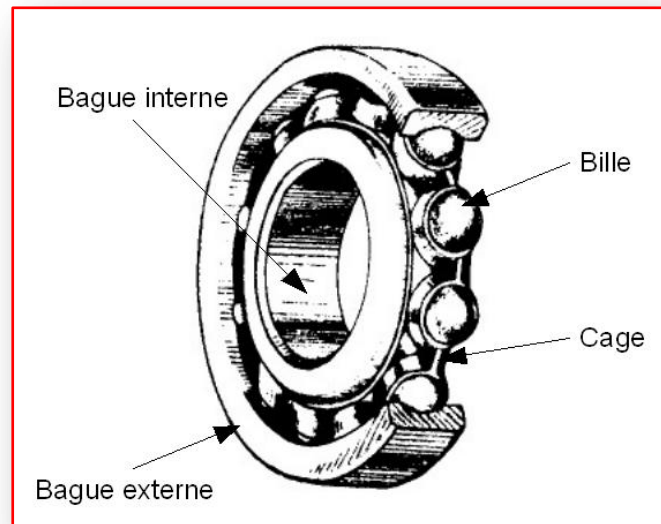


Figure I.9 Roulement à billes [2]

Les roulements peuvent présenter les défauts suivants [5]:

- Trous dans les gorges de roulement intérieures et extérieures,
- Ondulation de leur surface de roulement,
- Attaque des billes,
- Corrosion due à l'eau,
- Défaut de graissage, problème dû à la température,
- Décollement, effritement de surface, provoquée par une surcharge.

Une mauvaise lubrification, des contraintes radiales et axiales importantes, un mauvais positionnement durant l'assemblage ou un désalignement peuvent causer ces défaillances.

Comme incidences sur la machine, on peut citer :

- Les oscillations du couple de charge,
- Les vibrations et échauffements excessives,
- Changement de la signature du courant.

1.3.5.2 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.

1.3.5.3 Défaillances de l'arbre

Ces défaillances ont pour cause des fissures sur l'arbre dues à un mauvais choix du matériau ou une mauvaise construction de la machine. Sous l'action des différentes contraintes mécaniques, dynamiques, résiduelles, thermiques, électromagnétiques et environnementales, les fissures peuvent entraîner la fracture nette de l'arbre provoquant l'arrêt immédiat de la machine.

D'autre part, l'utilisation de la machine dans des milieux corrosifs entraîne l'apparition de microfissures pouvant conduire à la destruction de la machine. Les différents défauts d'excentricité peuvent aussi entraîner la fatigue de l'arbre en induisant des efforts supplémentaires.

1.3.6 Effets des défauts mécaniques sur la machine asynchrone

Les différentes défaillances mécaniques de la machine asynchrone peuvent avoir diverses conséquences, parmi celles-ci on peut citer les oscillations du couple, l'excentricité et le désalignement du rotor qu'on présente dans ce qui suit.

1.3.6.1 Oscillation du couple

Une anomalie dans la charge mécanique (variation ou déséquilibre de la charge, désalignement de l'axe, problème de couplage mécanique), un défaut de la boîte de vitesse ou des roulements peuvent entraîner des oscillations de couple et par conséquent des oscillations de vitesse.

I.3.6.2 Désalignement

Le désalignement peut être interne suite à un mauvais assemblage de la machine ou une défaillance des roulements, ou bien externe dû à un mauvais couplage mécanique. Et cela a pour conséquence sur la machine l'augmentation des vibrations, ce qui entraîne l'usure prématurée de divers composants et peut même quelquefois entraîner de grave dommage. Généralement les machines peuvent supporter un léger désalignement mentionné par la tolérance d'alignement fournie par le constructeur. On distingue trois types de base du désalignement

- Le premier type de désalignement est le désalignement parallèle représenté sur la figure I.10 (a) qui existe lorsque les deux axes sont excentrés parallèlement et cela, horizontalement, verticalement ou bien une combinaison des deux ;
- Le second type est le désalignement angulaire représenté sur la figure I.10(b) ce type existe lorsque les deux axes sont obliques, donc forment un angle et cela, peut être sur le plan vertical ou horizontal mais le cas le plus rencontré est la combinaison des deux ;
- Le troisième type est la combinaison des deux premiers types comme le montre la figure I.10 (c).

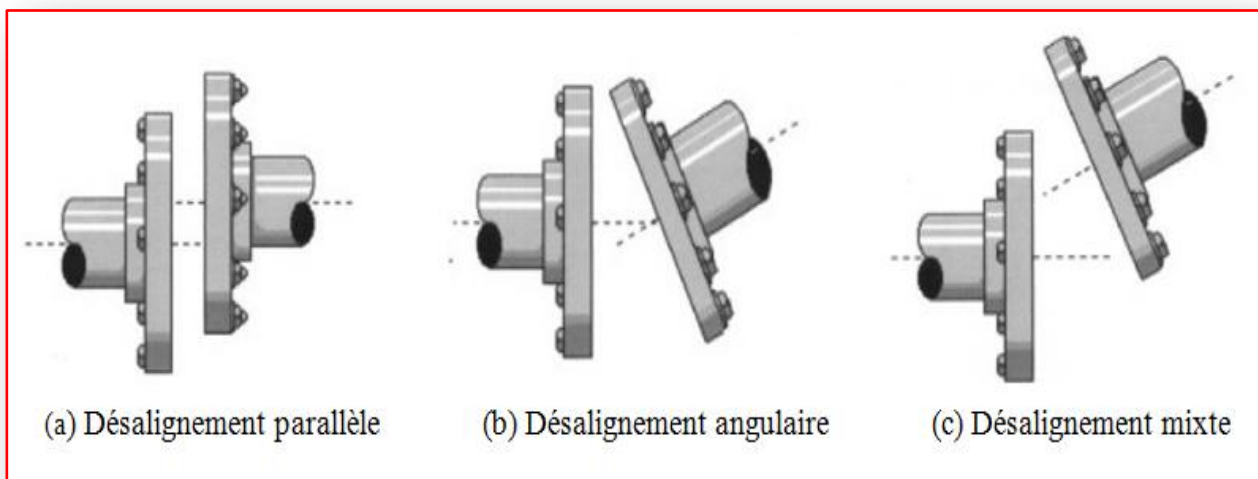


Figure I.10 Types de désalignement [5]

I.3.6.3 Excentricité

En plus du défaut d'oscillation du couple ou de désalignement, les défauts mécaniques peuvent engendrer un déplacement du centre du rotor par rapport au stator ou des déformations du rotor qui ont pour conséquence un non uniformité de l'entrefer, c'est à dire une excentricité du rotor. On distingue généralement trois types d'excentricité (figure I.11) [5] :

I.3.6.3.1 Excentricité statique

Le centre géométrique du rotor est confondu avec le centre de rotation, mais il est déplacé par rapport au centre géométrique du stator. Cela peut être causé par un mauvais positionnement du stator ou du rotor lors de l'assemblage ou bien à cause d'une déformation du rotor ou du stator.

I.3.6.3.2 Excentricité dynamique

Le centre géométrique du rotor est différent du centre de rotation et ce dernier est confondu avec le centre géométrique du stator. Cela peut être causé par différents facteurs comme les tolérances de fabrication, utilisation de roulement, désalignement, résonance mécanique aux vitesses critiques, mauvaise construction des différentes pièces de la machine. Le mouvement giratoire du rotor pour des vitesses critiques est une autre source de ce type d'excentricité et il a une importante considération dans le cas d'axes flexibles ou courbés.

I.3.6.3.3 Excentricité mixte

C'est la combinaison des deux excentricités précédemment cité.

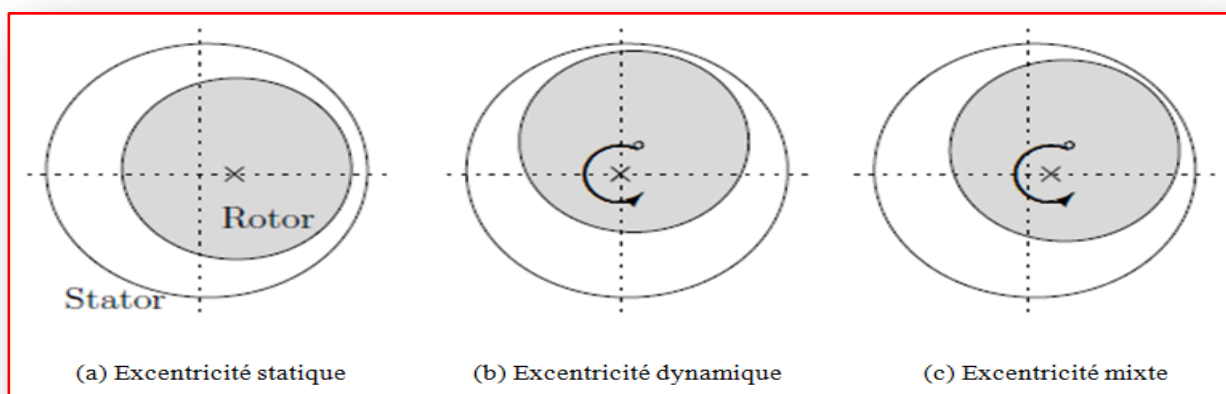


Figure I.11 Types d'excentricité [5]

Le risque d'une grande excentricité est le contact mécanique entre le rotor et le stator, ce qui entraînerait des dommages considérable à la machine.

I.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné en premier temps, quelques rappels sur la constitution de la machine asynchrone à cage d'écureuil et son principe de fonctionnement, puis en deuxième temps nous avons évoqué les différents types des défaillances qui peuvent apparaître dans la machine en question ainsi que leurs influences sur son comportement. Parmi les défauts les plus étudiés, la rupture des barres rotoriques d'une machine asynchrone à cage fait partie des plus courants. En fait, dans le domaine du diagnostic ainsi que dans celui de la commande des machines électriques, il est intéressant de disposer d'un modèle capable de représenter le comportement de la machine en présence de ces défauts. La description détaillée d'un tel modèle fera l'objet du chapitre suivant.

II.1 Introduction

Il y a 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, 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.

La modélisation et la simulation des machines constituent une étape primordiale en matière de diagnostic. Dans ce chapitre, nous détaillons tout d'abord le modèle (modèle multi-enroulements) de la machine asynchrone à cage d'écureuil en l'absence des défauts, puis nous présenterons le modèle qui met en évidence l'influence des défauts sur le comportement dynamique de la machine.

II.2 Hypothèses simplificatrices

Pour pouvoir nous concentrer sur la simulation des ruptures de barres et de portions d'anneaux de court-circuit, nous avons modélisé le rotor par des mailles reliées entre elles électriquement et couplées magnétiquement, où une maille est constituée de deux barres et les deux portions d'anneaux qui les relie. Chaque barre et segment d'anneau sont caractérisés par une résistance et une inductance. Pour notre modélisation, nous avons été amenés à faire quelques hypothèses simplificatrices :

- ❖ Perméabilité relative de fer très grande;
- ❖ Entrefer lisse et constant (effet d'excentricité négligeable, champ radial);
- ❖ Distribution sinusoïdale de la force magnétomotrice statorique;
- ❖ Effet pelliculaire nul – courants de Foucault négligeables hors des barres rotoriques.

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

II.3 Calcul des inductances [8]

II.3.1 stator

L'induction due à la bobine statorique de la phase m s'écrit :

$$B_{sm}(\theta) = \frac{2}{\pi} \mu_0 \frac{N_s}{ep} I_{sm} \cos(p\theta - m \frac{2\pi}{3}) \quad (\text{II.1})$$

Par conséquent, le flux principal et l'inductance cyclique sont donnés par :

$$\Phi_{psm} = \frac{4}{\pi} \mu_0 \frac{N_s^2}{ep^2} R L I_{sm} \quad (\text{II.2})$$

$$L_{sc} = \frac{3}{2}L_{sp} + L_{sl} = \frac{6}{\pi} \mu_0 \frac{N_s^2}{ep^2} RL + L_{sl} \tag{II.3}$$

II.3.2 Rotor

Le rotor à cage est représenté par la figure (II.1), la figure (II.2) représente la forme d'onde de l'induction produite par la maille rotorique k.

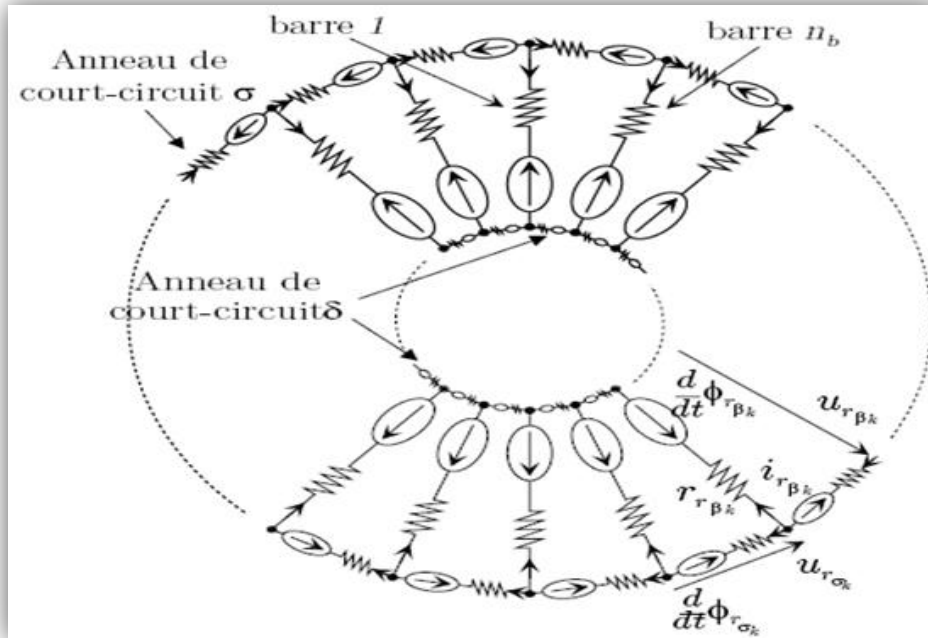


Figure II.1 Circuit équivalent d'un rotor à cage d'écureuil [9]

I_{rk} représente le courant de maille k et I_{bk} le courant de barre K, avec :

$$I_{bk} = I_{rk} - I_{r(k-1)} \tag{II.4}$$

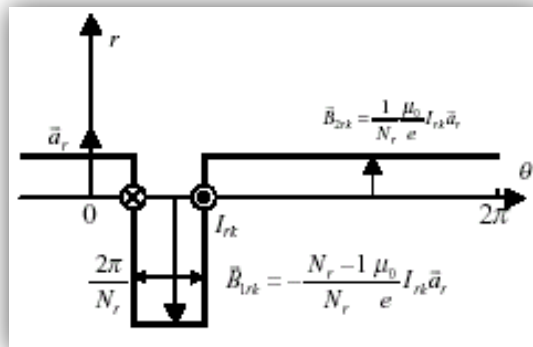


Figure II.2 Induction produite par une maille du rotor [10]

On voit bien, à travers la figure (II.2) qu'il n'est pas possible de retenir l'hypothèse du premier harmonique qui concerne l'induction produite par une maille du rotor. Partant de cette répartition, on calcule alors l'inductance principale d'une maille rotorique ainsi que la mutuelle entre deux mailles :

$$L_{rp} = \frac{N_r - 1}{N_r^2} \frac{\mu_0}{e} 2\pi LR \quad (\text{II.5})$$

$$M_{rr} = -\frac{1}{N_r^2} \frac{\mu_0}{e} 2\pi LR \quad (\text{II.6})$$

II.3.3 Stator rotor

L'induction produite par la bobine statorique de la phase m induit dans la maille rotorique K le flux :

$$\Phi_{smrk} = \int_{S_{rk}} \vec{B}_{sm} \vec{d}S_{rk} = - \int_{\left(\frac{\theta}{p} + k \frac{2\pi}{N_r} - \frac{\pi}{N_r}\right)}^{\left(\frac{\theta}{p} + k \frac{2\pi}{N_r} + \frac{\pi}{N_r}\right)} B_{sm}(\theta') LR d\theta' \quad (\text{II.7})$$

$$\Phi_{smrk} = -\frac{2}{\pi} \frac{\mu_0}{ep} N_S I_{Sm} LR \frac{1}{p} \left[\sin\left(p\theta' - m \frac{2\pi}{3}\right) \right]_{\frac{\theta}{p} + k \frac{2\pi}{N_r} - \frac{\pi}{N_r}}^{\frac{\theta}{p} + k \frac{2\pi}{N_r} + \frac{\pi}{N_r}} \quad (\text{II.8})$$

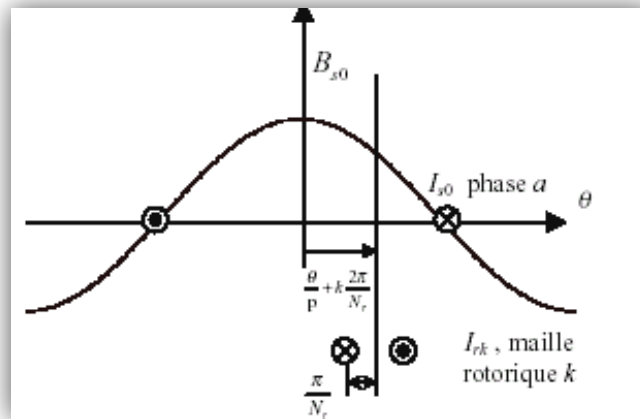


Figure II.3 Position de la maille rotorique K , par rapport à la bobine statorique de la phase ($m = 0$)

Il en résulte le mutuel stator rotor entre la phase statorique m et la maille rotorique K :

$$M_{smrk} = -M_{Sr} \cos\left(\theta - m \frac{2\pi}{3} + k\alpha\right) \quad (\text{II.9})$$

$$\text{où } M_{Sr} = \frac{4}{\pi} \frac{\mu_0}{ep^2} N_S LR \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (\text{II.10})$$

Et $\alpha = p \frac{2\pi}{N_r}$ est l'angle électrique entre deux mailles rotoriques. Le tableau suivant, résume les expressions de toutes les inductances de la machine asynchrone à cage.

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

Tableau II.1 Inductances de la machine asynchrone à cage

II.4 Mise en équation

Nous utilisons une transformation de Clarke pour passer des grandeurs triphasées statoriques (a, b, c) aux grandeurs diphasées (α, β). Nous pouvons effectuer la simulation avec deux repères distincts pour le stator et le rotor. Pour alléger le temps de calcul, on élimine l'angle θ de la matrice de couplage en choisissant le repère le plus adéquat et qui est celui du rotor. Dans ce repère, toutes les grandeurs ont une pulsation gW_s en régime permanent. Cette caractéristique peut être utilisée pour l'analyse de rupture de barres rotoriques dans la machine par l'observation du courant I_{ds} .

II.4.1 stator

On déduit pour l'ensemble des phases statoriques

$$[V_{Sabc}] = [R_S][I_{Sabc}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{sabc}] \tag{II.11}$$

Après transformation et rotation, les équations électriques dans le repère rotorique s'écrivent :

$$V_{ds} = R_S I_{ds} - W \Phi_{qs} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} \tag{II.12}$$

$$V_{qs} = R_S I_{qs} + W \Phi_{ds} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} \quad (\text{II.13})$$

Avec :

$$\Phi_{sdq} = \begin{bmatrix} L_{sc} & 0 \\ 0 & L_{sc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} - M_{sr} \begin{bmatrix} \dots & \cos j\alpha & \dots \\ \dots & \sin j\alpha & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{r0} \\ \vdots \\ I_{rj} \\ \vdots \\ I_{r(N_r-1)} \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

Donc :

$$\Phi_{ds} = L_{sc} I_{ds} - M_{sr} [\cos 0\alpha I_{r0} + \cos 1\alpha I_{r1} + \dots + \cos j\alpha I_{rj} + \dots + \cos(N_r - 1)\alpha I_{r(N_r-1)}] \quad (\text{II.15})$$

De la même façon pour Φ_{qs}

$$\Phi_{qs} = L_{sc} I_{qs} - M_{sr} [\sin 0\alpha I_{r0} + \sin 1\alpha I_{r1} + \dots + \sin j\alpha I_{rj} + \dots + \sin(N_r - 1)\alpha I_{r(N_r-1)}] \quad (\text{II.16})$$

Après la dérivation des équations (II.15) et II.16), on aboutit à :

$$\frac{d\Phi_{ds}}{dt} = L_{sc} \frac{dI_{ds}}{dt} - M_{sr} \begin{bmatrix} \dots & \cos j\alpha & \dots \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{r0} \\ \vdots \\ I_{rj} \\ \vdots \\ I_{r(N_r-1)} \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

Et :

$$\frac{d\Phi_{qs}}{dt} = L_{sc} \frac{dI_{qs}}{dt} - M_{sr} \begin{bmatrix} \dots & \sin j\alpha & \dots \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{r0} \\ \vdots \\ I_{rj} \\ \vdots \\ I_{r(N_r-1)} \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

On remplace les expressions des flux (II.15), (II.16), (II.17) et (II.18) dans les équations (II.12) et (II.13). Nous obtenons :

$$V_{ds} = R_S I_{ds} - W [L_{sc} I_{qs} - M_{sr} (\sin 0\alpha I_{r0} + \sin 1\alpha I_{r1} + \dots + \sin j\alpha I_{rj} + \dots + \sin(N_r - 1)\alpha I_{r(N_r-1)})] + L_{sc} \frac{dI_{ds}}{dt} - M_{sr} \left(\cos 0\alpha \frac{dI_{r0}}{dt} + \cos 1\alpha \frac{dI_{r1}}{dt} + \dots + \cos j\alpha \frac{dI_{rj}}{dt} + \dots + \cos(N_r - 1)\alpha \frac{dI_{r(N_r-1)}}{dt} \right) \quad (\text{II.19})$$

Et :

$$V_{qs} = R_s I_{qs} + W \left[L_{sc} I_{qs} - M_{sr} \left(\cos 0\alpha I_{r0} + \cos 1\alpha I_{r1} + \dots + \cos j\alpha I_{rj} + \dots + \cos(N_r - 1)\alpha I_{r(N_r-1)} \right) \right] + L_{sc} \frac{dI_{qs}}{dt} - M_{sr} \left(\sin 0\alpha \frac{dI_{r0}}{dt} + \sin 1\alpha \frac{dI_{r1}}{dt} + \dots + \sin j\alpha \frac{dI_{rj}}{dt} + \dots + \sin(N_r - 1)\alpha \frac{dI_{r(N_r-1)}}{dt} \right) \quad (\text{II.20})$$

On écrit les équations (II.19) et (II.20) sous la forme :

$$[L] \frac{d}{dt} [I] = [V] - [R][I] \quad (\text{II.21})$$

Donc :

$$L_{sc} \frac{dI_{ds}}{dt} - M_{sr} \left(\cos 0\alpha \frac{dI_{r0}}{dt} + \dots + \cos j\alpha \frac{dI_{rj}}{dt} + \dots + \cos(N_r - 1)\alpha \frac{dI_{r(N_r-1)}}{dt} \right) = V_{ds} - R_s I_{ds} + WL_{sc} I_{qs} - WM_{sr} \left(\sin 0\alpha I_{r0} + \dots + \sin j\alpha I_{rj} + \dots + \sin(N_r - 1)\alpha I_{r(N_r-1)} \right) \quad (\text{II.22})$$

Et :

$$L_{sc} \frac{dI_{qs}}{dt} - M_{sr} \left(\sin 0\alpha \frac{dI_{r0}}{dt} + \dots + \sin j\alpha \frac{dI_{rj}}{dt} + \dots + \sin(N_r - 1)\alpha \frac{dI_{r(N_r-1)}}{dt} \right) = V_{qs} - R_s I_{qs} - WL_{sc} I_{qs} + WM_{sr} \left(\cos 0\alpha I_{r0} + \dots + \cos j\alpha I_{rj} + \dots + \cos(N_r - 1)\alpha I_{r(N_r-1)} \right) \quad (\text{II.23})$$

II.4.2 Rotor

Le rotor à cage est représenté par la figure (II.4)

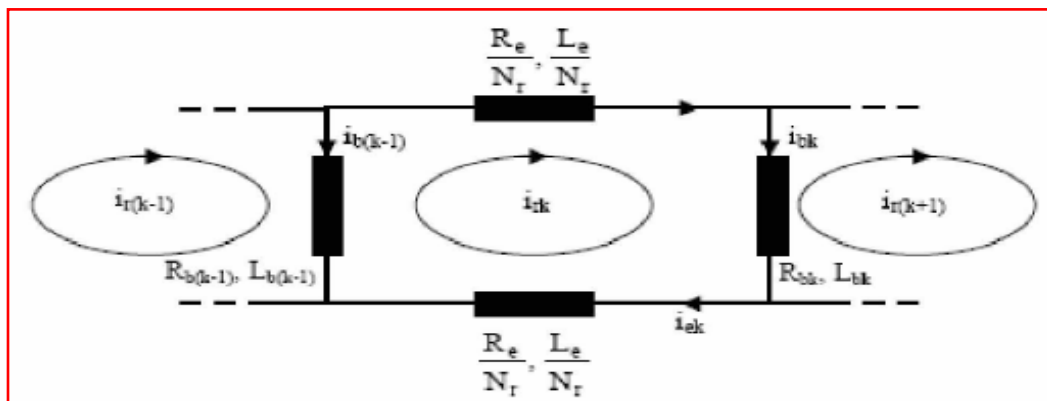


Figure (II.4) Représentation d'une maille rotorique [11]

I_{rk} Représente le courant de maille K , I_{bk} le courant de la barre K .

Pour le nœud n° 1

$$I_{bk} = I_{rk} - I_{r(k+1)} \quad (II.24)$$

Pour le nœud n° 2

$$I_{b(k-1)} = I_{r(k-1)} - I_{rk} \quad (II.25)$$

L'équation électrique relative à la maille K est :

$$0 = \frac{R_e}{N_r} I_{rk} - R_{b(k-1)} [I_{r(k-1)} - I_{rk}] + \frac{R_e}{N_r} [I_{rk} - I_e] + R_{bk} [I_{rk} - I_{r(k+1)}] + \frac{d\Phi_{rk}}{dt} \quad (II.26)$$

On remplace les formules (II.24) et (II.25) dans l'équation (II.26) ;

Donc l'équation électrique relative à la maille K devient :

$$0 = \frac{R_e}{N_r} I_{rk} - R_{b(k-1)} I_{b(k-1)} + \frac{R_e}{N_r} [I_{rk} - I_e] + R_{bk} I_{bk} + \frac{d\Phi_{rk}}{dt} \quad (II.27)$$

Le flux induit dans la maille rotorique est donné par :

$$\begin{aligned} \Phi_{rk} = & L_{rp} I_{rk} + M_{rr} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq k}}^{N_r-1} I_{rj} - \frac{3}{2} M_{sr} (I_{ds} \cos K\alpha + I_{qs} \sin K\alpha) + \frac{L_e}{N_r} (I_{rk} + I_{ek}) + L_b (-I_{b(k-1)} \\ & + I_{bk}) \end{aligned} \quad (II.28)$$

Le terme en L_{rp} représente le flux principal, celui en M_{rr} représente le flux mutuel avec les autres mailles rotoriques, puis viennent les termes de couplage avec le stator. On remarquera le facteur $\frac{3}{2}$ par rapport à l'équation statorique à cause de la transformation de Clark. Les termes en L_b et L_e représentent les fuites rotoriques.

On essaie d'écrire l'équation (II.28) uniquement en fonction des courants de maille ;

en utilisant les formules : (II.24), (II.25) et :

$$I_{rk} - I_e = I_{ek} \quad (II.29)$$

Où : I_e représente le courant de l'anneau de court circuit

Finalement, on aboutit à :

$$\begin{aligned} \Phi_{rk} = & (L_{rp} + \frac{2L_e}{N_r} + 2L_b)I_{rk} + M_{rr} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq k}}^{N_r-1} I_{rj} - L_b(I_{r(k-1)} + I_{r(k+1)}) \\ & - \frac{3}{2}M_{sr}(I_{ds} \cos k\alpha + I_{qs} \sin k\alpha) - \frac{L_e}{N_r}I_e \end{aligned} \quad (\text{II.30})$$

On calcule $\frac{d\Phi_{rk}}{dt}$

$$\begin{aligned} \frac{d\Phi_{rk}}{dt} = & (L_{rp} + \frac{2L_e}{N_r} + 2L_b) \frac{dI_{rk}}{dt} + M_{rr} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq k}}^{N_r-1} \frac{dI_{rj}}{dt} - L_b \left(\frac{dI_{r(k-1)}}{dt} + \frac{dI_{r(k+1)}}{dt} \right) \\ & - \frac{3}{2}M_{sr} \left(\frac{dI_{ds}}{dt} \cos k\alpha + \frac{dI_{qs}}{dt} \sin k\alpha \right) - \frac{L_e}{N_r} \frac{dI_e}{dt} \end{aligned} \quad (\text{II.31})$$

On remplace $\frac{d\Phi_{rk}}{dt}$ dans l'équation (II.27) puis On écrit cette équation sous la forme :-

$$[L] \frac{d}{dt} [I] = [V] - [R][I]$$

L'équation devienne :

$$\begin{aligned} & (L_{rp} + \frac{2L_e}{N_r} + 2L_b) \frac{dI_{rk}}{dt} + M_{rr} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq k}}^{N_r-1} \frac{dI_{rj}}{dt} - L_b \left(\frac{dI_{r(k-1)}}{dt} + \frac{dI_{r(k+1)}}{dt} \right) \\ & - \frac{3}{2}M_{sr} \left(\frac{dI_{ds}}{dt} \cos k\alpha + \frac{dI_{qs}}{dt} \sin k\alpha \right) - \frac{L_e}{N_r} \frac{dI_e}{dt} \\ & = - \left[\left(\frac{2R_e}{N_r} + R_{bk} + R_{b(k-1)} \right) I_{rk} - R_{b(k-1)} I_{r(k-1)} - R_{bk} I_{r(k+1)} - \frac{R_e}{N_r} I_e \right] \end{aligned} \quad (\text{II.32})$$

Si on considère que notre modèle à 16 barres (Nr = 16) on à :

Pour $k = 0$:

$$\begin{aligned}
 & (L_{rp} + \frac{2L_e}{N_r} + 2L_b) \frac{dI_{r0}}{dt} + M_{rr} \sum_{j=1}^{15} \frac{dI_{rj}}{dt} - L_b \left(\frac{dI_{r(N_r-1)}}{dt} + \frac{dI_{r1}}{dt} \right) \\
 & - \frac{3}{2} M_{sr} \left(\frac{dI_{ds}}{dt} \cos 0\alpha + \frac{dI_{qs}}{dt} \sin 0\alpha \right) - \frac{L_e}{N_r} \frac{dI_e}{dt} \\
 & = - \left[\left(\frac{2R_e}{N_r} + R_{b0} + R_{b(N_r-1)} \right) I_{r0} - R_{b(N_r-1)} I_{r(N_r-1)} - R_{b0} I_{r1} - \frac{R_e}{N_r} I_e \right] \quad (II.33)
 \end{aligned}$$

Pour $k=1$:

$$\begin{aligned}
 & (L_{rp} + \frac{2L_e}{N_r} + 2L_b) \frac{dI_{r1}}{dt} + M_{rr} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq 1}}^{15} \frac{dI_{rj}}{dt} - L_b \left(\frac{dI_{r0}}{dt} + \frac{dI_{r2}}{dt} \right) \\
 & - \frac{3}{2} M_{sr} \left(\frac{dI_{ds}}{dt} \cos 1\alpha + \frac{dI_{qs}}{dt} \sin 1\alpha \right) - \frac{L_e}{N_r} \frac{dI_e}{dt} \\
 & = - \left[\left(\frac{2R_e}{N_r} + R_{b1} + R_{b0} \right) I_{r1} - R_{b0} I_{r0} - R_{b1} I_{r2} - \frac{R_e}{N_r} I_e \right] \quad (II.34)
 \end{aligned}$$

Et de la même façon pour les autres barres :

Pour l'anneau de court circuit :

$$L_e \frac{dI_e}{dt} - \frac{L_e}{N_r} \sum_{k=0}^{N_r-1} \frac{dI_{rk}}{dt} = - \left(R_e I_e - \frac{R_e}{N_r} \sum_{k=0}^{N_r-1} I_{rk} \right) \quad (II.35)$$

Le système complet $[L] \frac{d}{dt} [I] = [V] - [R][I]$ devient :

$$\begin{bmatrix} L_{sc} & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & -M_{sr} \cos j\alpha & \dots & \dots & 0 \\ 0 & L_{sc} & \dots & \dots & \dots & \dots & -M_{sr} \sin j\alpha & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & L_{rp} + \frac{2L_e}{Nr} + 2L_b & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & M_{rr} & M_{rr} - L_b & -\frac{L_e}{Nr} & \vdots \\ \vdots & \vdots & M_{rr} - L_b & L_{rp} + \frac{2L_e}{Nr} + 2L_b & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & M_{rr} & \vdots & \vdots \\ -\frac{3}{2}M_{sr} \cos k\alpha & -\frac{3}{2}M_{sr} \sin k\alpha & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & M_{rr} & M_{rr} - L_b & L_{rp} + \frac{2L_e}{Nr} + 2L_b & -\frac{L_e}{Nr} & \vdots \\ 0 & 0 & -\frac{L_e}{Nr} & \dots & \dots & \dots & \dots & -\frac{L_e}{Nr} & L_e & \vdots \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{r0} \\ \vdots \\ I_{rj} \\ \vdots \\ I_{r(Nr-1)} \\ I_e \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_s & -WL_{sc} & \dots & \dots & M_{sr}W \sin j\alpha & \dots & \dots & 0 \\ -WL_{sc} & R_s & \dots & \dots & -M_{sr}W \cos j\alpha & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 2\frac{R_e}{Nr} + R_{b0} + R_{b(Nr-1)} & -R_{b0} & 0 & 0 & -R_{b(Nr-1)} & -\frac{R_e}{Nr} \\ 0 & 0 & 0 & -R_{b(k-1)} & 2\frac{R_e}{Nr} + R_{bk} + R_{b(k-1)} & -R_{bk} & 0 & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -R_{b(k-1)} & 2\frac{R_e}{Nr} + R_{bk} + R_{b(k-1)} & -R_{bk} & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & -R_{b(Nr-1)} & 0 & 0 & -R_{b(Nr-2)} & 2\frac{R_e}{Nr} + R_{b(Nr-2)} + R_{b(Nr-1)} & -\frac{R_e}{Nr} \\ 0 & 0 & -\frac{R_e}{Nr} & \dots & \dots & \dots & -\frac{R_e}{Nr} & R_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{r0} \\ \vdots \\ I_{rj} \\ \vdots \\ I_{r(Nr-1)} \\ I_e \end{bmatrix} \quad (II.36)$$

Le couple électromagnétique est obtenu par dérivation de co-énergie:

$$C_e = \frac{3}{2} P [I_{sdq}]^t \frac{\delta}{\delta \theta} \begin{bmatrix} \dots & -M_{sr} \cos(\theta + k\alpha) & \dots \\ \dots & -M_{sr} \cos(\theta + k\alpha) & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vdots \\ I_{rk} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (II.37)$$

$$C_e = \frac{3}{2} P M_{sr} \left\{ I_{ds} \sum_{k=0}^{Nr-1} I_{rk} \sin k\alpha - I_{qs} \sum_{k=0}^{Nr-1} I_{rk} \cos k\alpha \right\} \quad (II.38)$$

On y ajoute les équations mécaniques afin d'avoir la vitesse $\Omega = \frac{W}{P}$

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} P(C_e - C_r - \frac{f}{P} W) \quad (\text{II.39})$$

et $\frac{d\theta}{dt} = W$

Le système ci-dessus est très compliqué pour le programmer et l'exécution d'une simulation d'un tel modèle est très lente, c'est pour cela qu'on a optés pour un autre modèle, modèle dq . Pour ce faire, nous avons appliqué une transformation généralisée (Nr) qui permet de passer des Nr grandeurs équilibrées vers deux grandeurs dq . La simulation de ce modèle est très rapide.

II.5 La transformation de Nr grandeurs équilibrées vers deux grandeurs dq

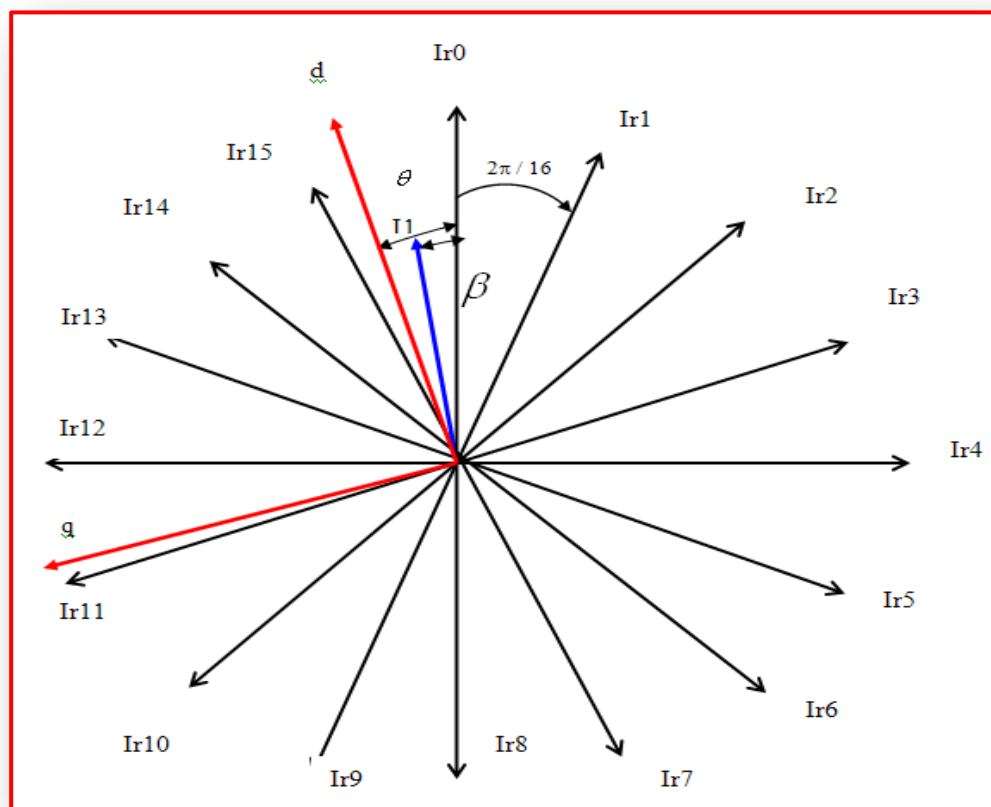


Figure II.5 Projection du modèle multi enroulement sur le modèle dq [10]

La projection de I_1 sur les axes I_{rk} donne :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{r0} = I_1 \cos \beta \\ I_{r1} = I_1 \cos\left(\beta + \frac{2\pi}{16}\right) \\ I_{r2} = I_1 \cos\left(\beta + \frac{4\pi}{16}\right) \\ \vdots \\ \vdots \\ I_{r15} = I_1 \cos\left(\beta + \frac{30\pi}{16}\right) \end{array} \right. \quad (\text{II.40})$$

Et la projection de I_1 sur les axes d et q donne :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_d = I_1 \cos(\theta - \beta) \\ I_q = -I_1 \sin(\theta - \beta) \end{array} \right. \quad (\text{II.41})$$

On à

$$\cos(\theta - \beta) = \frac{2}{16} \left[\cos \theta \cos \beta + \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{16}\right) \cos\left(\beta + \frac{2\pi}{16}\right) + \dots + \cos\left(\theta + \frac{30\pi}{16}\right) \cos\left(\beta + \frac{30\pi}{16}\right) \right] \quad (\text{II.42})$$

Et :

$$\sin(\theta - \beta) = \frac{2}{16} \left[\sin \theta \cos \beta + \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{16}\right) \cos\left(\beta + \frac{2\pi}{16}\right) + \dots + \sin\left(\theta + \frac{30\pi}{16}\right) \cos\left(\beta + \frac{30\pi}{16}\right) \right] \quad (\text{II.43})$$

A partir de l'équation (II.40) on trouve :

$$I_1 = \frac{I_{r0}}{\cos \beta} ; I_1 = \frac{I_{r1}}{\cos\left(\beta + \frac{2\pi}{16}\right)} ; I_1 = \frac{I_{r2}}{\cos\left(\beta + \frac{4\pi}{16}\right)} ; \dots ; I_1 = \frac{I_{r15}}{\cos\left(\beta + \frac{30\pi}{16}\right)}$$

On remplace les équations (II.42) et (II.43) dans l'équation (II.41) on trouve :

$$I_d = \frac{2}{16} \left[I_{r0} \cos \theta + I_{r1} \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{16} \right) + I_{r2} \cos \left(\theta + \frac{4\pi}{16} \right) + \dots + I_{r15} \cos \left(\theta + \frac{30\pi}{16} \right) \right] \quad (\text{II. 44})$$

$$I_q = \frac{2}{16} \left[I_{r0} \sin \theta + I_{r1} \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{16} \right) + I_{r2} \sin \left(\theta + \frac{4\pi}{16} \right) + \dots + I_{r15} \sin \left(\theta + \frac{30\pi}{16} \right) \right] \quad (\text{II. 45})$$

Et sous forme matricielle on trouve :

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \frac{2}{16} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{16} \right) & \cos \left(\theta + \frac{4\pi}{16} \right) & \dots & \cos \left(\theta + \frac{30\pi}{16} \right) \\ -\sin \theta & -\sin \left(\theta + \frac{2\pi}{16} \right) & -\sin \left(\theta + \frac{4\pi}{16} \right) & \dots & \sin \left(\theta + \frac{30\pi}{16} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{r0} \\ I_{r1} \\ I_{r2} \\ \vdots \\ I_{r15} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 46})$$

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} I_{r0} \\ I_{r1} \\ I_{r2} \\ \vdots \\ I_{r15} \end{bmatrix}$$

En posant $\theta = 0$, l'équation (II.46) devient :

$$[T] = \frac{2}{16} \begin{bmatrix} \cos 0 & \cos \left(\frac{2\pi}{16} \right) & \cos \left(\frac{4\pi}{16} \right) & \dots & \cos \left(\frac{30\pi}{16} \right) \\ -\sin 0 & -\sin \left(\frac{2\pi}{16} \right) & -\sin \left(\frac{4\pi}{16} \right) & \dots & \sin \left(\frac{30\pi}{16} \right) \end{bmatrix} \quad (\text{II. 47})$$

Et :

$$[T]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos 0 & -\sin 0 \\ \cos \left(\frac{2\pi}{16} \right) & -\sin \left(\frac{2\pi}{16} \right) \\ \cos \left(\frac{4\pi}{16} \right) & -\sin \left(\frac{4\pi}{16} \right) \\ \vdots & \vdots \\ \cos \left(\frac{30\pi}{16} \right) & -\sin \left(\frac{30\pi}{16} \right) \end{bmatrix} \quad (\text{II. 48})$$

II.5.1 La matrice de résistance du modèle dq équivalent

$$[R]_{eq} = T[R]T^{-1} \quad (\text{II.49})$$

$$\begin{bmatrix}
 R_s & -WL_{sc} & \dots & \dots & M_{sr} W \sin j\alpha & \dots & \dots & 0 \\
 -WL_{sc} & R_s & \dots & \dots & -M_{sr} W \cos j\alpha & \dots & \dots & 0 \\
 0 & 0 & 2\frac{R_e}{Nr} + Rb_0 + Rb_{(Nr-1)} & -Rb_0 & 0 & 0 & -Rb_{(Nr-1)} & -\frac{R_e}{Nr} \\
 0 & 0 & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 0 & 0 & 0 & -Rb_{(k-1)} & 2\frac{R_e}{Nr} + Rb_k + Rb_{(k-1)} & -Rb_{(k)} & 0 & \vdots \\
 0 & 0 & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 0 & 0 & -Rb_{(Nr-1)} & 0 & 0 & -Rb_{(Nr-2)} & 2\frac{R_e}{Nr} + Rb_{(Nr-2)} + Rb_{(Nr-1)} & -\frac{R_e}{Nr} \\
 0 & 0 & -\frac{R_e}{Nr} & \dots & \dots & \dots & -\frac{R_e}{Nr} & R_e
 \end{bmatrix} =
 \begin{bmatrix}
 R1 & R2 & R3 \\
 R4 & R5 & R6 \\
 R7 & R8 & R9
 \end{bmatrix}
 \tag{II.50}$$

➤ **Passage du modèle polyphasé au modèle biphasé :**

A fin de simplifier le calcul de la matrice ci-dessus, on la subdivise en neuf résistances équivalentes, cette subdivision nous permet de mieux comprendre, le passage du modèle de Nr grandeurs vers deux grandeurs dq .

1) pour $[R_1]$: $[R_1]_{eq} = [R_1]$

$$[R_1]_{eq} = \begin{bmatrix} R_s & -WL_{sc} \\ WL_{sc} & R_s \end{bmatrix} \tag{II.51}$$

2) pour $[R_2]$: $[R_2]_{eq} = [R_2][T]^{-1}$

$$[R_2]_{eq} = \begin{bmatrix} \dots & -M_{sr} W \sin j\alpha & \dots \\ \dots & -M_{sr} W \cos j\alpha & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos 0 & -\sin 0 \\ \cos\left(\frac{2\pi}{16}\right) & -\sin\left(\frac{2\pi}{16}\right) \\ \cos\left(\frac{4\pi}{16}\right) & -\sin\left(\frac{4\pi}{16}\right) \\ \vdots & \vdots \\ \cos\left(\frac{30\pi}{16}\right) & -\sin\left(\frac{30\pi}{16}\right) \end{bmatrix} \tag{II.52}$$

$$[R_2]_{eq} = \begin{bmatrix} \sum_{j=0}^{j=15} (-M_{sr}W \sin j\alpha)(\cos j\alpha) & \sum_{j=0}^{j=15} -M_{sr}W \sin^2 j\alpha \\ \sum_{j=0}^{j=15} -M_{sr}W \cos^2 j\alpha & \sum_{j=0}^{j=15} (-M_{sr}W \cos j\alpha)(\sin j\alpha) \end{bmatrix} \quad (II.53)$$

Avec :

$$\sum_{j=0}^{j=15} (\sin j\alpha)(\cos j\alpha) = 0 \quad (II.54)$$

$$\sum_{j=0}^{j=15} \sin^2 j\alpha = \frac{Nr}{2} \quad (II.55)$$

$$\sum_{j=0}^{j=15} \cos^2 j\alpha = \frac{Nr}{2} \quad (II.56)$$

$$\sum_{j=0}^{j=15} (\cos j\alpha)(\sin j\alpha) = 0 \quad (II.57)$$

On remplace les formules (II.54), (II.55), (II.56) et (II.57) dans la matrice (II.54) on aboutit à :

$$[R_2]_{eq} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{Nr}{2} WM_{sr} \\ -\frac{Nr}{2} WM_{sr} & 0 \end{bmatrix} \quad (II.58)$$

3) pour $[R_3]$: $[R_3]_{eq} = [R_3]$

$$[R_3]_{eq} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (II.59)$$

4) pour $[R_4]$: $[R_4]_{eq} = [R_4][T]$

$$[R_4]_{eq} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{2}{16} \begin{bmatrix} \cos 0 & \cos\left(\frac{2\pi}{16}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{16}\right) & \dots & \cos\left(\frac{30\pi}{16}\right) \\ -\sin 0 & -\sin\left(\frac{2\pi}{16}\right) & -\sin\left(\frac{4\pi}{16}\right) & \dots & \sin\left(\frac{30\pi}{16}\right) \end{bmatrix} \quad (II.60)$$

$$[R_4]_{eq} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (II.61)$$

5) pour $[R_5]$: $[R_5]_{eq} = [T][R_5][T]^{-1}$

On multiplie les trois matrices suivantes:

$$[R5]_{eq} = \frac{2}{16} \begin{bmatrix} \cos 0 & \cos\left(\frac{2\pi}{16}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{16}\right) & \dots & \cos\left(\frac{30\pi}{16}\right) \\ -\sin 0 & -\sin\left(\frac{2\pi}{16}\right) & -\sin\left(\frac{4\pi}{16}\right) & \dots & -\sin\left(\frac{30\pi}{16}\right) \end{bmatrix} *$$

$$\begin{bmatrix} 2\frac{Re}{Nr} + Rb_0 + Rb_{(Nr-1)} & -Rb_0 & 0 & 0 & -Rb_{(Nr-1)} \\ 0 & -Rb_{(k-1)} & 2\frac{Re}{Nr} + Rb_k + Rb_{(k-1)} & -Rb_k & 0 \\ -Rb_{(Nr-1)} & 0 & 0 & -Rb_{(Nr-2)} & 2\frac{Re}{Nr} + Rb_{(Nr-2)} + Rb_{(Nr-1)} \end{bmatrix} *$$

$$\begin{bmatrix} \cos 0 & -\sin 0 \\ \cos\left(\frac{2\pi}{16}\right) & -\sin\left(\frac{2\pi}{16}\right) \\ \cos\left(\frac{4\pi}{16}\right) & -\sin\left(\frac{4\pi}{16}\right) \\ \vdots & \vdots \\ \cos\left(\frac{30\pi}{16}\right) & -\sin\left(\frac{30\pi}{16}\right) \end{bmatrix} \tag{II.62}$$

Donc on trouve :

$$[R5]_{eq} = \begin{bmatrix} R_{r1} & R_{r2} \\ R_{r3} & R_{r4} \end{bmatrix} \tag{II.63}$$

On calcule les différentes sous matrices (R_{r1} , R_{r2} , R_{r3} , R_{r4});

$$R_{r1} = \frac{2}{16} \left[\left(2\frac{Re}{Nr} + Rb_0 + Rb_{15} \right) \cos^2 0\alpha + \left(2\frac{Re}{Nr} + Rb_1 + Rb_0 \right) \cos^2 1\alpha + \dots + \left(2\frac{Re}{Nr} + Rb_{14} + Rb_{15} \right) \cos^2 15\alpha \right]$$

$$- \frac{4}{16} \left[(Rb_0 \cos 0\alpha \cos 1\alpha) + (Rb_1 \cos 1\alpha \cos 2\alpha) + \dots + (Rb_{15} \cos 15\alpha \cos 0\alpha) \right] \tag{II.64}$$

$$R_{r2} = -\frac{2}{16} \left[\left(2\frac{Re}{Nr} + Rb_0 + Rb_{15} \right) \cos 0\alpha \sin 0\alpha - \left(2\frac{Re}{Nr} + Rb_1 + Rb_0 \right) \cos 1\alpha \sin 1\alpha - \dots - \left(2\frac{Re}{Nr} + Rb_{14} + Rb_{15} \right) \cos 15\alpha \sin 15\alpha \right]$$

$$+ \frac{2}{16} \left[(Rb_0 \sin 0\alpha \cos 1\alpha) + (Rb_1 \sin 1\alpha \cos 2\alpha) + \dots + (Rb_{15} \sin 15\alpha \cos 0\alpha) \right]$$

$$\frac{2}{16} \left[(Rb_0 \cos 0\alpha \sin 1\alpha) + (Rb_1 \cos 1\alpha \sin 2\alpha) + \dots + (Rb_{15} \cos 15\alpha \sin 0\alpha) \right] \tag{II.65}$$

$$\begin{aligned}
 R_{r3} = & -\frac{2}{16} \left[\left(2 \frac{Re}{Nr} + R_{b0} + R_{b15} \right) \cos 0\alpha \sin 0\alpha - \left(2 \frac{Re}{Nr} + R_{b1} + R_{b0} \right) \cos 1\alpha \sin 1\alpha - \dots - \left(2 \frac{Re}{Nr} + R_{b14} + R_{b15} \right) \cos 15\alpha \sin 15\alpha \right] \\
 & + \frac{2}{16} \left[(R_{b0} \sin 0\alpha \cos 1\alpha) + (R_{b1} \sin 1\alpha \cos 2\alpha) + \dots + (R_{b15} \sin 15\alpha \cos 0\alpha) \right] \\
 & + \frac{2}{16} \left[(R_{b0} \cos 0\alpha \sin 1\alpha) + (R_{b1} \cos 1\alpha \sin 2\alpha) + \dots + (R_{b15} \cos 15\alpha \sin 0\alpha) \right] \tag{II. 66}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_{r4} = & \frac{2}{16} \left[\left(2 \frac{Re}{Nr} + R_{b0} + R_{b15} \right) \cos^2 0\alpha + \left(2 \frac{Re}{Nr} + R_{b1} + R_{b0} \right) \cos^2 1\alpha + \dots + \left(2 \frac{Re}{Nr} + R_{b14} + R_{b15} \right) \cos^2 15\alpha \right] \\
 & - \frac{4}{16} \left[(R_{b0} \cos 0\alpha \cos 1\alpha) + (R_{b1} \cos 1\alpha \cos 2\alpha) + \dots + (R_{b15} \cos 15\alpha \cos 0\alpha) \right] \tag{II. 67}
 \end{aligned}$$

Si on considère que toutes les barres sont saines ($R_{b0} = R_{b1} = \dots = R_{b15}$) les sous matrices

R_{r1} , R_{r2} , R_{r3} et R_{r4} Deviennent :

$$R_{r1} = R_{r4} = 2 \frac{R_e}{N_r} + 2R_b (1 - \cos \alpha) \tag{II. 68}$$

$$R_{r2} = R_{r3} = 0 \tag{II. 69}$$

En posant :

$$R_r = 2 \frac{R_e}{N_r} + 2R_b (1 - \cos \alpha) \tag{II. 70}$$

6) Pour $[R_6]$: $[R_6]_{eq} = [T][R_6]$

$$[R_6]_{eq} = \frac{2}{N_r} \begin{bmatrix} \dots & \cos j\alpha & \dots \\ \dots & -\sin j\alpha & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\frac{R_e}{N_r} \\ \vdots \\ \frac{R_e}{N_r} \end{bmatrix} \tag{II. 71}$$

$$[R_6]_{eq} = \frac{2}{N_r} \begin{bmatrix} -\frac{Re}{Nr} \sum_{j=0}^{Nr} \cos j\alpha \\ \frac{Re}{Nr} \sum_{j=0}^{Nr} \sin j\alpha \end{bmatrix} \tag{II. 72}$$

Avec :

$$\sum_{j=0}^{15} \cos j\alpha = 0 \quad (\text{II.73})$$

$$\sum_{j=0}^{15} \sin j\alpha = 0 \quad (\text{II.74})$$

On remplace les formules (II.72) et (II.73) Dans la formule (II.71) on aboutit à :

$$[R_6]_{eq} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.75})$$

7) Pour $[R_7]$: $[R_7] = [R_7]_{eq}$

$$[R_7]_{eq} = [0 \quad 0] \quad (\text{II.76})$$

8) Pour $[R_8]$: $[R_8]_{eq} = [R_8][T]^{-1}$

$$[R_8]_{eq} = \begin{bmatrix} -\frac{R_e}{N_r} & \dots & \dots & -\frac{R_e}{N_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vdots & \vdots \\ \cos j\alpha & -\sin j\alpha \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (\text{II.77})$$

$$[R_8]_{eq} = \begin{bmatrix} -\frac{Re}{Nr} \sum_{j=0}^{Nr-1} \cos j\alpha & \frac{Re}{Nr} \sum_{j=0}^{Nr-1} \sin j\alpha \end{bmatrix} \quad (\text{II.78})$$

On remplace la formule (II.72) et (II.73) Dans la formule (II.77) on aboutit à :

$$[R_8]_{eq} = [0 \quad 0] \quad (\text{II.79})$$

9) Pour $[R_9]$: $[R_9]_{eq} = [R_9]$

$$[R_9]_{eq} = [R_e] \quad (\text{II.80})$$

Finalement :

La nouvelle matrice de résistance du modèle dq équivalent, en considérant que toutes les barres sont saines est :

$$[R_{e q}] = \begin{bmatrix} R_s & -WL_{sc} & 0 & -\frac{Nr}{2}WM_{sr} & 0 \\ WL_{sc} & R_s & -\frac{Nr}{2}WM_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Re \end{bmatrix} \quad (II.81)$$

Avec :

$$R_r = 2\frac{R_e}{N_r} + 2R_b(1 - \cos \alpha)$$

II.5.2 La matrice d'inductance du modèle dq équivalent

$$[L]_{eq} = T[L]T^{-1} \quad (II.82)$$

$$\begin{bmatrix} L_{sc} & 0 & \dots & \dots & \dots & -M_{sr} \cos j\alpha & \dots & \dots & 0 \\ 0 & L_{sc} & \dots & \dots & \dots & -M_{sr} \sin j\alpha & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & L_{rp} + \frac{2L_e}{Nr} + 2L_b & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & M_{rr} & M_{rr} - L_b & -\frac{L_e}{Nr} \\ \vdots & \vdots & M_{rr} - L_b & L_{rp} + \frac{2L_e}{Nr} + 2L_b & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & M_{rr} & \vdots \\ -\frac{3}{2}M_{sr} \cos k\alpha & -\frac{3}{2}M_{sr} \sin k\alpha & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & M_{rr} & M_{rr} - L_b & L_{rp} + \frac{2L_e}{Nr} + 2L_b & -\frac{L_e}{Nr} \\ 0 & 0 & -\frac{L_e}{Nr} & \dots & \dots & \dots & \dots & -\frac{L_e}{Nr} & L_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L1 & L2 & L3 \\ L4 & L5 & L6 \\ L7 & L8 & L9 \end{bmatrix} \quad (II.83)$$

➤ **Passage du modèle polyphasé au modèle biphasé :**

De la même manière que pour $[R]$ il résulte :

$$[L_1]_{eq} = \begin{bmatrix} L_{rc} & 0 \\ 0 & L_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.84})$$

$$[L_2]_{eq} = \begin{bmatrix} -\frac{N_r}{2} M_{sr} & 0 \\ 0 & \frac{N_r}{2} M_{sr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.85})$$

$$[L_3]_{eq} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.86})$$

$$[L_4]_{eq} = \begin{bmatrix} -\frac{3}{2} M_{sr} & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} M_{sr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.87})$$

$$[L_5]_{eq} = \begin{bmatrix} L_{rc} & 0 \\ 0 & L_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.88})$$

$$[L_6]_{eq} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.89})$$

$$[L_7]_{eq} = [0 \quad 0] \quad (\text{II.90})$$

$$[L_8]_{eq} = [0 \quad 0] \quad (\text{II.91})$$

$$[L_9]_{eq} = [L_e] \quad (\text{II.92})$$

Finalement ; La nouvelle matrice d'inductance du modèle dq équivalent, en considérant que toutes les barres sont saines est :

$$[L_{sq}] = \begin{bmatrix} L_{sc} & 0 & -\frac{N_r}{2} M_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & L_{sc} & 0 & \frac{N_r}{2} M_{sr} & 0 \\ -\frac{3}{2} M_{sr} & 0 & L_{rc} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} M_{sr} & 0 & L_{rc} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_e \end{bmatrix} \quad (\text{II.93})$$

Avec :

$$L_{rc} = L_{rp} - M_{rr} + 2 \frac{L_e}{N_r} + 2L_b(1 - \cos\theta)$$

Donc le système complet en considérant que toutes les barres sont saines est :

$$\begin{bmatrix} L_{sc} & 0 & -\frac{N_r}{2}M_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & L_{sc} & 0 & \frac{N_r}{2}M_{sr} & 0 \\ -\frac{3}{2}M_{sr} & 0 & L_{rc} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}M_{sr} & 0 & L_{rc} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_e \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \\ I_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} -$$

$$\begin{bmatrix} R_s & -WL_{sc} & 0 & -\frac{N_r}{2}WM_{sr} & 0 \\ WL_{sc} & R_s & -\frac{N_r}{2}WM_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \\ I_e \end{bmatrix} \quad (II.94)$$

II.6 Simulations et interprétations des résultats

Nous utilisons le modèle représenté par les équations (II.94), (II.38), (II.39) et (II.31). Notre machine est alimentée par une source de tension sinusoïdale et caractérisée par les paramètres donnés dans l'annexe [A2]. Les tensions d'alimentation sont supposées parfaitement sinusoïdales d'amplitude constante, elles peuvent être présentées comme suit :

$$\begin{cases} V_{sa} = \sqrt{2}V_{eff} \sin(\omega t) \\ V_{sb} = \sqrt{2}V_{eff} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_{sc} = \sqrt{2}V_{eff} \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (II.95)$$

II.6.1 Simulation

La simulation de la machine asynchrone à cage d'écureuil est obtenue à l'aide de logiciel SIMULINK sous MATLAB.

Le schéma bloc de simulation de la modélisation de la MAS à cage d'écureuil est représenté par la figure (II.6)

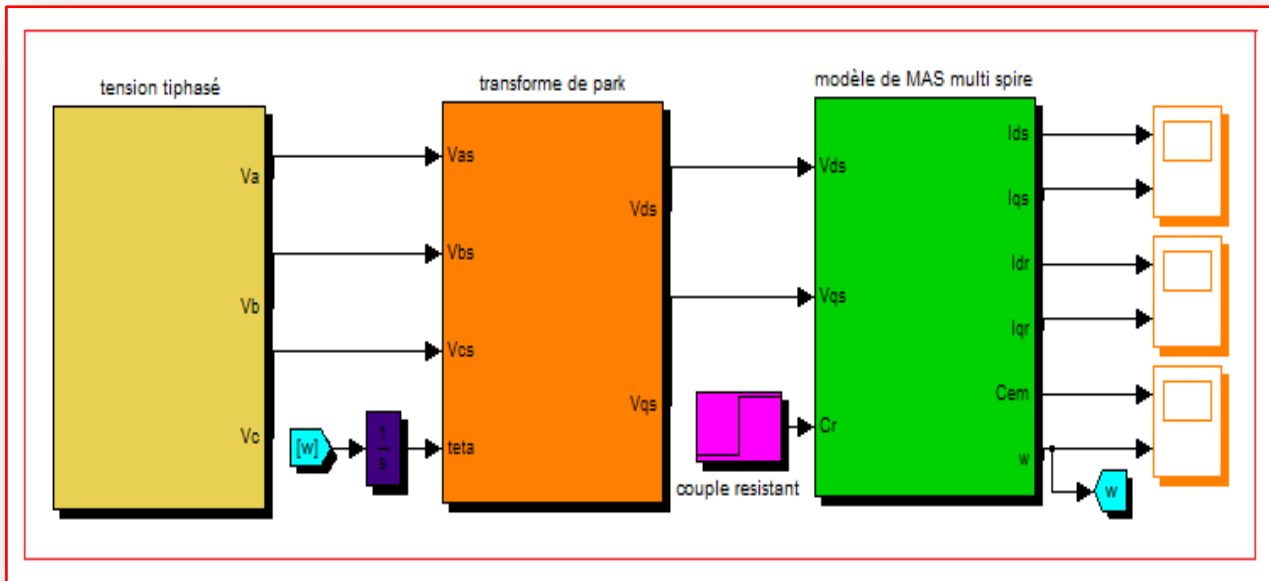


Figure II.6 Schéma bloc de simulation du modèle de la MAS à cage d'écureuil

II.6.1.1 Résultats de la simulation

II.6.1.1.1 Cas d'une machine saine

Les figures (II.7.a) à (II.7.l) ci-après montrent respectivement, l'évolution dans le domaine temporelle des grandeurs électromagnétiques (couple et vitesse), des grandeurs électriques (les courants des phases statoriques i_{as} et i_{bs} , les courants des barres rotoriques 1 et 2, les courants i_{dr} , i_{qr} , i_{ds} et i_{qs}). Les résultats sont obtenus par une simulation du modèle global de la machine à l'état sain avec application d'un couple de charge de 4Nm à partir de $t=1$ s.

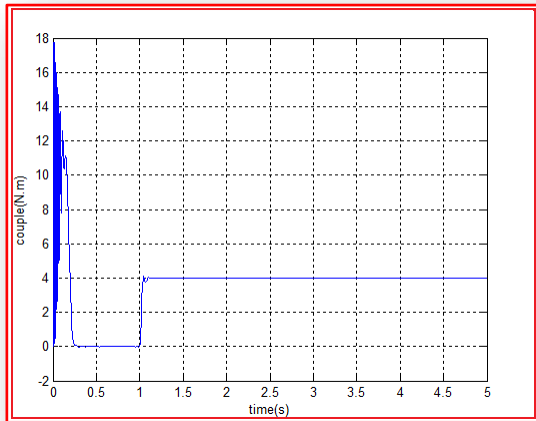


Figure (II.7.a) Le couple électromagnétique

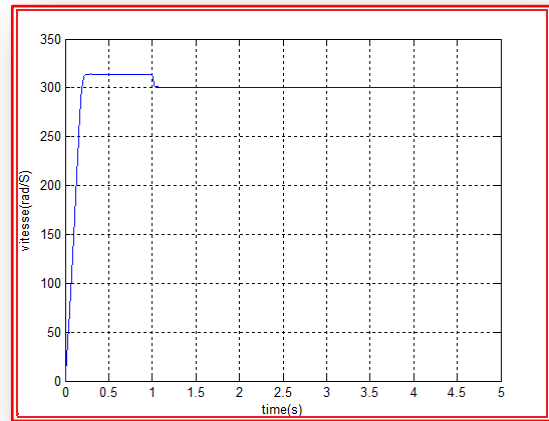


Figure (II.7.b) La vitesse

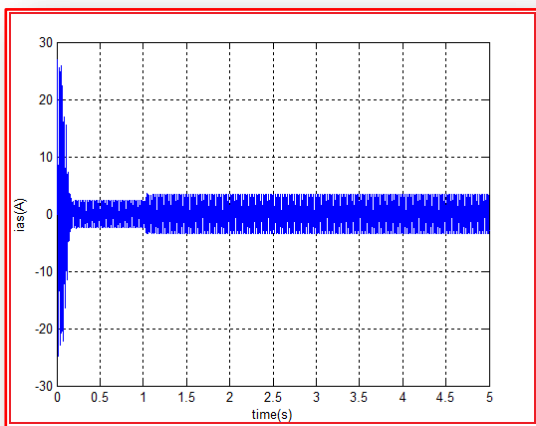


Figure (II.7.c) Courant statorique ias

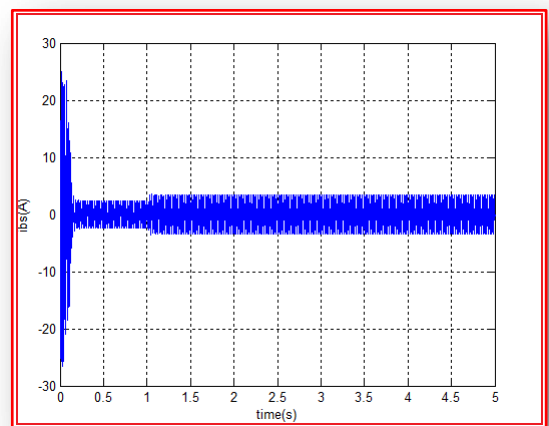
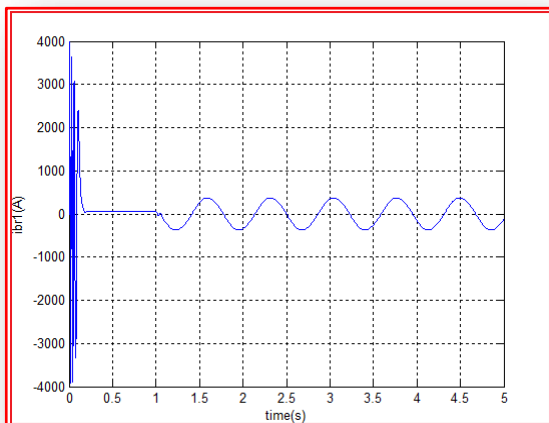


Figure (II.7.d) Courant statorique ibs



Figure(II.7.e) Courant de la barre 1

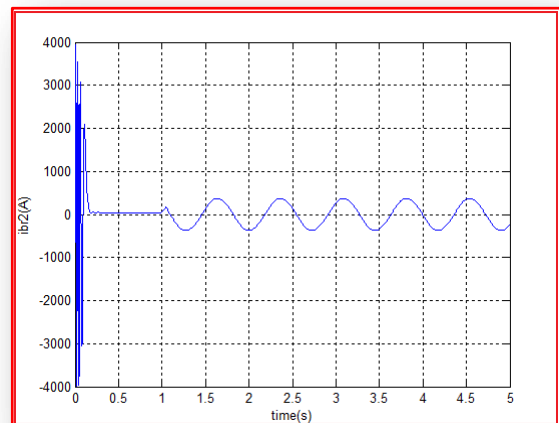


Figure (II.7.f) Courant de la barre 2

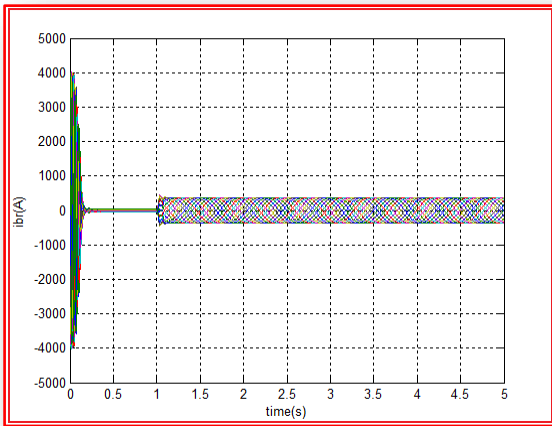


Figure (II.7.g) Courants des barres rotoriques

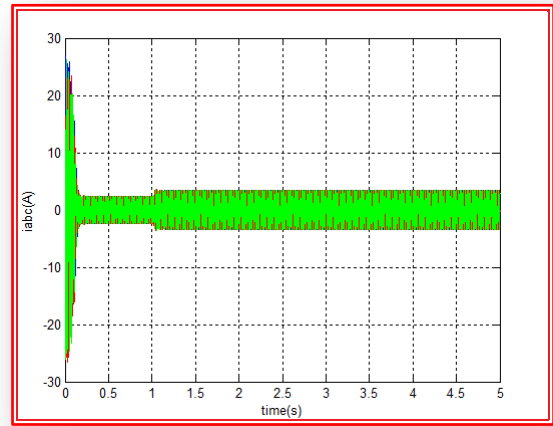


Figure (II.7.h) Courants statoriques

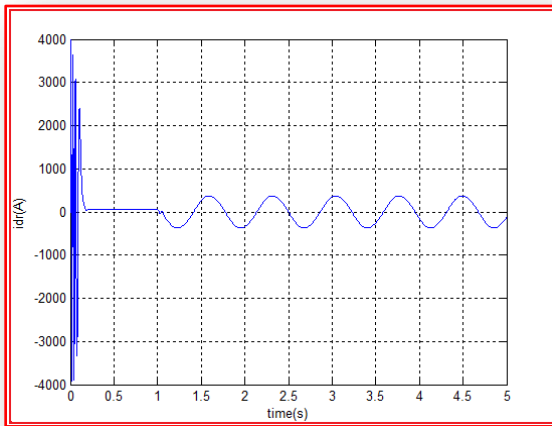


Figure (II.7.i) Courant idr

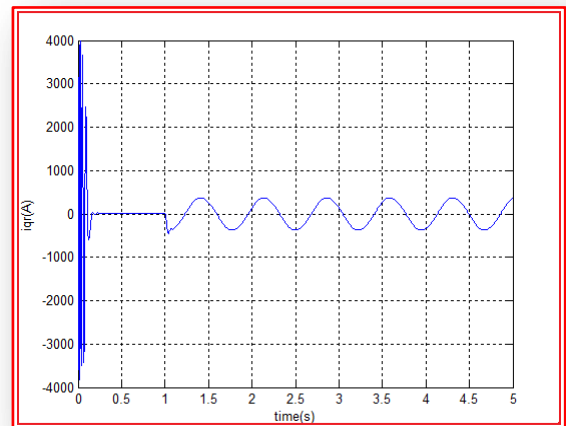


Figure (II.7.j) Courant iqr

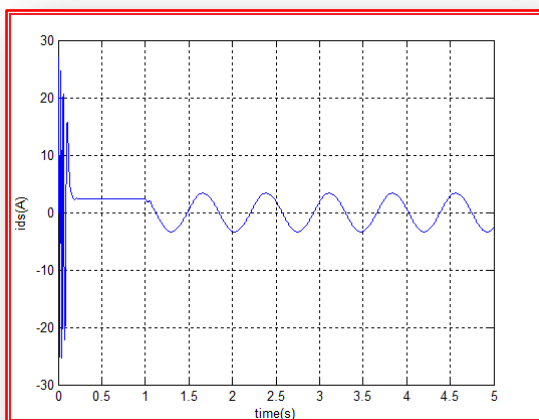


Figure (II.7.k) Courant ids

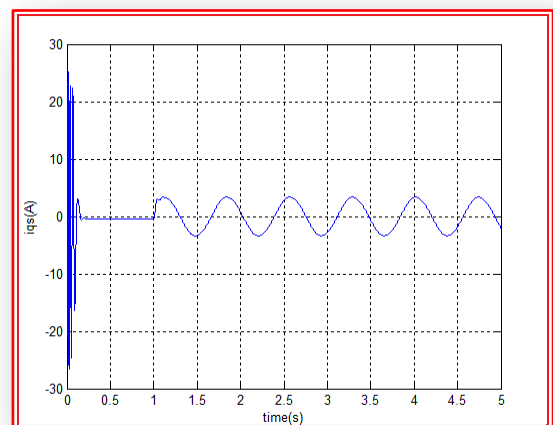


Figure (II.7.l) Courant iqs

❖ **Interprétation des résultats**

D’après les résultats de simulations présentés ci-dessus on constate qu’à l’instant $t=1s$ où nous appliquons un échelon de couple résistant $C_r=4N.m$, les courants des barres rotoriques sont très importants. Les figures (II.7. a ,b ,c ,d ,e ,f ,g ,h ,i ,j ,k ,l) montrent l’évolution temporelle du couple électromagnétique, de la vitesse et du courant statorique et rotorique. Les formes des graphes montrent qu’en phase de démarrage le moteur subit un allongement du régime transitoire. A titre d’exemple, nous prenons la courbe du couple électromagnétique. Cette dernière comprend au début une série d’oscillations d’amplitude élevées qui s’amortissent au cours de l’accélération du moteur, à la fin du régime de démarrage (0.2s, figure II.7.a). Le couple atteint sa valeur maximale, puis s’atténue pour atteindre la valeur du couple résistant.

II.6.1.1.2 Cas d’une machine avec défaut rotorique

Le modèle démontré précédemment et qui permet de simuler la rupture des barres au rotor est présenté sous une forme plus concise ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} L_{sc} & 0 & -\frac{Nr}{2}M_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & L_{sc} & 0 & \frac{Nr}{2}M_{sr} & 0 \\ -\frac{3}{2}M_{sr} & 0 & L_{rc} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}M_{sr} & 0 & L_{rc} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_e \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} Ids \\ Iqs \\ Idr \\ Iqr \\ Ie \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Vds \\ Vqs \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_s & -WL_{sc} & 0 & -\frac{Nr}{2}WM_{sr} & 0 \\ WL_{sc} & R_s & -\frac{Nr}{2}WM_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Rr1 & Rr2 & 0 \\ 0 & 0 & Rr3 & Rr4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Re \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ids \\ Iqs \\ Idr \\ Iqr \\ Ie \end{bmatrix} \tag{II.96}$$

Avec $Rr1, Rr2, Rr3$ et $Rr4$ résistances qui tiennent compte de la cassure de barres sont calculées précédemment.

II.6.1.1.2.1 Cassure d’une barre

A partir de $t=1s$, on va appliquer une charge de 4 Nm, et à $t=2s$ on simule la rupture de la barre 1, on va augmenter la résistance de la barre à $12 \cdot R_b$

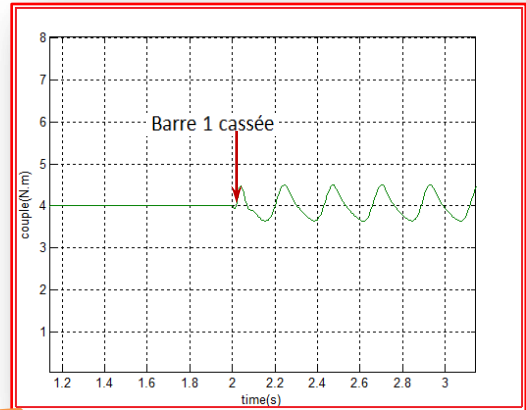
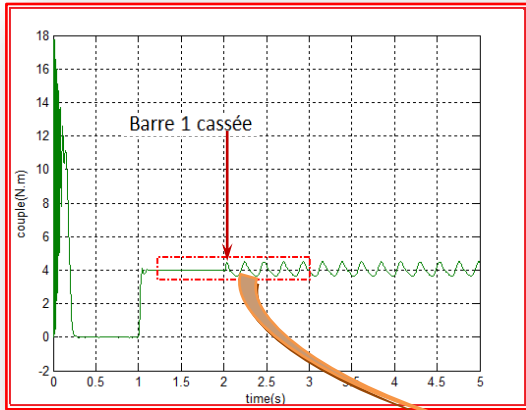


Figure (II.8.a) Le couple électromagnétique

Zoom sur le couple électromagnétique

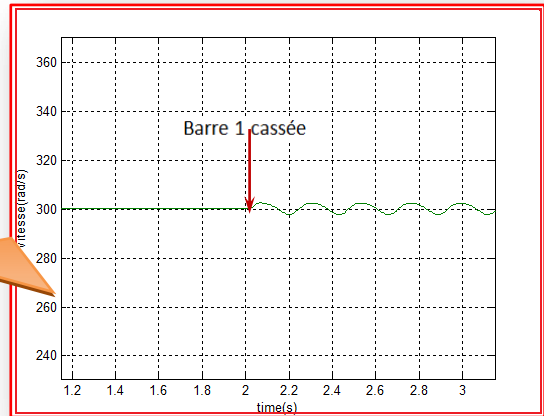
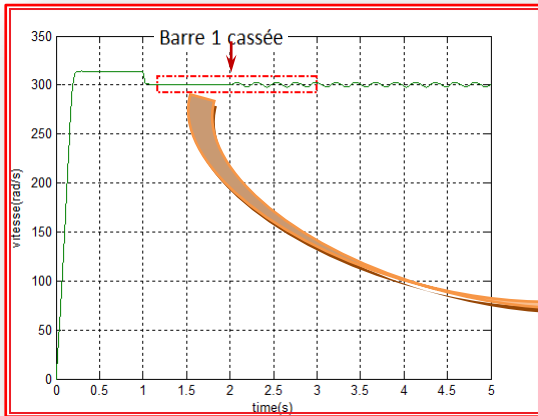


Figure (II.8.b) La vitesse

Zoom sur la vitesse

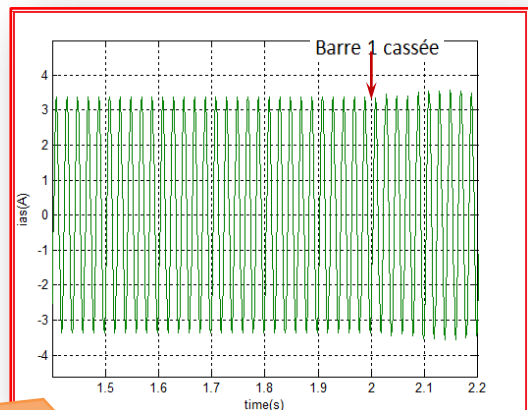
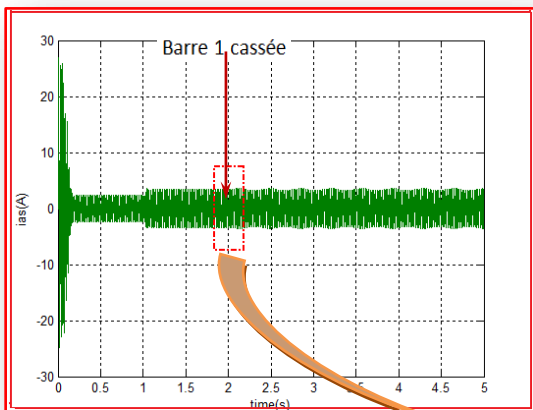


Figure (II.8.c) Courant statorique ias

Zoom sur le courant ias

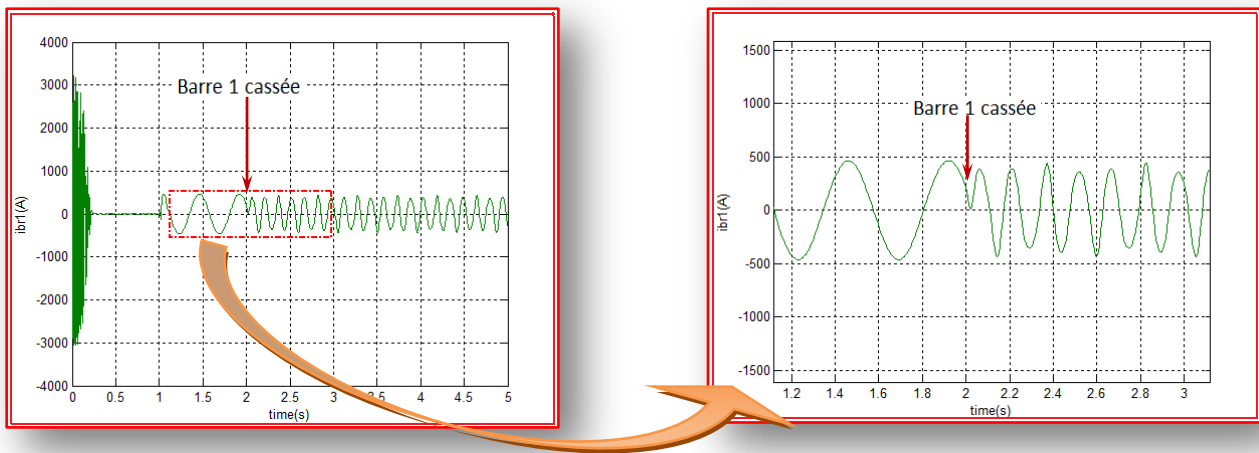


Figure (II.8.d) Courant de la barre 1

Zoom sur le courant de la barre 1

❖ *Interprétation des résultats*

- On remarque dans la figure du couple électromagnétique (II.8.a) une augmentation de l'amplitude des ondulations après la rupture de la barre 1.
- La figure (II.8.b) représente l'allure de la vitesse de rotation après la rupture de la barre 1. On remarque des oscillations après la rupture de la barre 1.
- La figure (II.8.c) permet de vérifier la modulation de l'enveloppe du courant statorique i_{as} après la rupture d'une barre (1). On note également l'augmentation de l'amplitude de modulation.
- La figure (II.8.d) montre le courant des barre cassée on constate que l'amplitude du courant diminue juste après la cassure de la barre.

II.6.1.1.2.2 *Cassure de deux barres*

Dans la simulation suivante, on va supposer deux défauts successifs : rupture de deux barres (barre1, barre2) :

- ✓ Rupture de la barre 1 à $t=2s$.
- ✓ Rupture de la barre 2 à $t=3,5s$.

La machine était initialement saine et dans le temps $t=1s$ chargée par $C_r=4\text{ N.m}$

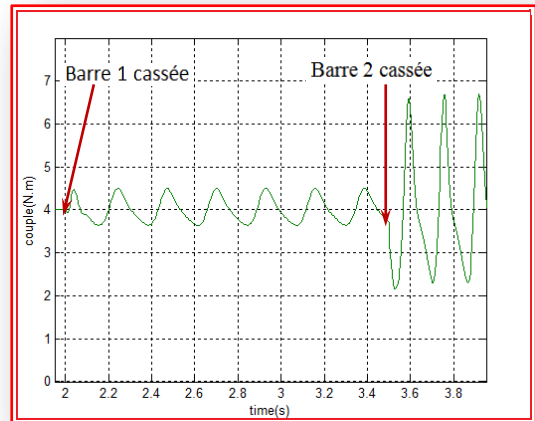
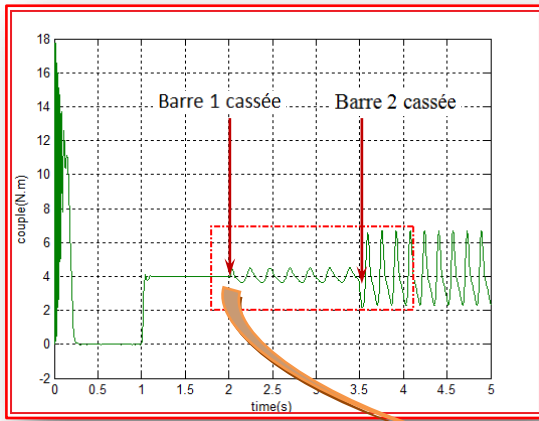


Figure (II.9.a) Le couple électromagnétique

Zoom sur le couple électromagnétique

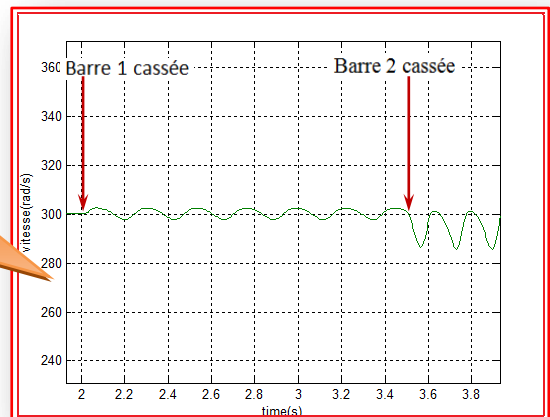
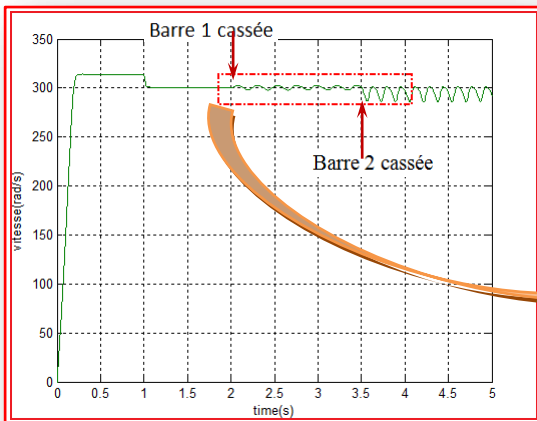


Figure (II.9.b) : La vitesse

Zoom sur la vite

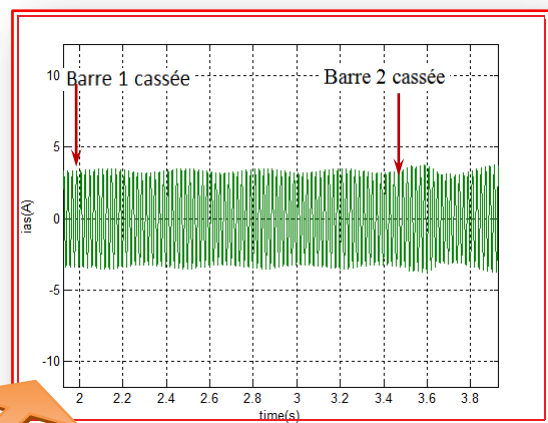
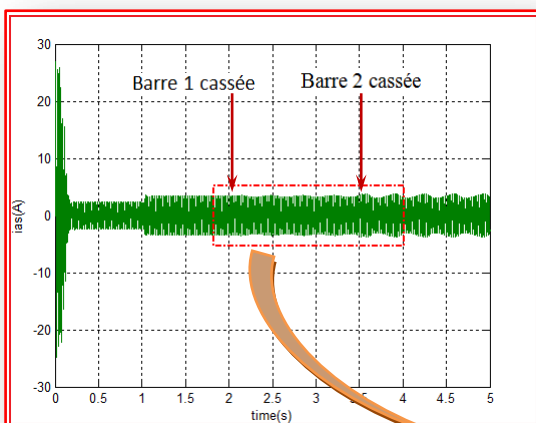


Figure (II.9.c) : Courant statorique ias

Zoom sur le courant ias

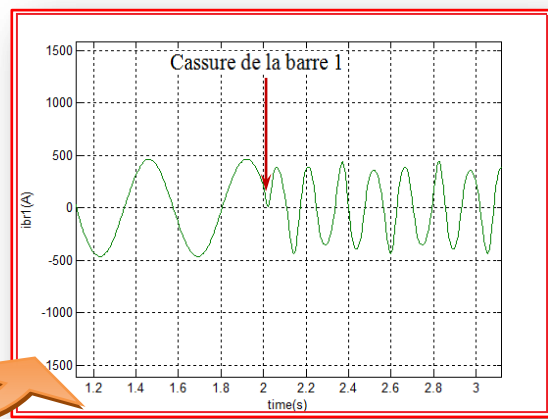
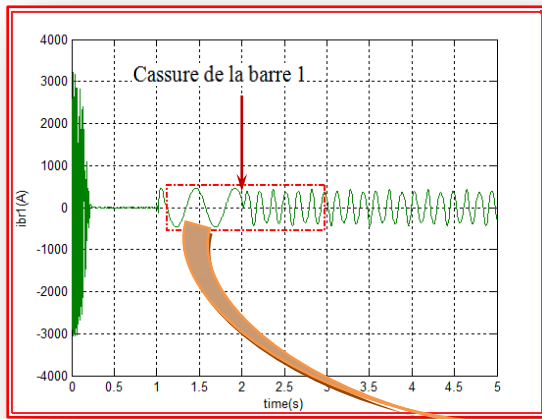


Figure (II.9.d) Courant de la barre 1

Zoom sur le courant de barre 1

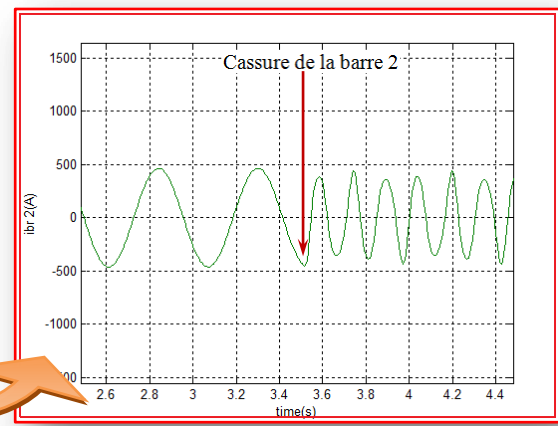
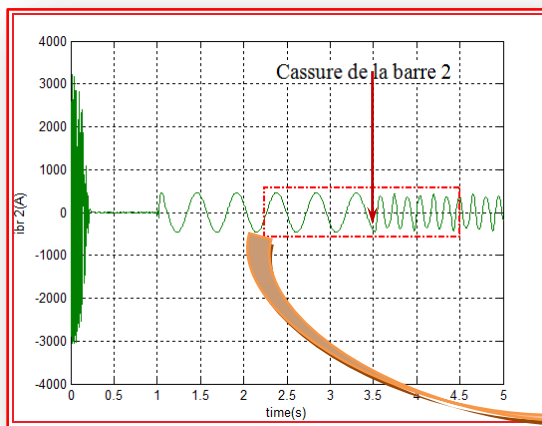


Figure (II.9.e) Courant de la barre 2

Zoom sur le courant de barre 2

❖ *Interprétation des résultats*

- On remarque dans la figure du couple électromagnétique (II.9.d) une augmentation de l'amplitude des ondulations après la rupture de la barre 1, et des ondulations plus grandes que les premières après la rupture de la barre 2.
- La figure (II.9.b) représente l'allure de la vitesse de rotation après la rupture de la barre 1, puis la rupture de la barre 2. On remarque des oscillations après la rupture de la barre 1 et la rupture de la barre 2, par conséquent la valeur moyenne de la vitesse est diminuée.
- La figure (II.9.c) permet de vérifier la modulation de l'enveloppe du courant statorique i_{as} après la rupture d'une barre puis de deux barres (barre1 et barre2). On note également l'augmentation de l'amplitude de modulation quand une deuxième barre est cassée.
- Les deux figures (II.9.d) et (II.9.e) montrent le courant de barre cassée on constate que l'amplitude du courant de barre 1 et 2 diminue juste après la cassure de la barre.

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté de façon analytique, le modèle multi-enroulement d'une machine asynchrone à cage d'écureuil, en considérant que le rotor est constitué de plusieurs résistances séparées, et chaque résistance représente une barre de la cage, ou le rotor est constitué de plusieurs éléments, chaque élément est décrit par un circuit électrique équivalent de N_r grandeurs. Puis, on a fait la transformation de N_r grandeurs vers deux grandeurs, pour faciliter l'étude.

Ce modèle nous a permis de simuler les défauts rotoriques, tels que les cassures de barres rotoriques, ce type de défaut est modélisé par l'augmentation de la résistance de l'élément défectueux. Les résultats obtenus permettent de conclure, que la cassure d'une barre provoque des oscillations dans le couple et dans la vitesse, ainsi qu'une modulation de l'enveloppe du courant statorique. L'amplitude de ces oscillations augmente avec le nombre de barres cassées. On voit bien que l'amplitude du couple, la vitesse de rotation et le courant statorique dans le cas de cassure de deux barres est plus grand par rapport à une barre.

D'après cette étude on conclut que l'exploitation directe des résultats est très difficile pour détecter et identifier un défaut, et tout particulièrement quand il s'agit de cassure d'une seule barre, seules les méthodes de diagnostic nous permettent la résolution de ce problème. Ceci fait l'objet des deux chapitres suivants.

III.1 Introduction

Afin de mieux situer notre travail et quand un défaut apparaît dans un processus, il a été nécessaire de regarder quelles sont les différentes méthodes de diagnostic actuellement utilisées pour détecter la présence d'une anomalie au sein d'une machine asynchrone. Comme les chercheurs de part, le monde travaillent sur ce sujet depuis un certain nombre d'années, beaucoup de travaux ont vu le jour. L'analyse du courant statorique (M_{otor} C_{urrent} $S_{ignature}$ $A_{nalysis}$) 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.

Dans ce chapitre nous allons faire une présentation sommaire des différentes techniques de détection des défauts. Elles ont été classées en deux catégories :

- Première catégorie (diagnostic externe) : effectuent l'analyse des signaux d'acquisitions
- Deuxième catégorie (diagnostic interne) : nécessitent la formulation d'un modèle mathématique du système.

Le graphe suivant présente les différentes méthodes de diagnostic

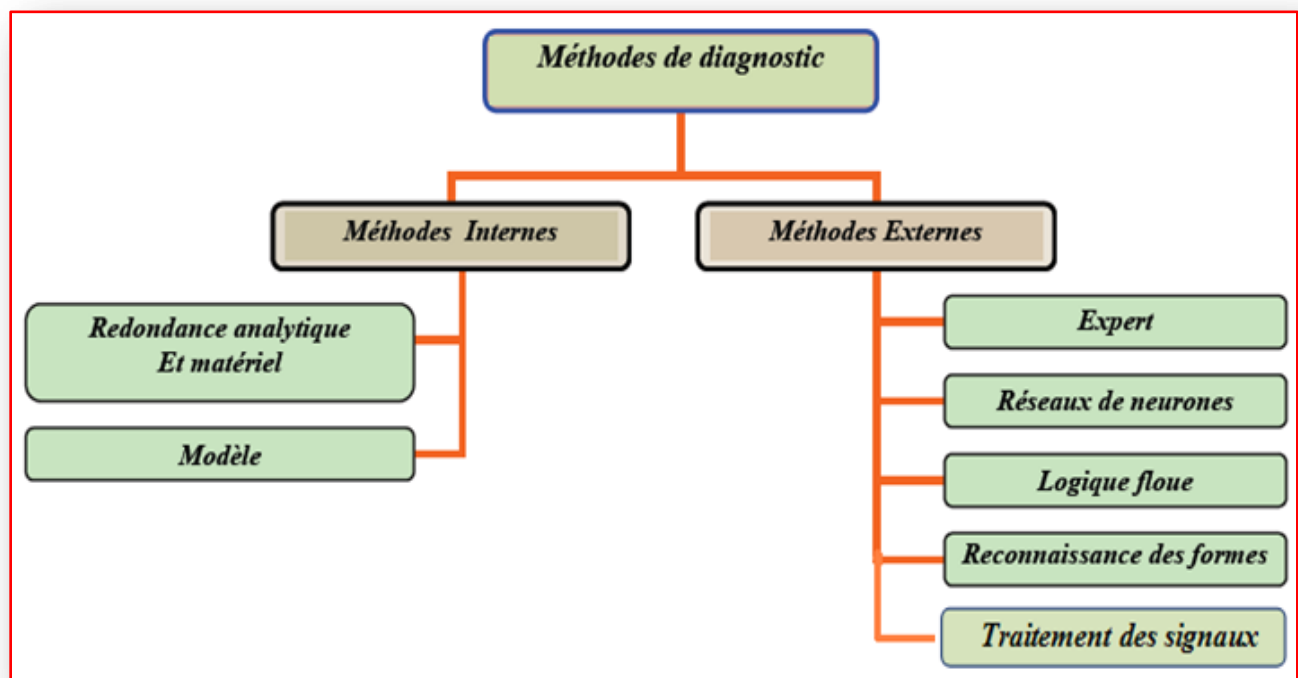


Figure III.1 Synoptique de classement des méthodes de diagnostic

III.2 Méthodes internes

Ces méthodes de détection reposent sur une connaissance à priori du système. Elles s'appuient sur la connaissance des paramètres caractéristiques du système étudié ou de variables représentatives développées à partir des acquisitions. Une comparaison entre les paramètres identifiés à un état de fonctionnement normal (sain) et ceux identifiés à un état de fonctionnement anormal nous alerte sur la présence de défaut. L'utilisation de ces méthodes nécessite la connaissance au préalable des variations de ces paramètres dans les conditions de fonctionnement normales et lors de la présence de défaut [13].

Cette méthode de diagnostic se regroupe en deux grandes familles :

III.2.1 Méthodes de redondance analytique et matérielle

La redondance analytique se base sur la connaissance d'un modèle mathématique du système à surveiller, ce modèle placé dans les mêmes conditions que le système est calculé en temps réel, fournit les relations de redondances nécessaires à la comparaison du procédé avec le modèle.

D'un côté, il existe une méthode par la redondance matérielle qui consiste à doubler ou à tripler l'équipement et plusieurs actionneurs plusieurs capteurs et plusieurs systèmes de commande. L'utilisation de cette méthode est essentiellement réservée aux cas où la continuité de service est obligatoire (avionique). En effet, elle apporte l'avantage une fois la défaillance détectée, d'utiliser la partie de l'équipement encore saine –c'est une méthode chère et complexe.

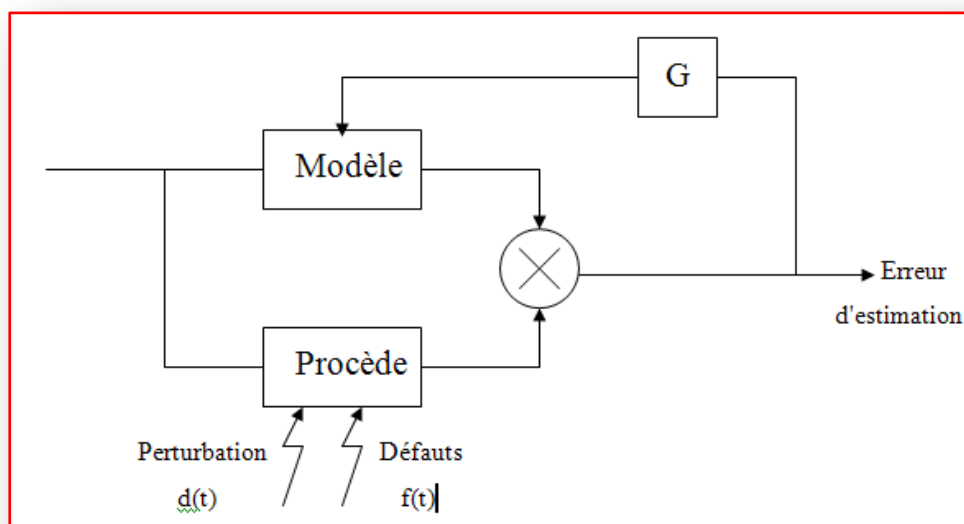


Figure III.2 Principe de fonctionnement de la méthode de redondance analytique [12]

III.2.2 Méthodes du modèle

La méthode du diagnostic basée sur le modèle consiste à comparer les grandeurs déduites d'un modèle représentatif du fonctionnement des différentes entités du processus avec les mesures directement observées sur le processus industriel. Les méthodes proposées, dans ce contexte, peuvent être regroupées en trois catégories:

- Techniques d'identification.
- Techniques d'estimation d'état
- Techniques des résidus.

III.2.2.1 Techniques d'identification

L'identification est la détermination, à partir de la connaissance des signaux d'entrées et de sorties d'un modèle mathématique appartenant à une classe donnée pour lequel les comportements dynamiques ou statiques sont équivalents à ceux du processus au sens d'un critère donné. Donc, le processus de diagnostic peut se faire suivant les étapes suivantes:

- Le choix d'un modèle mathématique
- Le choix des signaux d'entrées et de sorties
- Un critère de similitude entre le modèle et le processus

Ces méthodes ne sont pas utilisables en temps réel puisqu'il est nécessaire de connaître à l'avance les enregistrements des signaux d'entrées et de sorties.

III.2.2.2 Techniques d'estimation d'état

L'estimation des variables internes d'un système en se basant sur un modèle approché, comme par exemple l'estimation des flux ou des courants rotoriques dans la machine asynchrone sur la base du modèle de Park, peuvent donner dans certains cas des informations sur la présence de défauts.

III.2.2.3 Techniques des résidus

Un test sur les résidus permet de détecter une défaillance éventuelle. Les résidus sont des signaux générés à partir d'un modèle proche du système à surveiller. Ce modèle est de manière générale, constitué d'un ensemble de relations de contraintes dynamiques liant deux types de variables : des variables inconnues (variables internes, perturbations, entrées inconnues,...) et des variables connues (consignes, variables mesurées). Les résidus sont théoriquement nuls en fonctionnement normal et différents de zéro lorsqu'une défaillance survient [13].

III.3 Méthodes externe

Ces méthodes se fondent sur l'analyse des mesures que fournit la machine lors de son fonctionnement. Une comparaison entre le spectre du courant d'alimentation et celui du signal fourni par un capteur de vibration montre que l'utilisation des courants statoriques est très intéressante pour le diagnostic, puisque les informations présentes dans l'analyse des courants englobent celles trouvées dans l'analyse vibratoire et celles liées aux phénomènes électriques. La technique d'analyse en temporel ou en fréquentiel identifie le comportement optimal de la machine dans le cas où elle est saine et compare les résultats avec ceux obtenus en présence de défaut.

Dans cette catégorie on retrouve toutes les méthodes basées sur l'intelligence artificielle (IA). Certaines de ces techniques emploient des systèmes experts, les réseaux de neurone artificiels (RNA), la logique floue, les neurones - floue, les algorithmes génétiques (GA), etc... [13].

III.3.1 Diagnostic basé sur les réseaux neurone

Une solution très nouvelle et attirante pour l'évaluation de sévérité des défauts peut s'avérer applicable encore, une des techniques de (IA), c.-à-d. l'approche neuronale contrôlée. Un RNA contrôlé est une fonction d'approximation générale qui peut synthétiser les rapports entre les différentes variables constituant les vecteurs d'entrée et les index de diagnostic de sortie qui indiquent la sévérité du défaut, à partir des exemples utilisés dans le procédé d'apprentissage. Cependant, la sensibilité l'RNA de synthétiser le système dépend des variables d'entrée choisies qui doivent être des indicateurs de défaut optimaux. Afin de remplir cette condition et obtenir une méthode efficace, une étude préventive à base de modèle peut être réalisée et ceci justifie l'importance précédemment mentionnée des approches modèles. Ainsi, l'ensemble de données d'entrée-sortie peut être obtenue, parfaitement à partir des données expérimentales, et également des approches à base du modèle.

III.3.2 Diagnostic par systèmes experts

Un système expert doit fournir des réponses associées à une situation donnée sachant que la complexité du domaine étudié ne permet pas d'établir a priori toutes les configurations possibles des situations ; ainsi un spécialiste du dépannage réalise son diagnostic à l'aide d'une description partielle de la situation. A partir de l'ensemble de symptômes dont il dispose, il peut déduire toutes les conclusions possibles, élaborer de nouvelles hypothèses et approfondir son diagnostic en exploitant des informations supplémentaires collectées sur le système à diagnostiquer [14].

III.3.3 Diagnostic par logique floue

Cette approche, contrairement à la logique du tout ou rien de G.Boode, a pour but la prise en compte de la logique de la pensée humaine qui est approximative. Le concept de sous-ensemble flou a été introduit pour prendre en compte l'imprécision. La fonction d'appartenance à un ensemble flou prend des valeurs sur l'intervalle $[0,1]$. Celles-ci expriment le degré d'appartenance d'un élément à cet ensemble : 0 pour la non appartenance stricte et 1 pour l'appartenance stricte .

Le principe de fonctionnement du diagnostic basé sur la logique floue consiste à extraire et à calculer les signaux d'entrée, en utilisant les règles linguistiques représentées sous forme de fonctions d'appartenances, ces règles peuvent contenir tous les modèles possibles qui correspondent au mode de défaut considéré .

En général, la procédure de fonctionnement d'un système flou est accomplie en trois étapes :

- La fuzzification
- L'inférence
- La défuzzification

Le bloc fuzzification contient en général un traitement de données préliminaires ; ces données sont alors traitées par des règles linguistiques, ce qui nécessite leur définition par des fonctions d'appartenance. La fuzzification fournit une série de variables floues, réunies par un vecteur, qui va être introduit au bloc d'inférence [12].

Dans le bloc inférence, les valeurs des variables linguistiques sont liées par plusieurs règles qui doivent tenir compte du comportement statique et dynamique du système (des effets du système à diagnostiquer).

Dans la dernière étape, il faut transformer la valeur floue (linguistique) en une valeur déterminée pour déduire l'état du système, ceci se faisant dans le bloc défuzzification ; en rencontre les applications de cette méthode pour le diagnostic des machines asynchrones.

III.3.4 Les méthodes de reconnaissance des formes

Parmi toutes les approches du diagnostic, la reconnaissance des formes est une technique de définition d'algorithmes permettant de classer des objets dont l'aspect a varié par rapport à un objet type. Il s'agit de définir à quelle forme- type une forme observée ressemble le plus [3].

Dans ce cas, la forme est définie par un ensemble de 'd' paramètres appelés caractères qui sont les composants du vecteur forme x ; les prototypes sont les points représentatifs du vecteur forme dans l'espace à 'd' dimensions ; Dans un problème de reconnaissance des formes on suppose généralement que les formes x à classer appartiennent à M catégories bien déterminées appelées classes et notées w_1, w_2, \dots, w_m . Compte tenu du bruit de mesure les vecteurs appartenant à une classe donnée w_i forment une zone particulière dans l'espace de dimension d .

Le problème de la reconnaissance des formes consiste à déterminer les formes séparant les M classes dans le but de pouvoir ultérieurement classer une nouvelle forme x lors de l'opération de classification ou de discrimination.

La procédure de diagnostic basée sur les techniques de reconnaissance des formes met en œuvre quatre étapes principales qui sont résumées sur la figure (III.3).

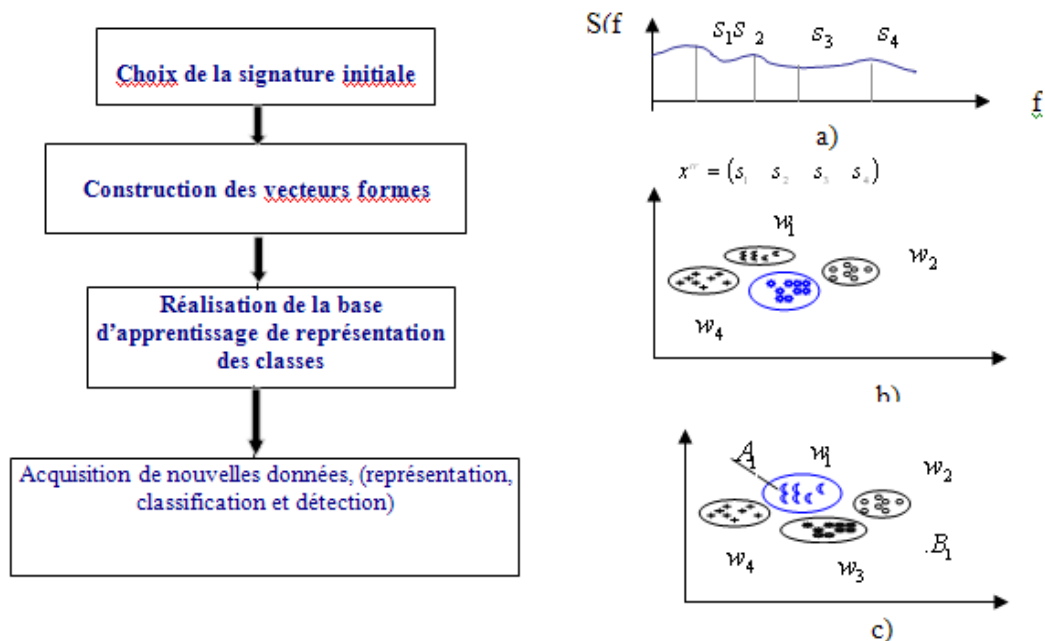


Figure III.3 Procédure de diagnostic basée sur la technique de la reconnaissance des formes [12]

Dans ce cas, la dernière phase correspond évidemment à l'exploitation du système de diagnostic. D'autre part, après l'acquisition d'une nouvelle signature, on calcule la forme associée dans l'espace de présentation et on procède à sa classification, chose qui se réalise sans difficulté (par exemple, il faudra prendre la décision de rejeter le point B ou de le caser dans une nouvelle classe).

III.3.5 Diagnostic basé sur le traitement des signaux

L'analyse par le traitement du signal, est utilisée depuis de nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines électriques, en particulier les ruptures de barres au rotor, la dégradation des roulements, les excentricités, les court circuits dans les bobinages. Les méthodes d'analyse spectrale sont principalement utilisées dans les machines directement alimentées par le réseau et fonctionnant en régime permanent.

Toutes les méthodes de traitement de signal disponibles pour le diagnostic des machines tournantes peuvent être classées dans quatre groupes différents : l'analyse cepstrale, le spectrogramme, la transformé de Fourier rapide (FFT), La transformation de Fourier à court terme (TFCT). Dans ce qui suit, on présente quelques méthodes qui sont utilisées dans le diagnostic des ruptures de barres.

III.3.5.1 Analyse cepstrale

Cette méthode est utilisée en analyse vibratoire et dans le cas du diagnostic de réducteurs. Il a été prouvé qu'en calculant le cepstre, on identifie clairement la présence des raies.

III.3.5.2 La transformé de Fourier rapide (FFT)

La transformée de Fourier rapide, notée TFR, est un algorithme de calcul rapide de la TDF élaborée en 1965 par *J.W.Cooley*. Cette transformée de Fourier rapide est très utilisée lorsqu'il est indispensable d'obtenir une analyse fréquentielle "en ligne" dans certains processus au travers d'une fenêtre glissante d'observation.

La détection des défauts du moteur asynchrone, avec FFT est basée sur l'analyse de la signature du courant statorique, et peut être améliorée en diminuant les distorsions de la forme du courant comme. En plus, il est bien connu que le courant du moteur n'est pas un signal stationnaire, les propriétés dont elles varient avec la variation des conditions normales de fonctionnement du moteur. Comme résultat, il est difficile de différencier entre les conditions de défaut et les conditions normales de fonctionnement du moteur en utilisant l'analyse de Fourier.

III.3.5.3 La transformation de Fourier à court terme (TFCT)

La suite de cette étude fait ressortir certaines limitations de la transformée de Fourier, quant aux traitements de signaux non-stationnaires. La notion de fenêtre à été introduite, cette notion consiste à analyser le signal par transformée de Fourier par portion à l'aide de fenêtres temporelles dont la position centrale est déplacée sur tout le long du signal.

La fenêtre est déplacée sur l'échelle des temps par l'incrément désiré par l'utilisateur. L'information tirée peut être plus ou moins pertinente selon l'incrément et la longueur de la fenêtre qui doit atténuer la distorsion des spectres obtenus par la transformée de Fourier [14].

III.3.5.4 Le spectrogramme

La transformée de Fourier est surtout utilisée pour l'analyse des systèmes en régimes permanents. Cependant, il est possible de la mettre en œuvre pour l'étude de fonctionnements dynamiques, par la méthode du spectrogramme.

Le spectrogramme est le calcul répétitif de la transformée de Fourier sur une fenêtre temporelle glissant sur le signal. Son calcul sera donc soumis aux paramètres suivant [13] :

- Longueur de la fenêtre.
- Type de fenêtre de pondération.
- Longueur totale du signal analysé.
- Pas de glissement de la fenêtre ou pas temporel.

III.3.5.5 Analyse temps-échelle

Ce mode d'analyse est utilisé pour détecter des phénomènes qui se déroulent sur des échelles de fréquences différentes rencontrées dans un signal. L'idée fondamentale est de décomposer le signal à l'aide de fonctions analysantes particulières construites à partir d'une ondelette mère oscillante et à moyenne nulle. A partir de l'ondelette mère, il est possible de créer des ondelettes analysantes centrées d'une valeur et à échelle variable limitée [15].

L'utilisation des ondelettes pour la surveillance des défauts et le diagnostic des moteurs asynchrones est un avantage car cette technique permet d'améliorer l'analyse du courant statorique pendant les phases transitoire. Les ondelettes peuvent être utilisées pour l'analyse localisée dans le domaine temps-fréquence ou temps-échelle. C'est par conséquent un outil adéquat pour la surveillance et le diagnostic de défaut des machines électriques lorsqu'il est indispensable de les utiliser à vitesse variable. Dans le chapitre IV on présente la technique des ondelettes et l'application de cette technique au diagnostic des défauts de la machine asynchrone à cage d'écureuil.

III.4 Résultat de simulation d'analyse spectrale

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

Dans cette section on se propose d'analyser la signature du courant statorique du moteur asynchrone par les méthodes traditionnelles qui se résument dans la représentation par spectrogramme et la transformé de Fourier à court terme (STFT).

A titre d'exemple, nous présentons sur les figures (3.4) et (3.5) le spectre du courant statorique lorsque la machine fonctionne avec un rotor sain et un rotor défaillant (deux barres cassées). Nous apercevons une nette augmentation de l'amplitude de ces composantes. Ce qui traduit la présence d'un défaut au sein de la cage d'écureuil.

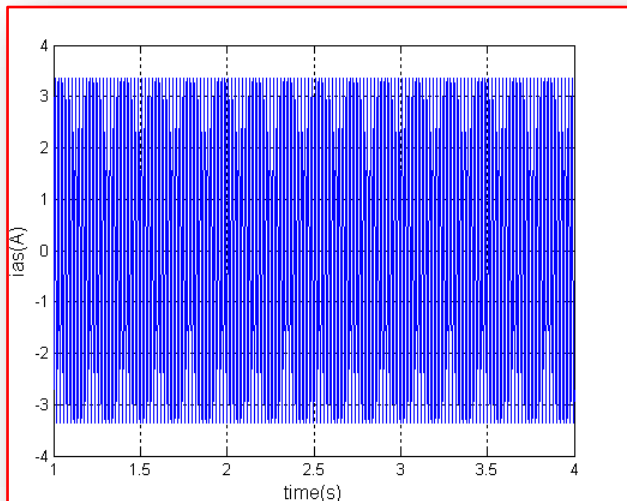


Figure III.4 Courant statorique (état sain)

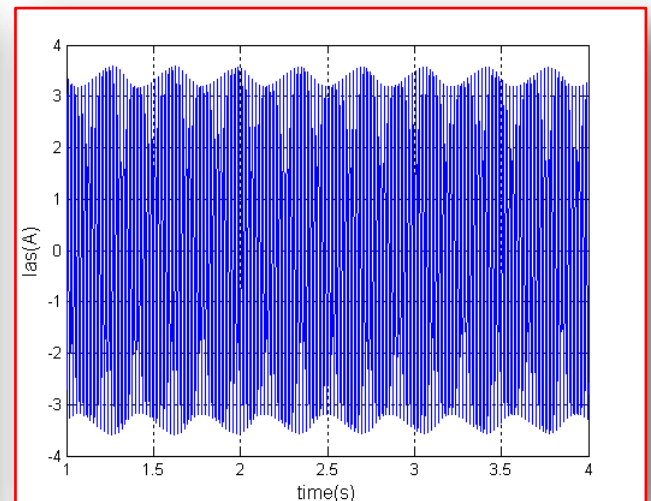


Figure III.5 Courant statorique
(deux barres cassées)

D'après les figures (3.4) et (3.5) on constate qu'il est difficile d'analyser directement le courant statorique. Car, il est clair que l'ordre des grandeurs de la modulation est relativement faible, seule la représentation fréquentielle du signal du courant statorique, donne des renseignements précieux sur sa composition.

III.4.1 Analyse spectrale du courant statorique par FFT

Comme nous avons vu précédemment, il existe de nombreux types de fenêtres qui privilégient des aspects particuliers par rapport aux autres. Il convient donc de choisir la fenêtre adéquate pour le signal en fonction du problème particulier que l'on doit résoudre.

Cette caractéristique porte essentiellement sur quatre points :

- La largeur et la hauteur du lobe principale,
- La hauteur du premier lobe secondaire,
- L'atténuation des lobes secondaires,

Il faudra donc rechercher la meilleure fenêtre qui sera utilisé dans l'analyse d'une seule cassure de barre rotorique.

• Différents types de fenêtres

Pour chercher la meilleure fenêtre, nous effectuons premièrement l'analyse spectrale du courant statorique avec la fenêtre de **Hanning** dans le cas d'un moteur sain, donné par la Figure (III.7), puis on considère le cas d'une cassure de deux barre rotorique adjacentes pour les différentes fenêtres **Hanning**, **Blackman**, **Hamming** et **Kaiser**.

III.4.1.1 Cas d'un moteur sain

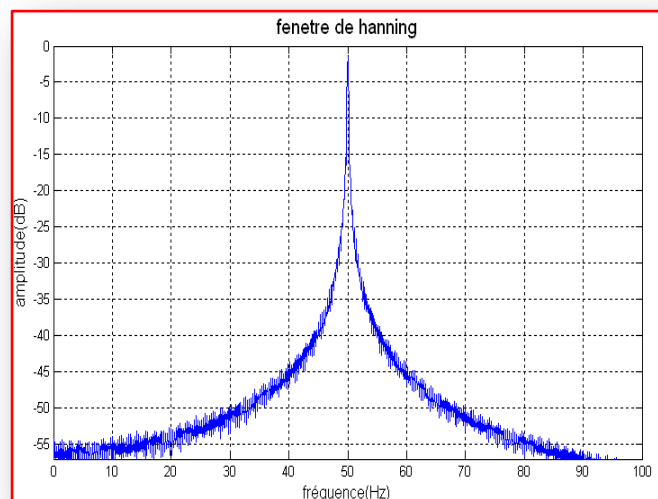
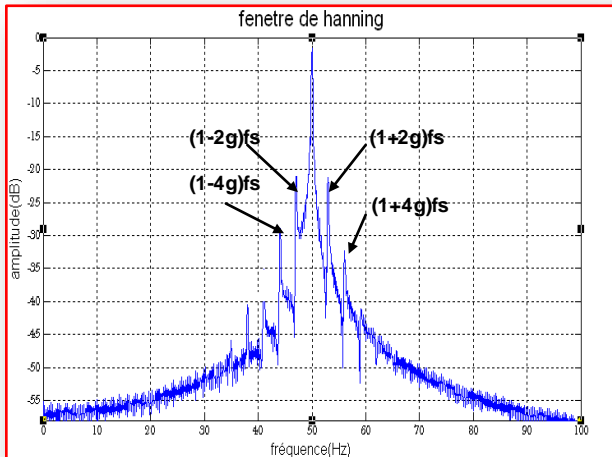
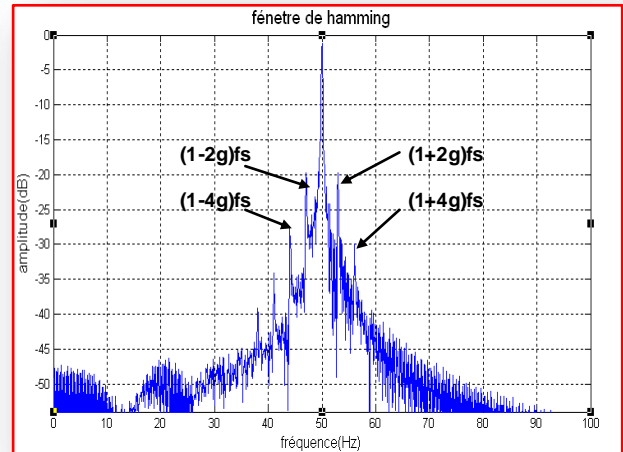


Figure III.6 Fenêtre de Hanning de l'analyse spectral pour un moteur sain

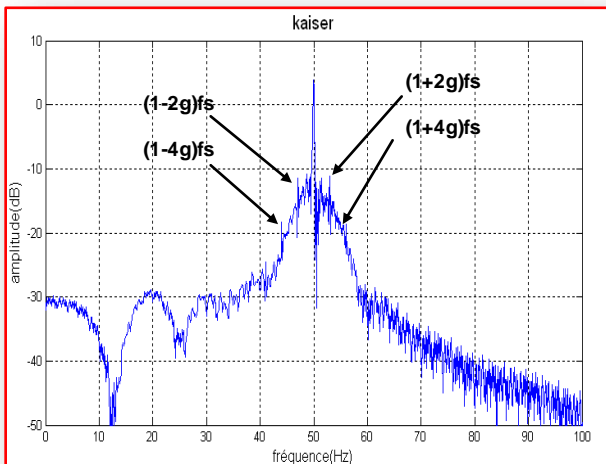
III.4.1.2 Cas d'un moteur avec deux barres adjacentes cassées



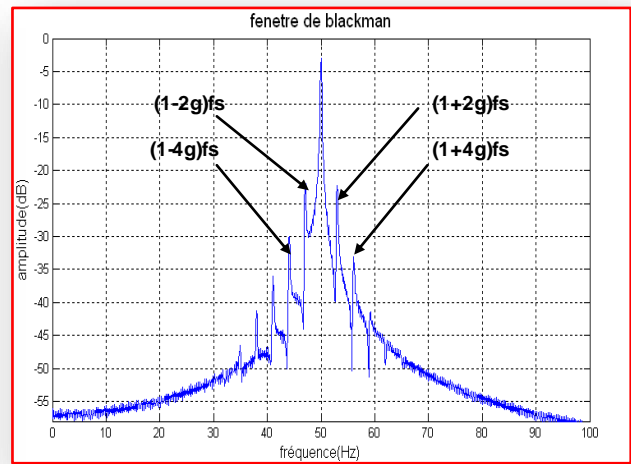
Fenêtre de Hanning



Fenêtre de Hamming



Fenêtre de Kaiser



Fenêtre de Blackman

Figure III.7 Les différentes fenêtres de FFT pour cassure de deux barres adjacentes

III.4.1.3 Effet de nombre et de la position des barres cassées

Dans cette partie on considère des défauts, mais pour différentes barres cassées tenant compte de nombre et de la position de cassure.

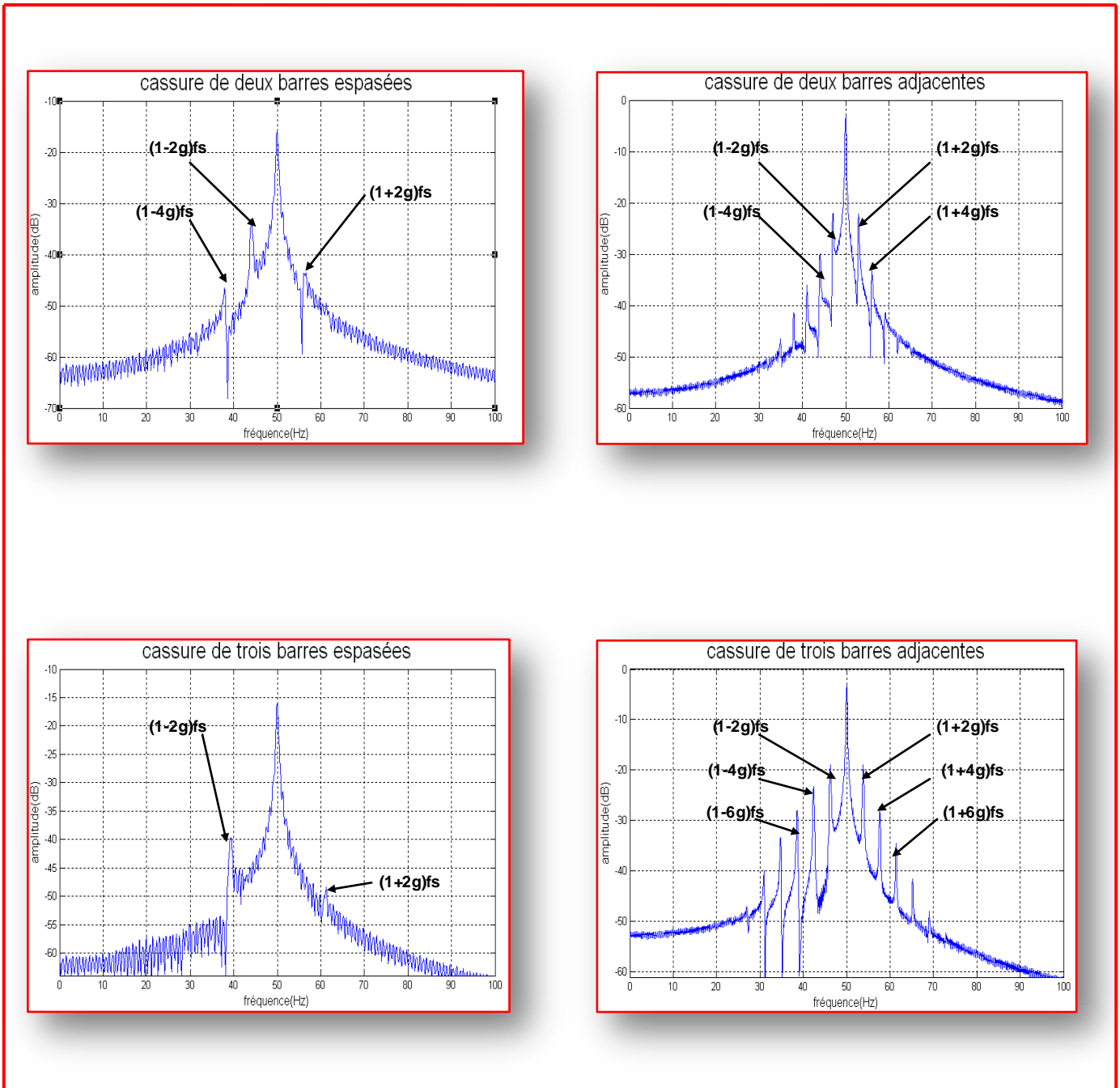


Figure III.8 Fenêtre de Hanning pour différentes cassures des barres

III.4.2 Analyse spectrale du courant statorique par le spectrogramme

La figure ci-dessous représente le spectrogramme par la fenêtre de Kaiser, du courant d'une phase statorique respectivement dans le cas d'un moteur sain, cas de deux et trois barres cassées.

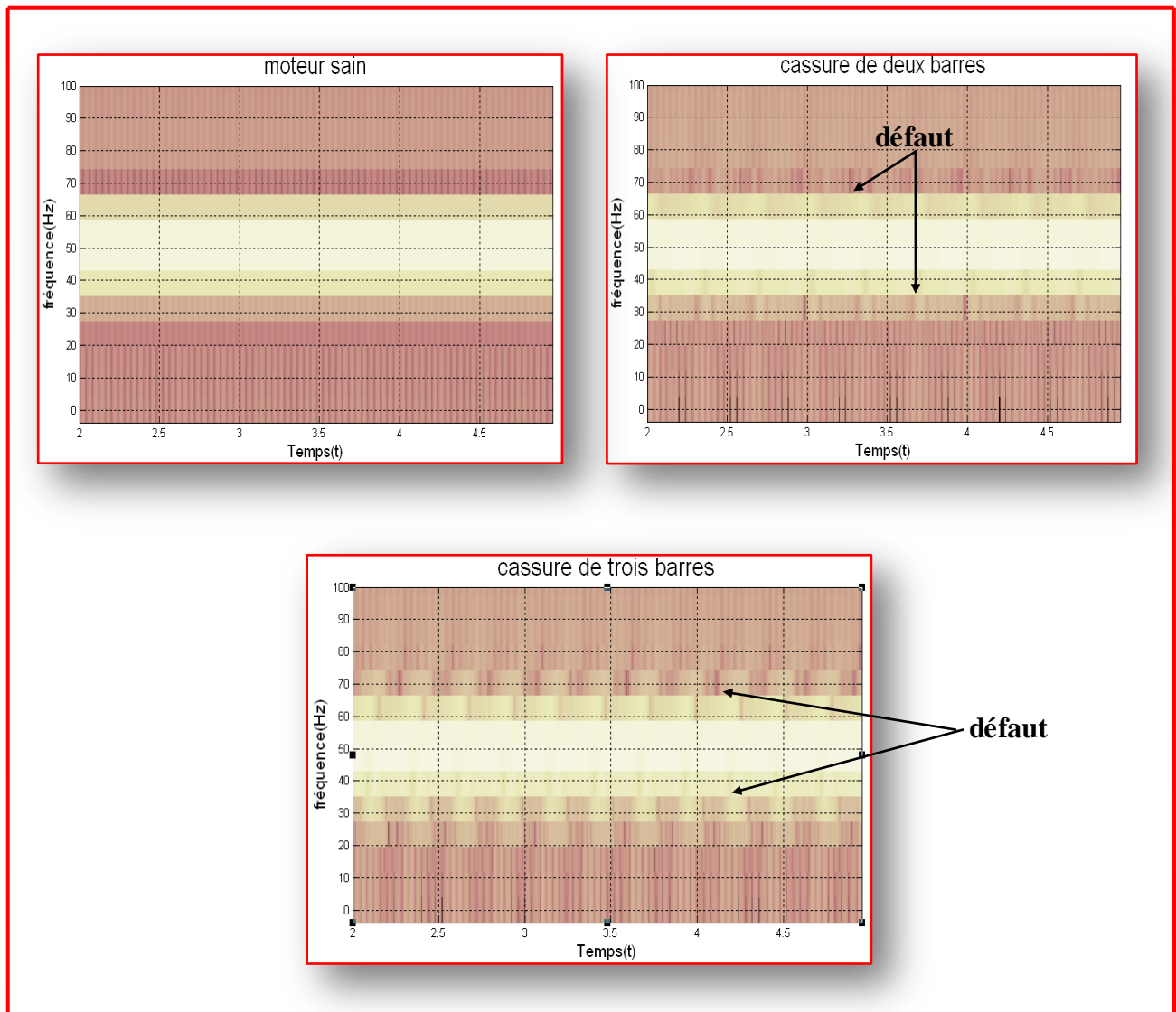


Figure III.9 Spectrogramme du courant statorique

Interprétation des résultats

Comme on peut le voir, l'utilisation de la fenêtre à un rôle important dans la discrimination des composantes fréquentielles qui indiquent les conditions de défaut, nous avons de bons résultats par l'application de cette technique au courant statorique pour un état sain et avec défaut.

Au point de vue des résultats des différents cas de simulation effectués, on peut affirmer que la manifestation des raies est un signe de l'existence du défaut, de plus, leur amplitude est une indication du degré de sévérité du défaut.

- La figure III.7 représente le courant statorique par la fenêtre de Hanning à l'état saine. C'est évident qu'on n'observe aucune raie latérale
- La figure III.8 représente le courant statorique par différents types de fenêtres pour une cassure de deux barres adjacentes. On remarque l'apparition des raies latérales de fréquence de l'ordre de $(1 \pm 2k) f_s$, et des amplitudes importantes de l'ordre de (-22.2 dB)
- Dans le cas de cassure de deux ou trois barres espacées (figure III.9), on remarque une diminution de l'amplitude des raies latérales et leurs fréquences se rapprochent de la fréquence du lobe principal.

Le tableau récapitulatif suivant résume les fréquences et les amplitudes des raies pour les différents cas de cassure de barres.

f(Hz) /A (dB)	Deux barres espacées	Trois barres espacées	Deux barres adjacentes	Trois barres adjacentes
f ₁ /A ₁	44.2 / -33.7	39.6 / -39.9	46.7 / -22.2	45.8 / -18.9
f ₂ /A ₂	55.8 / -43.2	61.4 / -47.6	53.3 / -22.8	54.2 / -19.1
f ₃ /A ₃	/	/	43.5 / -32.7	42.7 / -27.2
f ₄ /A ₄	37.3 / -46.8	/	56.5 / -30.1	57.3 / -23.4

Tableau III.1 Les différentes cassures de barres.

- Pour le spectrogramme du courant statorique on remarque qu'il y a une petite déformation de la bande marron pour une cassure de deux barres et déformation très grande pour une cassure de trois barres.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre on a essayé de donner un aperçu général sur les différentes méthodes de diagnostic et de détection de défaut dans la machine asynchrone à rotor à cage d'écureuil, et on a effectué une simulation de deux méthodes parmi les différentes méthodes citées dans ce troisième chapitre (l'analyse spectrale par la TFCT ou technique de fenêtrage et la méthode du spectrogramme). On a constaté que le choix de la fenêtre et sa largeur joue un rôle très important dans l'analyse fréquentielle pour extraire du spectre le plus d'informations qui permettent de séparer les composantes les plus proches du fondamental afin de pouvoir l'utiliser pour le système de diagnostic de défauts. En effet l'analyse de Fourier permet de connaître les différentes fréquences excitées dans un signal mais ne permet pas de savoir à quels instants ces fréquences ont été émises. En plus, elle présente d'autres inconvénients qui se résument ainsi :

- La Longueur et le type de fenêtre de pondération doivent être spécifiés
- Lors de la cassure de barres espacées, la fenêtre ne présente pas les raies qui définissent ce type de défaut.
- Le signal doit être stationnaire dans la fenêtre utilisée par la TFCT

Pour palier à tous ces inconvénients, un autre outil de traitement est utilisé, c'est la transformée en ondelettes. L'apport principal de ce nouvel outil est la représentation conjointe temps-échelle (ou temps-fréquence) de signaux non-stationnaires et c'est l'objet du chapitre suivant.

IV.1 Introduction

Beaucoup de méthodes d'analyse du signal ont été proposées pour le diagnostic de défauts, parmi ces méthodes on trouve la FFT (Fast Fourier Transform), une des méthodes les plus utilisées et les mieux établies. Malheureusement, les méthodes basées sur la 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.

L'approche alternative à un tel signal non stationnaire est la transformée en ondelettes (TO), qui a l'avantage de capter la variation en temps des propriétés (fréquences et amplitudes instantanées) contenues dans les signaux. En d'autres termes, la TO permet de décrire le signal dans le domaine temps-échelle et donc de palier l'inconvénient de la transformation de Fourier qui a le désavantage de la perte de l'information temporelle. La technique des ondelettes en plein essor se montre comme étant un outil puissant de traitement du signal.

IV.2 Historique

D'un point de vue historique, le traitement du signal a pour objet la description des signaux liés au monde réel dans un but de traitement, d'identification, de compression, de compréhension ou de transmission.

Dans ce contexte, les transformations linéaires ont toujours joué un très grand rôle, et parmi ces dernières, la plus célèbre et la plus anciennement étudiée est la transformation de Joseph Fourier (1822). Cette transformation permet, comme chacun sait, d'explorer la composition fréquentielle du signal et, par ses propriétés, de lui appliquer facilement des opérateurs de filtrage. Lors de cette transformation, le signal est décomposé sur un ensemble de signaux de « base » qui sont cosinus et sinus ou l'exponentielle imaginaire, mais, très tôt dans l'histoire du traitement du signal, il est apparu que la décomposition obtenue n'était pas toujours la plus satisfaisante et la première transformation en ondelettes (le nom n'était pas encore utilisé) est proposée dans une thèse par Alfred Haar en 1910 ; il serait plus judicieux de parler alors de « paléo-ondelette ». La transformée en ondelettes est un outil qui découpe les données, les fonctions ou les opérateurs en composantes fréquentielles suivant une résolution adaptée à l'échelle.

Les précurseurs conscients de cette technique ont été des mathématiciens (Calderon 1964), des physiciens (Aslaken et Klauder en 1968, Paul en 1985), et surtout des ingénieurs comme

Esteban et Galand (1977), Smith et Barnwell (1986), Vetterli (1986) ; nous pourrions parler dans leur cas de « pré-ondelette », Mais le premier à avoir utilisé la méthode et le premier à avoir proposé le nom d'ondelettes fut Jean Morlet (1983). Le problème traité par Morlet était celui de l'analyse de données issues de sondages sismiques effectués pour des recherches géologiques ; Les résultats obtenus par Morlet et formalisés par le physicien Alex Grossmann ont rapidement éveillé l'attention de nombreux chercheurs et bientôt des bases mathématiques solides ont été mises en place faisant apparaître la notion de base orthogonale (Y. Meyer 1985), d'analyse multi résolution (S.Mallat 1989) [16]. Les ondelettes constituent donc un outil parmi les plus récents du traitement du signal et qui datent de quelques décennies seulement [17]. Contrairement à la transformée de Fourier à court terme, la transformée en ondelettes fait appel à la notion de temps-échelle impliquant des fenêtres d'analyse de longueurs dynamiques [18].

IV.3 Rappels sur la transformée de Fourier

L'objectif de cette section n'est pas de fournir une description détaillée de l'analyse de Fourier et de ses fondements. Il s'agit plutôt de présenter cette méthode d'analyse afin de pouvoir situer l'intérêt de l'analyse en ondelettes [19].

La transformée de Fourier (TF) est l'un des outils les plus utilisés par la communauté du traitement du signal. Elle permet, en décomposant le signal selon un ensemble de sinusoides, de passer du domaine *temps* au domaine *fréquence*.

La transformée de Fourier de $x(t)$ dans L^2 est donnée par :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (IV.1)$$

La transformée de Fourier inverse représente $x(t)$ comme une sommation de sinusoides :

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{j2\pi ft} dt \quad (IV.2)$$

L'information fournie par l'intégrale, correspond à tous les instants de temps, puisque l'intégration est de $-\infty$ à $+\infty$ sur le temps donc :

- Si le résultat de cette intégration est une grande valeur, alors nous disons que le signal $x(t)$ a une composante spectral dominant à la fréquence « f ». Ceci signifie que la majorité de ce signal est composée de la fréquence f .
- Si ce résultat de cette intégration est une petite valeur, alors nous disons que le signal $x(t)$ n'a pas de composante spectral dominant et majoritaire à la fréquence « f ».
- Si ce résultat est nul, alors le signal ne contient pas du tout la fréquence « f » [20].

IV.4 La transformée en ondelettes

D'une manière globale, on peut définir une ondelette comme une fonction qui doit répondre à deux critères : elle doit avoir un support compact, c'est-à-dire qu'elle se localise sur un petit intervalle de temps. Et elle doit être de moyenne nulle.

C'est la condition d'admissibilité car c'est cette condition qui a donné le nom d'ondelettes. En effet cette condition assure qu'on a une fonction ondulatoire. Les transformées en ondelettes se divisent en deux catégories :

- Les transformées en ondelettes continues (TOC) ou continuous wavelet transform (CWT)
- Les transformées en ondelettes discrètes (TOD) ou discrete wavelet transform (DWT).

IV.5 Application de la (TO) aux signaux électriques

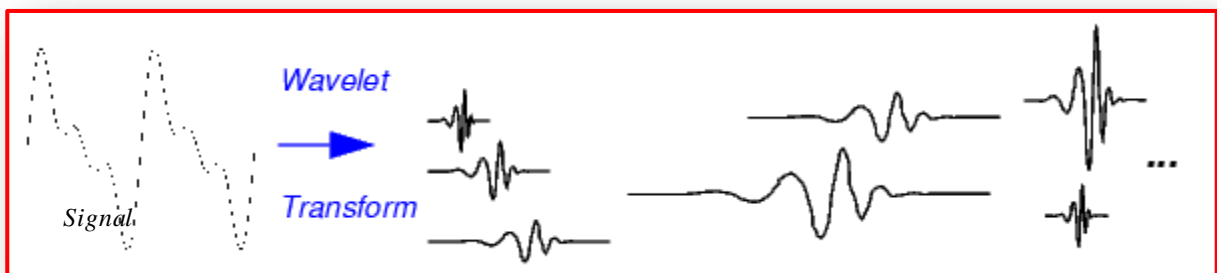
La signature du courant statorique ou le courant moteur représente une source très riche en informations concernant les défauts qui se manifestent souvent dans la machine asynchrone, à cet effet la majorité des travaux du diagnostic sont fondus sur l'analyse du courant statorique soit dans sa partie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

Dans le cas de notre d'étude nous avons basé sur l'application de la TOC pour traiter et analyser le courant d'une phase statorique de la machine pendant son régime permanent pour détecter d'éventuels défauts dans la machine.

IV.6 Transformée en ondelettes continues (TOC) [14]

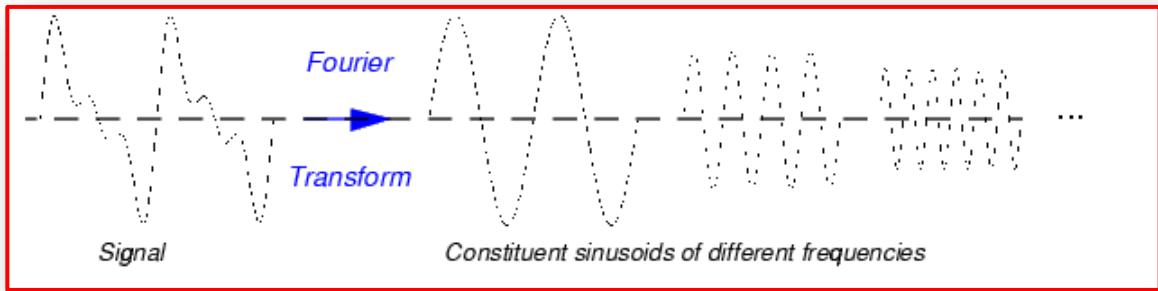
Fondamentalement, la transformée en ondelettes se calcule de la même façon que la transformée de Fourier fenêtrée : on regarde la corrélation, au sens du produit scalaire sur $L^2(\mathbb{R})$, entre le signal à analyser et une famille de fonctions $\{\Psi_{a,b}(t), a \in \mathbb{R}_+, b \in \mathbb{R}\}$ bien localisées en temps et en fréquence :

$$C_x(a, b) = \langle x, \Psi_{a,b} \rangle = \int_{\mathbb{R}} x(t) \Psi_{a,b}^*(t) dt \quad (\text{IV.3})$$



Le principe d'analyse d'un signal par la transformée d'ondelette [21]

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \tag{IV.4}$$



Le principe d'analyse d'un signal par la transformé de Fourier [21]

Les coefficients $C_x(a, b)$ s'interprètent comme la projection du signal $x(t)$ sur la famille $\{\Psi_{a,b}(t)\}$ des fonctions obtenues par dilatation de a et translation de b de l'ondelette mère.

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \tag{IV.5}$$

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

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(t) dt = 0 \tag{IV.6}$$

Le facteur d'échelle (ou de dilatation) a est relié à la notion de fréquence ($a=1/f$) et le décalage b est relié à la notion de position temporelle. Plus a est grand, plus l'ondelette est dilatée.

Par conséquent les grandes valeurs de a seront logiquement associées aux basses fréquences, les plus petites aux hautes fréquences donc :

- Les échelles $a > 1$ dilate les signaux (basses fréquences)
- Les échelles $a < 1$, comprime le signal (hautes fréquences).

IV.6.1 Conditions d'application

-Fonction à énergie finie : $E = \int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi(t)|^2 dt \tag{IV.7}$

-La transformée en ondelettes a donc une résolution temps-fréquence qui dépend de l'échelle b , et vérifie la condition d'admissibilité, c'est à dire que l'intégrale suivante existe et soit finie :

$$C_\Psi = \int_0^{+\infty} \frac{|\Psi(f)|^2}{|f|} df < +\infty \tag{IV.8}$$

Pour garantir l'existence finie de C_ψ , il faut s'assurer de la convergence de l'intégrale aux bornes. A l'infini, il faut que le spectre de l'ondelette mère ait une décroissance au moins en $|f|^{-1/2}$. Par contre, autour de l'origine, le spectre doit s'annuler pour assurer la convergence de l'intégrale en zéro :

$$\hat{\Psi}(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(t) dt = 0 \tag{IV.9}$$

Cette condition impose à l'ondelette d'être à moyenne nulle. Ainsi, son amplitude passe forcément par zéro et présente donc quelques oscillations ; c'est ce qui fait qu'on lui attribue le nom d'ondelette.

Finalement, l'approche fréquentielle permet la réécriture de l'équation (IV.1) sous la forme :

$$C_x(a,b) = \int_R x(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) \Psi^*(af) e^{2j\pi fb} \sqrt{adf} \tag{IV.10}$$

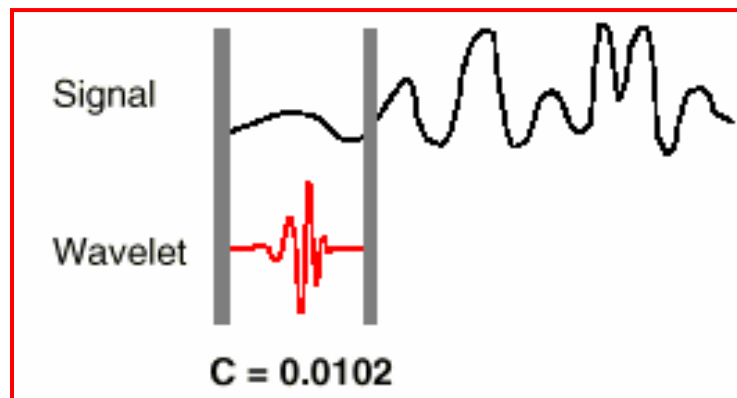
IV.6.2 Procédure de calcul des coefficients d'ondelettes

La procédure de calcul des coefficients $C_x(a,b)$ s'effectue comme suit :

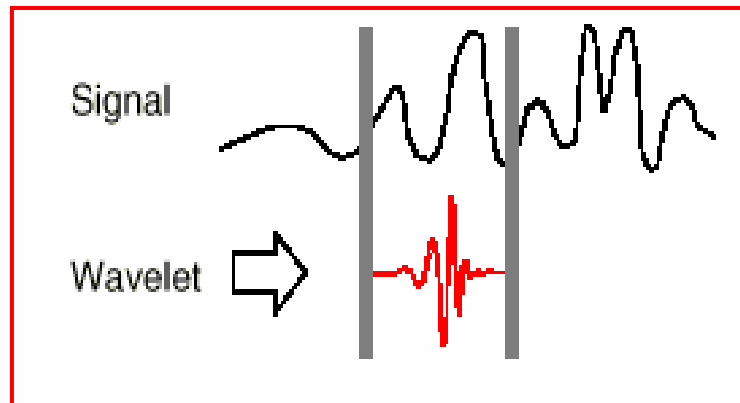
On multiplie le signal et la fonction analysante et l'on calcule l'intégrale du produit.

C'est un processus assez simple, en fait il se déroule en cinq étapes:

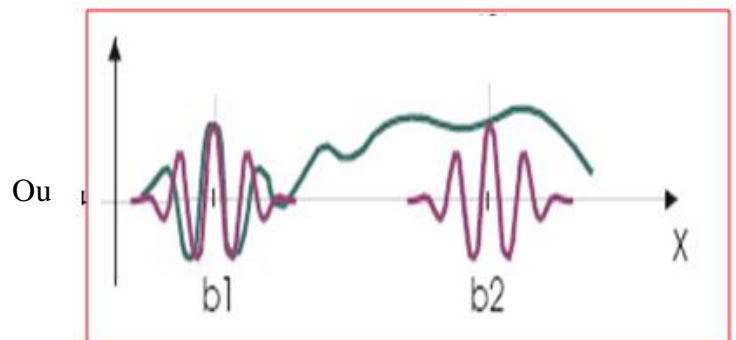
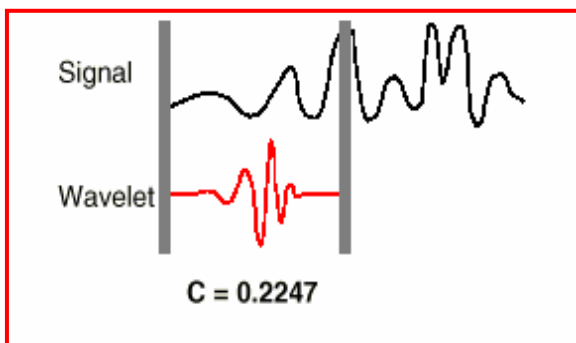
1. On prend une ondelette et on la compare à une section au début du signal original.
2. On calcule le coefficient $C_x(a,b)$ qui représente le degré de corrélation de l'ondelette avec cette portion du signal [21].



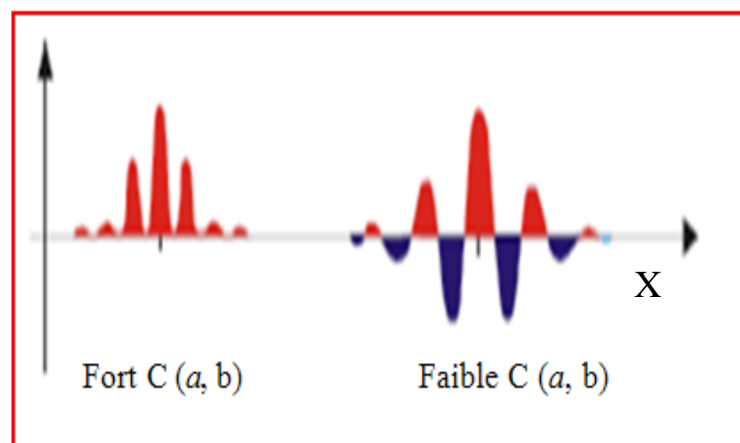
3. On translate l'ondelette vers la droite et on répète les étapes (1) et (2) jusqu'à ce que le signal soit couvert en entier.



4. On dilate l'ondelette et on répète les étapes une (1) à trois (3).



5. On recommence l'opération pour toutes les étapes à différentes échelles [21]



IV.7 Transformée en ondelettes discrète (TOD)

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 toute base d'ondelettes travaillant avec un facteur d'échelle $a = 2^i$. Il est clair que la transformée en ondelettes discrète est pratique en implémentation sur tout système numérique (PC, CARTE à μ P...) [22].

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 :

$$\varphi_{i,j}(t) = 2^{-i/2} \varphi(2^{-i} t - j) \quad (\text{IV.11})$$

et de la même manière la base d'ondelette :

$$\psi_{i,j}(t) = 2^{-i/2} \psi(2^{-i} t - j) \quad (\text{IV.12})$$

Le facteur d'échelle dyadique mène à :

$$\phi(t) = \sum_j 2h(j)\varphi(2t - j) \quad (\text{IV.13})$$

$$\psi(t) = \sum_j 2g(j)\varphi(2t - j) \quad (\text{IV.14})$$

Les équations (IV.3) et (IV.4) 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.

NB. Dans l'application qui nous concerne, les signaux traités étant continus, il est naturel de se pencher sur la version continue de la transformée en ondelettes (TOC). Les familles d'ondelettes sont très nombreuses, et chacune d'entre elles ont un domaine d'application défini de part la forme du signal étudié.

IV.8 La différence entre la TOC et la TOD

La différence principale entre les deux est que la CWT fonctionne sur toutes les valeurs continues de la fréquence et du temps tandis que la DWT fonctionne sur un sous-ensemble spécifique de toutes les valeurs discrètes de la fréquence et du temps.

IV.9 Quelques type des ondelettes [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**.

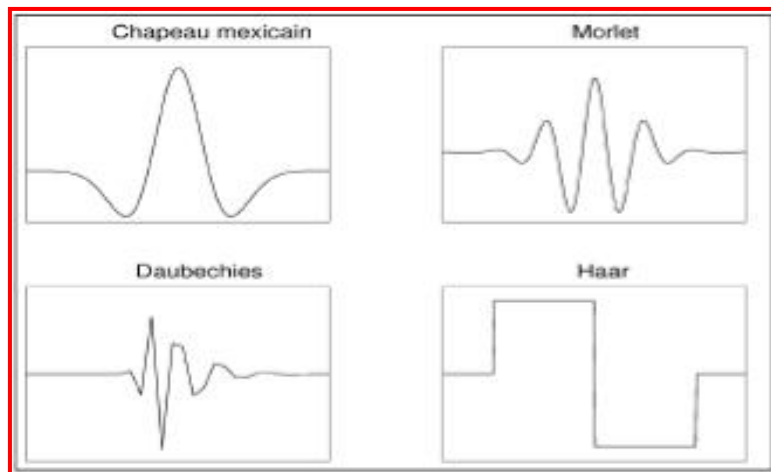


Figure IV.1 Quelques formes des ondelettes usuelles

IV.10 Exemple de l'ondelette de Morlet (complexe)

$$\Psi(x) = e^{-\pi x^2} e^{10i\pi x} \quad (\text{IV.15})$$

Par la dilatation et la translation dans le temps, on trouve la fonction d'ondelette dilatée et translaturée $\Psi_{a,b}(t)$

$$\Psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} e^{-\pi \left(\frac{x-b}{a}\right)^2} e^{10i\pi \left(\frac{x-b}{a}\right)} \quad (\text{IV.16})$$

IV.11 Application de la technique des Ondelettes au diagnostic de la MAS

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.

Dans le cas de notre d'étude nous avons basé sur l'application de la TOC pour traiter et analyser le courant d'une phase statorique de la machine pendant son régime permanent pour détecter d'éventuels défauts dans la machine

IV.12 Résultats de simulation par la transformée en ondelettes continues

Dans cette section on se propose d'analyser la signature du courant statorique (MCSA) du moteur asynchrone à l'aide de la transformé en ondelette continues (TOC). Les figures ci-dessous montrent l'évolution des coefficients de la (TOC) du courant d'une phase statorique pour des échelles entre 0 et 50 respectivement dans les cas : moteur sain, une barre cassée puis deux barres cassées à $t=1s$ et avec application d'un couple de charge de 3.5 Nm à partir de $t=0.5s$.

IV.12.1 Résultats de simulation d'un fonctionnement avec machine saine

Les figures ci-dessous représente les transformées en ondelettes du courant d'une phase statorique dans le cas d'une machine saine par application de divers types d'ondelettes (mères).

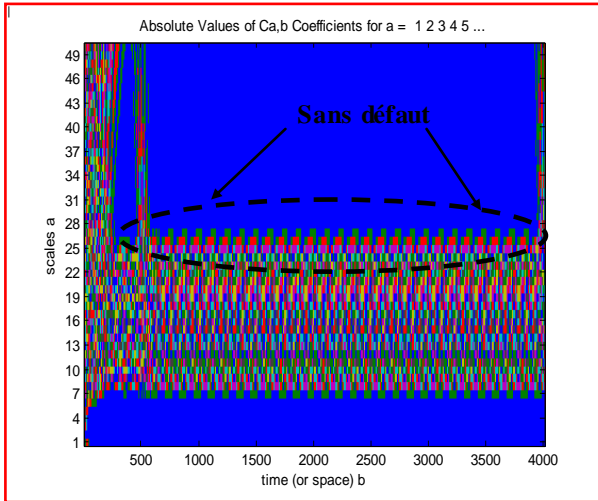


Figure (IV.2.a) Cas d'ondelette de Daubechies

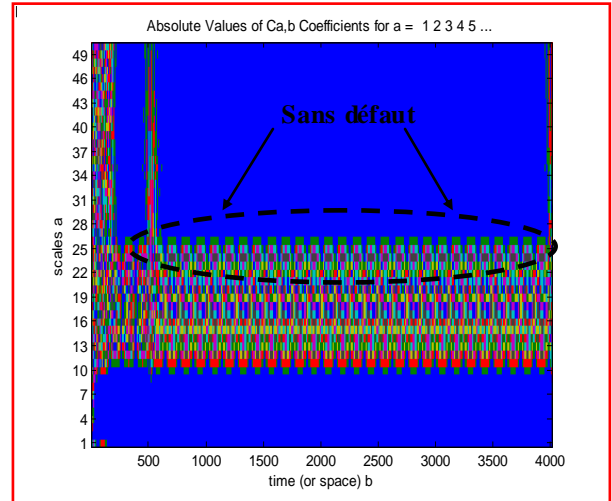


Figure (IV.2.b) Cas d'ondelette Gaussien

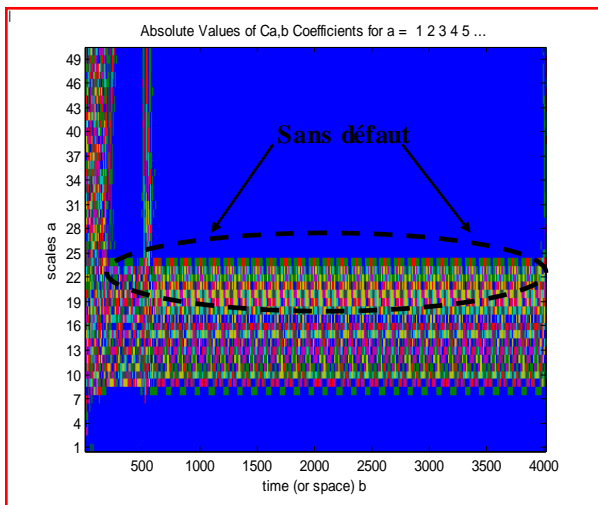


Figure (IV.2.c) Cas d'ondelette de Meyer

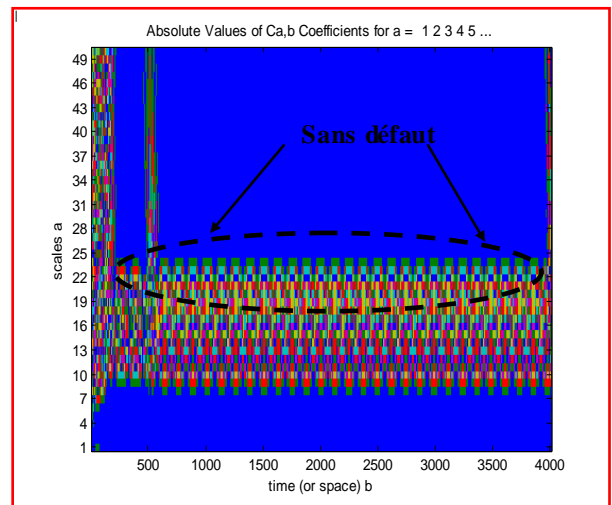


Figure (IV.2.d) Cas d'ondelette de Morlet

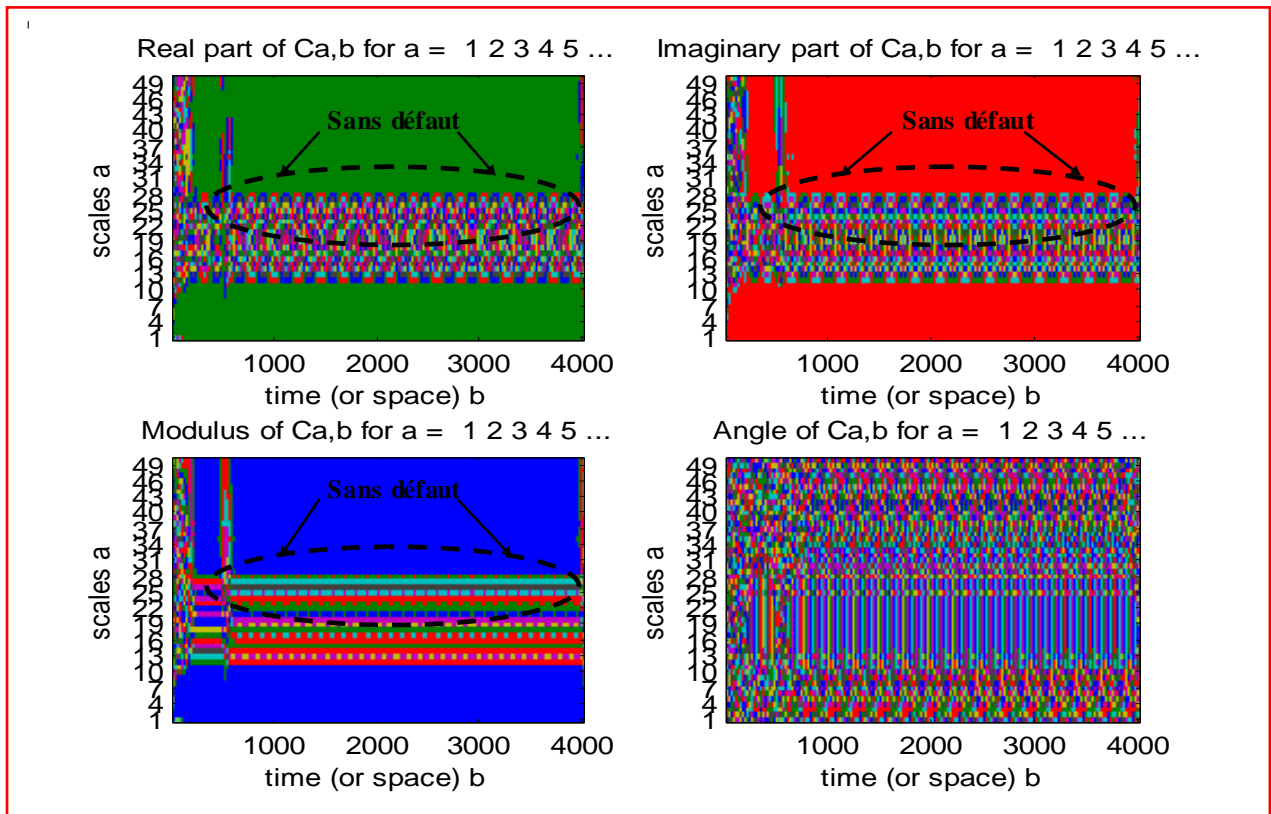


Figure (IV.2.e) Cas d'ondelette Gaussien complexe

IV.12.2 Résultats de simulation d'un fonctionnement avec cassure d'une seule barre

Les figures ci-dessous représente les transformées en ondelettes du courant d'une phase statorique dans le cas de cassure d'une barre à $t=1S$.

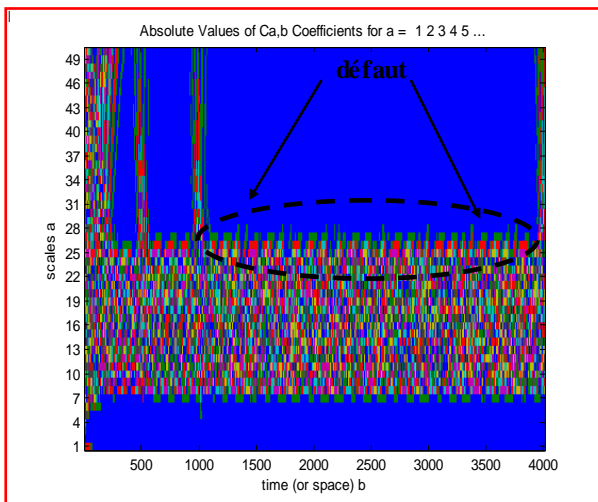


Figure (IV.3.a) Cas d'ondelette de Daubechies

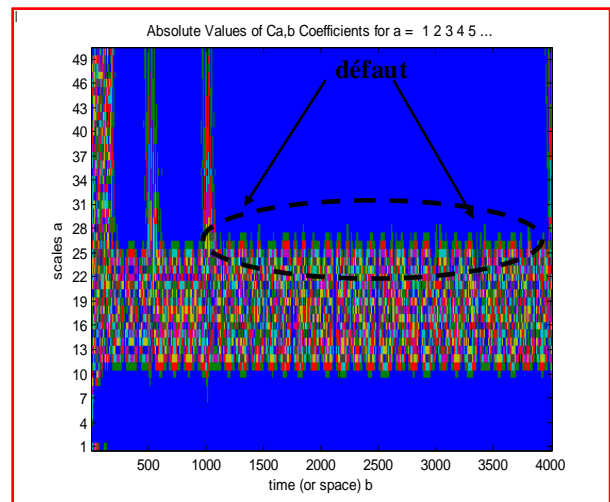


Figure (IV.3.b) Cas d'ondelette Gaussien

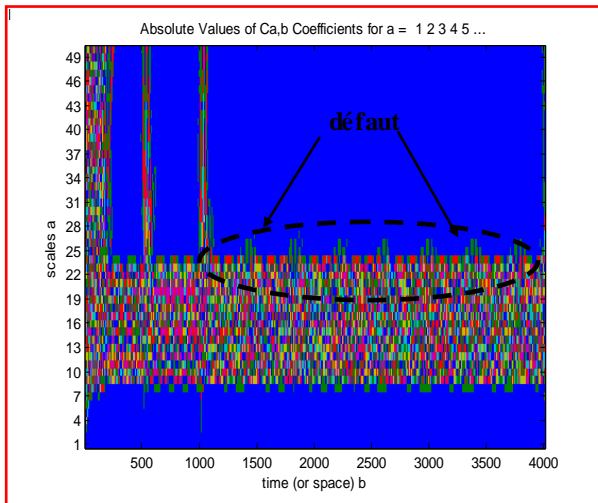


Figure (IV.3.c) Cas d'ondelette de Meyer

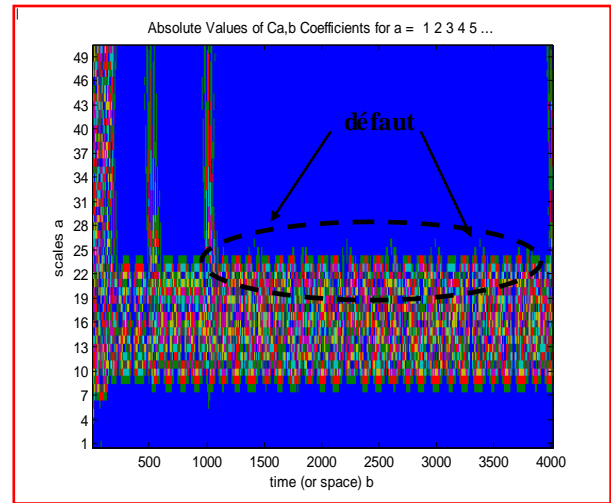


Figure (IV.3.d) Cas d'ondelette de Morlet

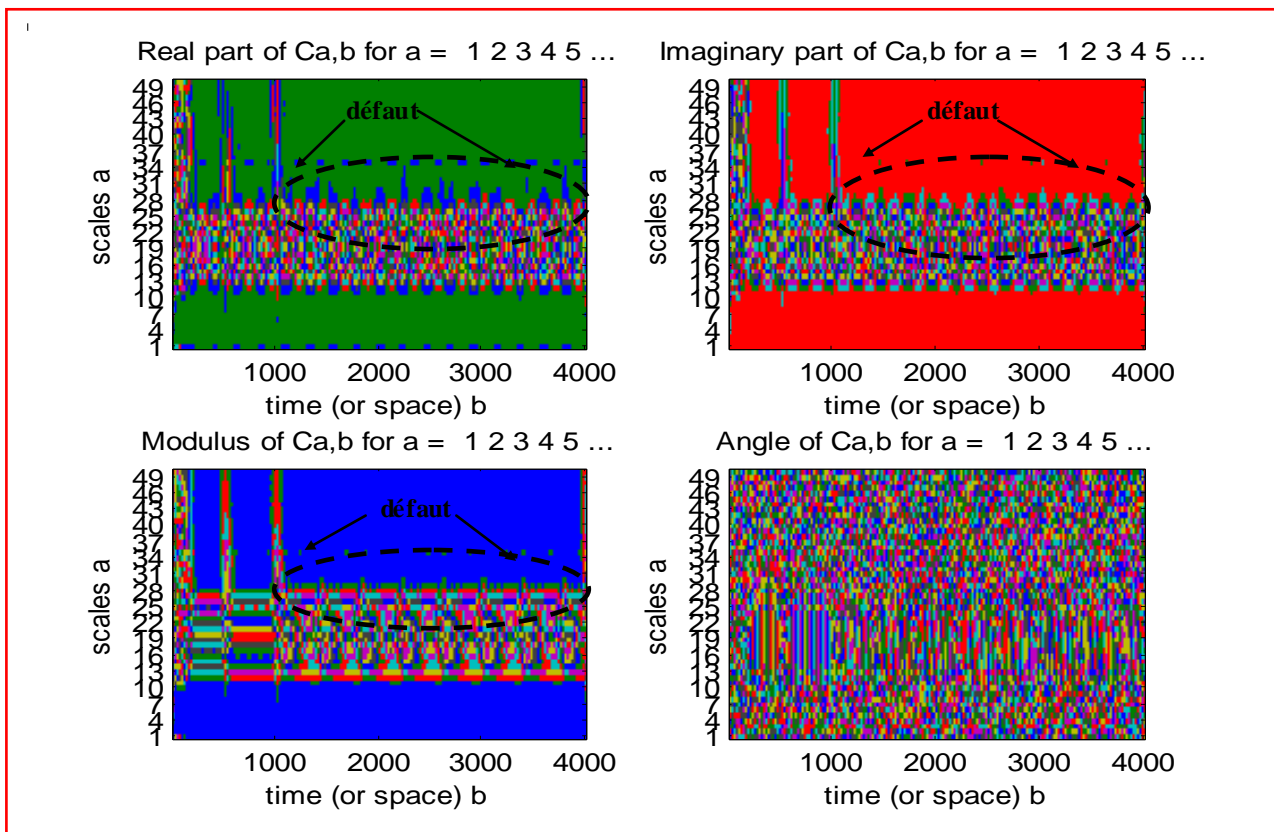


Figure (IV.3.e) Cas d'ondelette Gaussien complexe

IV.12.3 Résultats de simulation d'un fonctionnement avec cassure de deux barres adjacentes dans le même temps

Les figures ci-dessous représentent les transformées en ondelettes du courant d'une phase statorique dans le cas de cassure de deux barres adjacentes à $t=1S$.

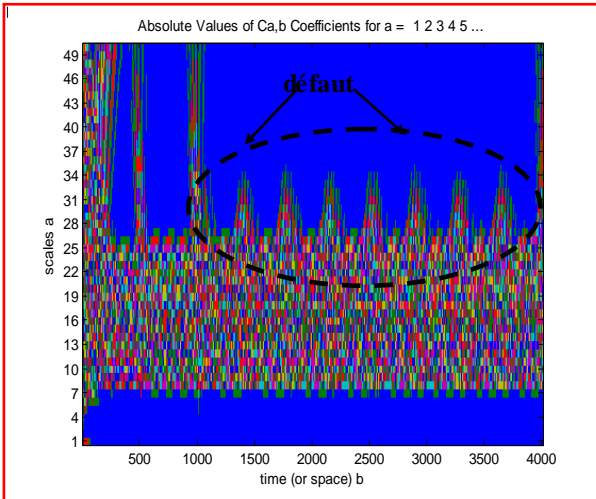


Figure (IV.4.a) Cas d'ondelette de Daubechies

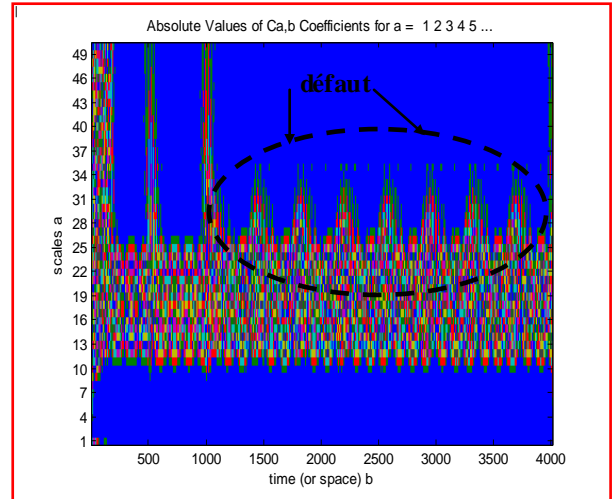


Figure (IV.4.b) Cas d'ondelette Gaussien

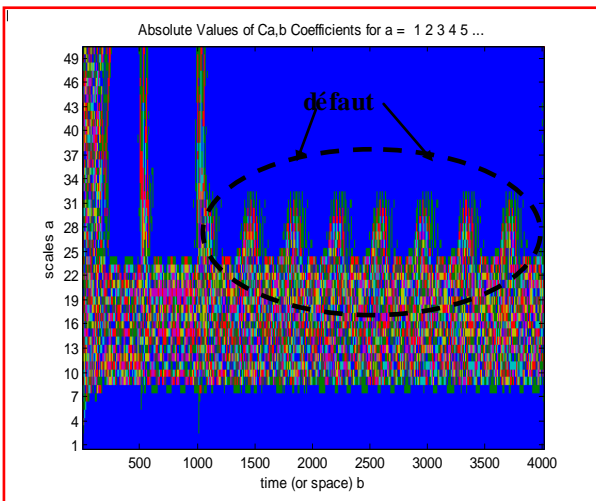


Figure (IV.4.c) Cas d'ondelette de Meyer

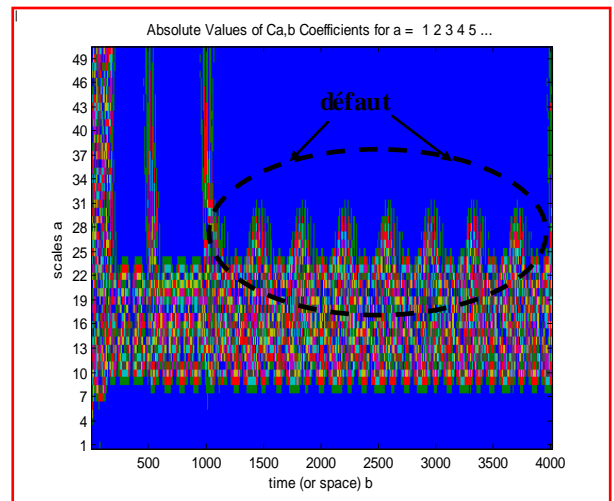


Figure (IV.4.d) Cas d'ondelette de Morlet

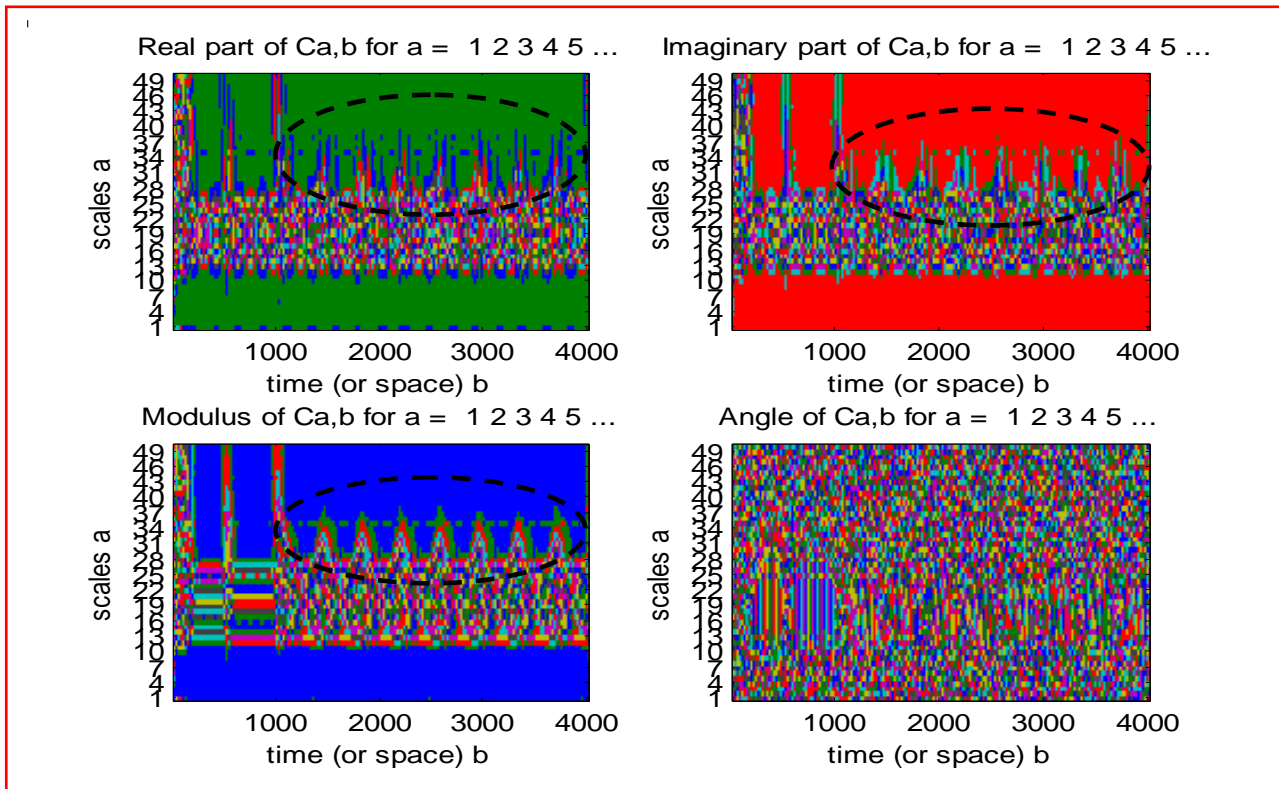


Figure (IV.4.e) Cas d'ondelette Gaussien complexe

IV.12.4 Résultats de simulation d'un fonctionnement avec cassure de deux barres adjacentes à temps différent

Les figures ci-dessous représente les transformées en ondelettes du courant d'une phase statorique respectivement dans le cas de cassure d'une seule barre à $t=1s$ suivi de cassure d'une autre barre à $t=2.5s$.

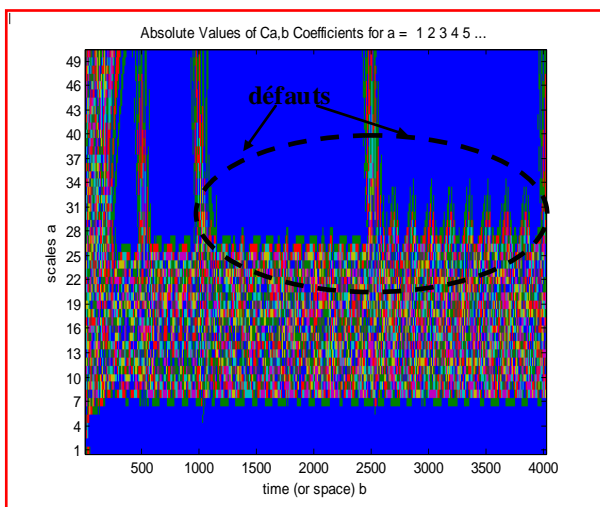


Figure (IV.5.a) Cas d'ondelette de Daubechies

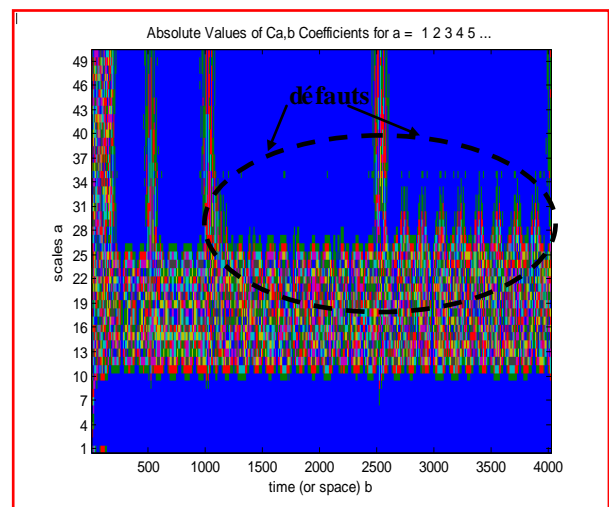


Figure (IV.5.b) Cas d'ondelette Gaussien

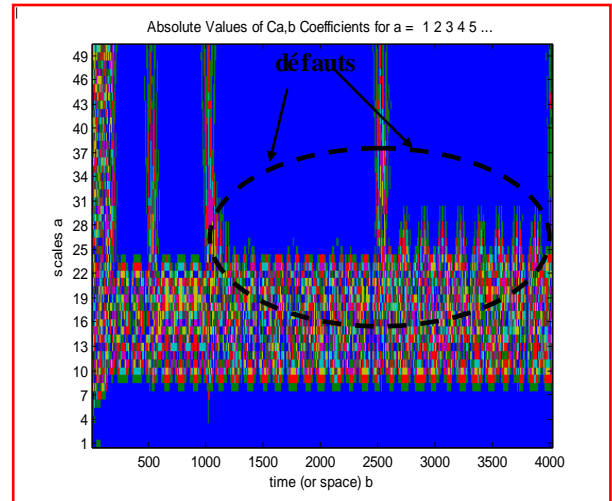
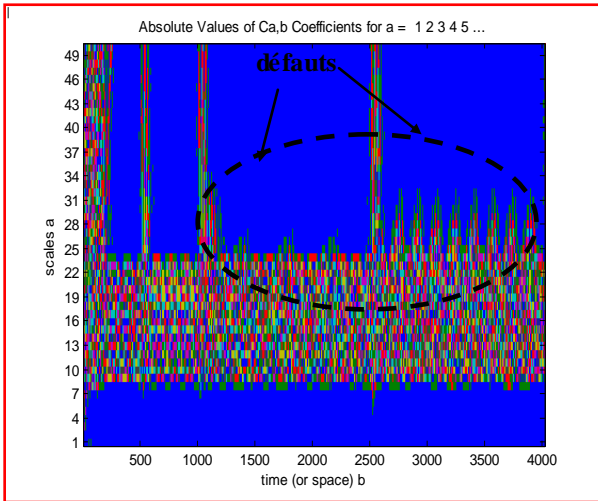


Figure (IV.5.c) Cas d'ondelette de Meyer

Figure (IV.5.d) Cas d'ondelette de Morlet

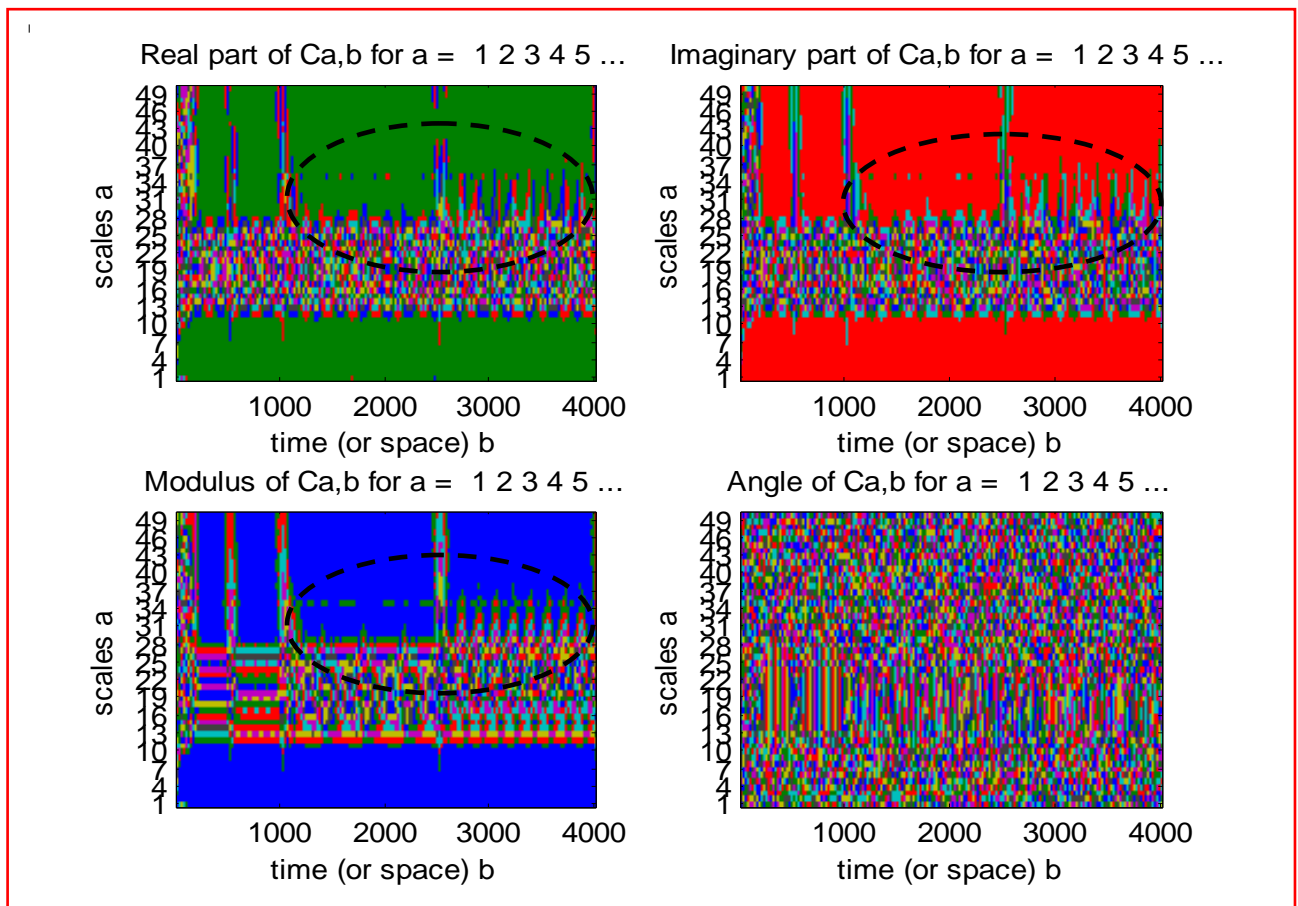


Figure (IV.5.e) Cas d'ondelette Gaussien complexe

Interprétation des résultats

Les résultats obtenus ci-dessus par l'application de la transformée en ondelettes continues (représentation temps-échelle) au courant d'une phase statorique issu de la MAS montrent que les coefficients $C_x(a, b)$ sont stables dans le cas de fonctionnement à l'état sain, alors que dans le cas de défauts : cassure d'une ou deux barres ou plus, les coefficients commencent à changer leurs régimes (figures IV.3), c'est un indice précoce qui indique que le rotor va subir des défauts. Dans le cas de cassure de deux barres adjacentes en même temps, on remarque un changement important de la localisation des coefficients de TOC (figures IV.4 et IV.5.). Les résultats décrits dans cette partie sont confirmés par application des différents types d'ondelettes continues.

IV.13 Comparaison entre les différentes méthodes d'analyse du signal utilisées dans notre cas

Dans ce qui suit nous présentons un récapitulatif des résultats de simulation obtenus par les méthodes de traitement du signal à savoir la TFCT (fenêtre de Hanning), la représentation temps-fréquences (le spectrogramme) et la représentation temps-échelles (le scalogramme). Ces dernières sont appliquées au courant d'une phase statorique issu de la MAS dans le cas de fonctionnement défectueux (cassure de deux barres adjacentes en même temps).

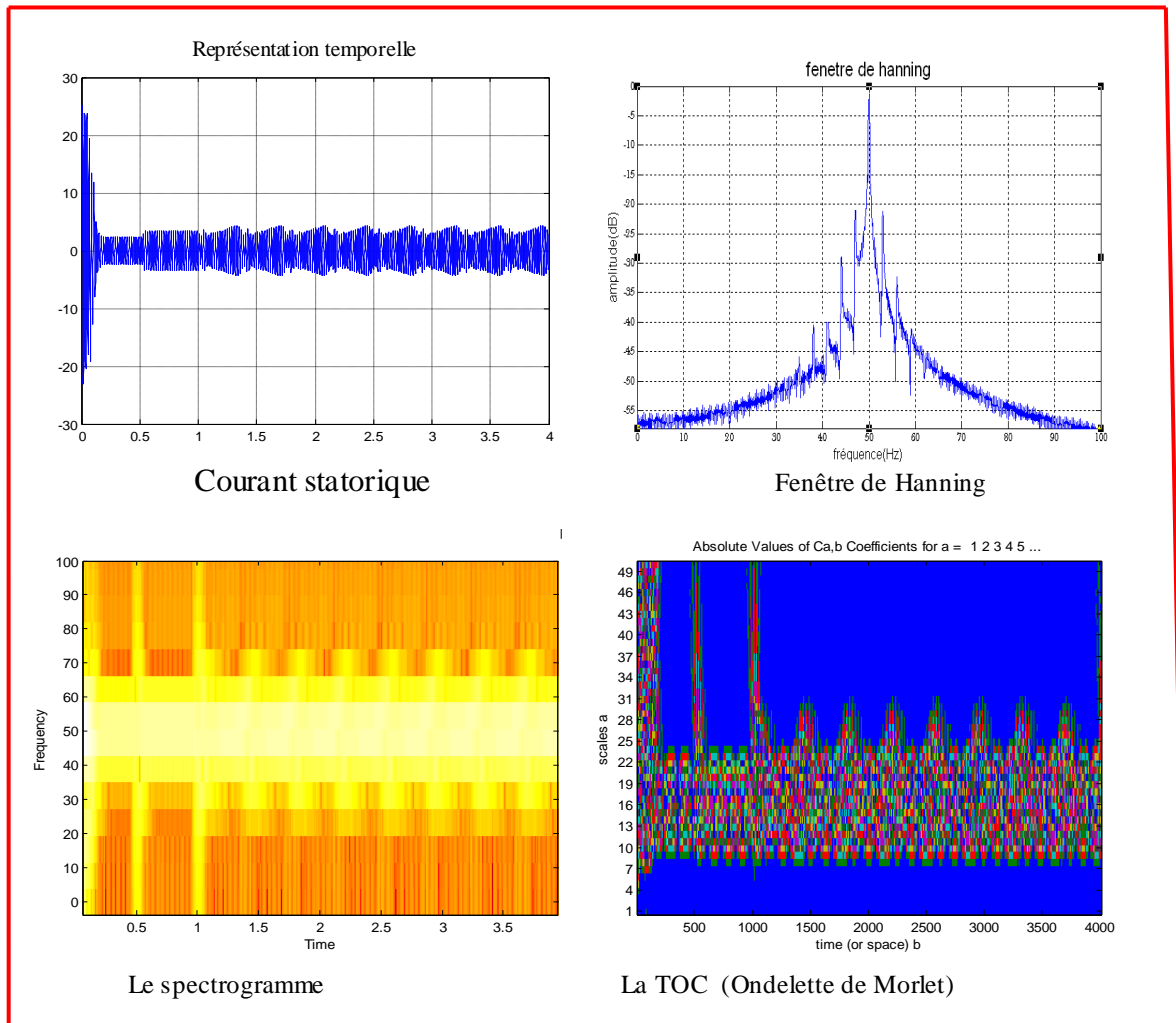


Figure IV.6 Récapitulatif des résultats obtenus dans le cas d'une cassure de deux barres adjacentes à $t=1s$

D'après la figure IV.6 on peut dire qu'on a obtenue de bons résultats avec les trois méthodes de traitement de signal appliquées précédemment au courant d'une phase statorique (MCSA), mais les résultats obtenus dans le plan temps- fréquences (le spectrogramme) et le plan temps-échelle (TOC), s'avèrent très intéressants par rapport à ceux obtenus par la TFCT technique de fenêtre. En effet, l'analyse de Fourier TFCT permet de connaître les différentes fréquences excitées dans un signal, mais ne permet pas de savoir à quels instants ces fréquences ont été émises. En revanche, les deux représentations temps-fréquences ou temps-échelle nous permettent de connaître l'instant d'apparition de défauts (localisation d'une composante spectrale dans le temps), bien que cette dernière soit meilleure surtout quand il s'agit de signaux non stationnaires tel est le cas de la plupart des signaux rencontrés en pratiques (l'électrocardiogramme (ECG), l'électroencéphalogramme (EEG) et l'électromyogramme (EMG)).

IV.14 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné en premier temps, quelques rappels sur la transformée de Fourier et la technique des ondelettes, cette dernière comprend deux catégories distinctes la transformée en ondelettes continues (TOC) et la transformée en ondelettes discrète (TOD), ensuite en deuxième temps, nous avons évoqué une grande famille des ondelettes fréquemment utilisées. L'application de la TOC au courant d'une phase statorique à travers les résultats obtenus montre l'efficacité de cette technique dans la détection des défauts rotoriques (cassure de barres) en termes du temps- fréquence voire sévérité de défaut.

L'application de la transformée des ondelettes (TOC) au courants statoriques issus de la MAS à révélé que les scalogrammes (représentations temps-échelle) obtenus sont stables dans le cas de fonctionnement sain et présentent des formes différentes en cas de défauts.

Un système de détection précoce et automatique avec classification des défauts peut être développé par combinaison entre cette technique et autre méthode de diagnostic moderne (voir chapitre III) à savoir : la technique de reconnaissance de formes, la logique floue ou réseaux de neurones ...etc.

Conclusion générale

L'évolution croissante des machines asynchrones dans les secteurs industriels oblige certains utilisateurs à se prémunir contre l'apparition d'un défaut provoquant le plus souvent un arrêt intempestif de la machine. Le travail présenté dans ce mémoire traite donc du diagnostic de défauts rotoriques par la technique des ondelettes et plus particulièrement des ruptures de barres pouvant survenir au sein de la cage d'écureuil des machines asynchrones.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les éléments de constitution de la machine asynchrone à cage d'écureuil afin de préciser les différents défauts pouvant survenir dans cette machine. Nous avons cité les défauts qui se produisent au niveau du stator (courts –circuits statoriques), ainsi que les défauts rotoriques (cassures de barres ou d'anneaux rotoriques). Nous avons également présenté les signatures des défauts de la machine asynchrone. Ce qui nous a permis d'avoir une étude précise sur les signatures des défauts, afin de pouvoir élaborer un modèle qui présente au mieux notre machine asynchrone.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté de façon analytique, le modèle multi-enroulement d'une machine asynchrone à cage d'écureuil, en considérant que le rotor est constitué de plusieurs résistances séparées, et chaque résistance représente une barre de la cage d'écureuil, ou le rotor est constitué de plusieurs éléments, chaque élément de la cage est décrit par un circuit électrique équivalent de N_r grandeurs. Puis, on a fait la transformation de N_r grandeurs vers deux grandeurs, pour faciliter l'étude. Ce modèle nous a permis de simuler les défauts rotoriques, tels que les cassures de barres rotoriques, ce type de défaut est modélisé par l'augmentation de la résistance de l'élément défectueux. D'après cette étude on conclut que l'exploitation directe des résultats est très difficile pour détecter le défaut, seules les méthodes de diagnostic issu de la machine nous permettent la résolution de ce problème.

Dans le troisième chapitre, on a essayé de donner un aperçu général sur les différentes méthodes de diagnostic et de détection de défaut dans la machine asynchrone à rotor à cage d'écureuil, et on a effectué une simulation de deux méthodes basées sur l'analyse du signal dans le domaine fréquentiel (l'analyse spectrale par la TFCT ou technique de fenêtrage et la méthode du spectrogramme). On a constaté que le choix de la fenêtre et sa largeur joue un rôle très important dans l'analyse fréquentielle du signal (courant statorique) afin d'obtenir une représentation plus significative, riche en informations et qui permet de séparer les composantes les plus proches du fondamental pour pouvoir l'utiliser dans la détection des défauts.

En effet l'analyse de Fourier (TFCT) nous a permis de connaître les différentes fréquences excitées dans un signal, c'est-à-dire son spectre, mais nous n'a pas permis de savoir à quels instants ces fréquences ont été émises. Cette perte de localité dans la TFCT n'est pas un inconvénient pour analyser des signaux dont la fréquence varie dans le temps (statistiquement stationnaires) mais elle devient un problème pour l'étude de signaux non stationnaires.

Dans le dernier chapitre, le calcul de la transformée en ondelettes (TOC) du courant statorique a mené à des résultats très significatifs en terme de localisation temporelle et fréquentielle ou (temps-échelle) des défauts rotoriques de la machine asynchrone à cage d'écurie. La TOC est capable de fournir une représentation simultanée temps-fréquences du signal. En outre, la TOC a été développée comme une alternative à la TFCT, pour palier à quelques défauts de résolution de la TFCT (voir chapitre III, page). Donc on peut conclure que l'opération de diagnostic par l'utilisation de la technique des ondelettes s'avère plus efficace par rapport à la TFCT.

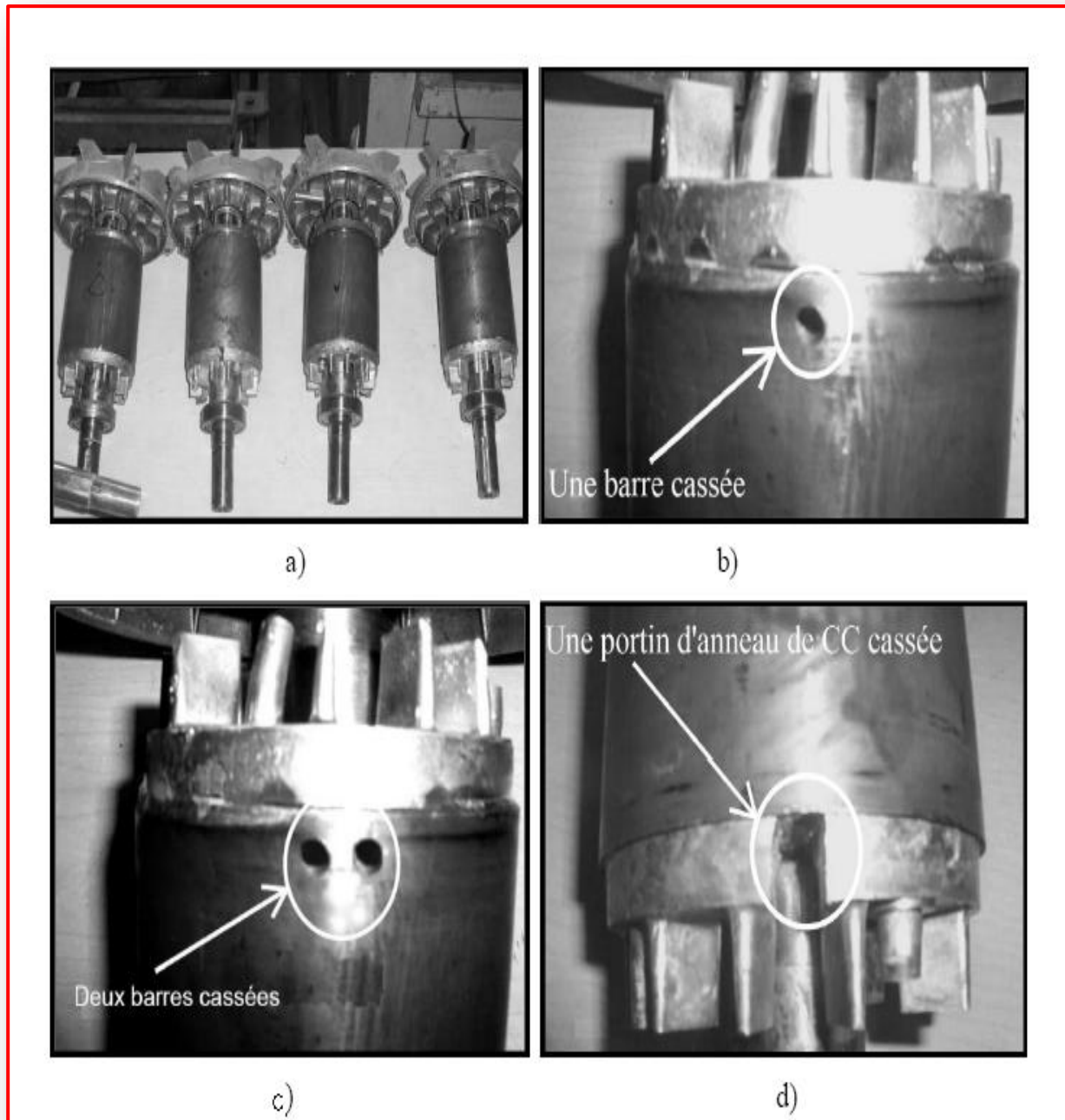
Les résultats obtenus dans le plan temps-échelle (ou temps- fréquences) s'avère particulièrement intéressantes dans la mesure où elle permet de différencier, les différents cas de cassures de barres en terme de temps et de sévérité. L'identification des défauts nécessite l'introduction d'une méthode de diagnostic moderne.

Les perspectives ouvertes par ce mémoire laissent présager d'un champ énorme de développement d'outil et de réflexions nouvelles parmi celles-ci on cite à titre d'exemple :

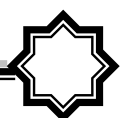
- ✓ Développement d'une procédure de diagnostic basée sur la combinaison de la transformée en ondelettes et la reconnaissance de formes. Le premier outil permet de caractériser le signal en énergie quand au deuxième permet la détection et la classification des défauts.
- ✓ La même démarche pourrait être appliquée à d'autres types de défauts tels que : les défauts de courts-circuits statoriques, défauts d'excentricité...etc.
- ✓ Cette approche pourrait par ailleurs être combinée avec une autre méthode de diagnostic moderne telle que le diagnostic par logique floue, réseaux de neurones ...etc.

Annexes

Annexe [A1] :



Différents types de défauts, (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.



Annexe [A2] : Paramètres des machines étudiées :

Plaque signalétique :

$$U : 220 / 380 \text{ V.}$$

$$I_n = 4.5 / 2.6 \text{ A.}$$

$$\Omega_n = 2850 \text{ tr / min}$$

$$P_n = 1.1 \text{ KW}$$

Les paramètres de la machine utilisée :

$$R_s = 7.828 \ \Omega$$

$$J = 0.006093 \text{ Kg m}^2$$

$$f = 0.00725 \text{ Nm s / rd}$$

$$\text{Rayon} = 0.03575 \text{ m}$$

$$\text{Longueur} = 0.065 \text{ m}$$

$$\text{Entrefer} = 0.00025 \text{ m}$$

$$N_s = 160$$

$$N_r = 16$$

$$L_{sl} = 0.018 \text{ H}$$

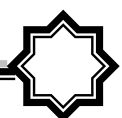
$$R_{bsain} = 150 \cdot 10^{-6} \ \Omega$$

$$R = 0.00165 \ \Omega$$

$$R_e = 72 \cdot 10^{-6} \ \Omega$$

$$L_b = 10^{-7} \text{ H}$$

$$L_e = 10^{-7} \text{ H}$$

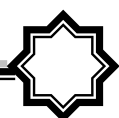


Bibliographie

- [1] M. Sahraoui. « Contribution aux diagnostic des machines asynchrones triphasées à cage », thèse de magistère, Université Mohamed Khider, Biskra, Décembre 2003.
- [2] A. Bouzida. « Diagnostic de défauts de la machine asynchrone à cage par la technique des ondelettes », thèse de magister, l'Ecole Nationale Polytechnique, Janvier 2008.
- [3] I. Boldea et S. Nasar. « The Induction Machine Handbook », CRC Press LLC, Chapter 1, 2002.
- [4] G. Buche. « Commande vectorielle de la machine asynchrone en environnement temps réel Matlab/Simulink », thèse d'Ingénieur, (C, U, E, F, A), mars 2001.
- [5] T. Achour. « Diagnostic de défauts électriques et mécaniques de la machine asynchrone à simple cage d'écureuil », thèse d'Ingénieur, l'Ecole Nationale Polytechnique, Juin 2008.
- [6] N. Lahcène. « Diagnostic de défauts au rotor d'une machine asynchrone à cage d'écureuil », thèse de magister, l'Ecole Nationale Polytechnique, Mai 2005.
- [7] M. Saddeket et H. Djaafar. « Diagnostic de défauts de la machine asynchrone à cage d'écureuil par la méthode de reconnaissance des formes », thèse de d'Ingénieur, l'Ecole Nationale Polytechnique, Mai 2007.
- [8] L. Baghli. « Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques », thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy, janvier 1999.
- [9] E. Schaeffer. « Diagnostic des machines asynchrones modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défauts », thèse de doctorat, Université de Nantes 1999.
- [10] S. Smail et B. Mohamed. « Identification des défauts de la machine asynchrone à cage d'écureuil dans sa partie rotorique », thèse d'Ingénieur, Université de M'sila, juin 2005.
- [11] B. Saad. « Prise en compte d'un défaut rotorique dans la commande d'un moteur asynchrone », thèse de magister, Université Mohamed Khider Biskra, soutenue 2005.
- [12] B. Ammar., T. Bilal et D. Abbas. « Détection des défauts par les réseaux de neurones artificiels de la machine asynchrone contrôlée par la technique du flux orienté », thèse d'Ingénieur, Université de M'sila, juin 2007.
- [13] T. Boumegoura. « Recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue de diagnostic », thèse doctorat Ecole centrale de Lyon, Mars 2001.



- [14] B. Samir et D. Zoheir. « Diagnostic de défauts de la MAS à Rotor à Cage d'écreuil », thèse d'Ingénieur, l'Ecole Nationale Polytechnique, Juin 2006.
- [15] F. Benabida et M. Ouadah. « Diagnostic de défauts au stator et au rotor par estimation paramétrique de la machine asynchrone à cage d'écreuil », thèse d'Ingénieur, l'Ecole Nationale Polytechnique, Juin 2006.
- [16] B. Ahmed et A. Mounir. « Caractérisation de l'état de surface d'un isolateur par technique d'ondelettes et modélisation », thèse d'Ingénieur, l'Ecole Nationale Polytechnique, Juin 2008
- [17] C. Gasquet et P. Witomski. « Analyse de Fourier et application : Filtrage, Calcul numérique et Ondelettes », édition Dunod, Paris 2000.
- [18] I. Daubechies. « The wavelets Transform, Time-frequency Localisation and analysis », IEEE transactions on information theory, vol.36, pp961-1004; 1999.
- [19] M. Ayad, Dj Chikouche. « Application de la transformée en ondelettes à l'analyse des signaux vibratoires d'un système d'engrenage en vue d'un diagnostic précoce », 4th International Conference on computer Integrated Manufacturing CIP'2007, Nov. 2007.
- [20] A. Tarik. « Quelques concepts généraux de la théorie des ondelettes », presse de Département Informatique ESIEE-Paris, 2008.
- [21] « Wavelet Toolbox », User's Guide for Matlab, the MathWorks.
- [22] M. Weeks. « Digital Signal Processing Using MATLAB and Wavelets », Infinity Science Press LLC Hingham, Massachusetts, 2007.



***MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
D'INGENIEUR D'ETAT EN GENIE ELECTROTECHNIQUE***

OPTION : COMMANDE ELECTRIQUE

Proposé et dirigé par : Mr. LAAMARI Yahia

Présenté par : MABREK Toufik & DERRADJ Lazhar

Thème : Détection des défauts rotoriques dans la MAS à cage
par la technique des ondelettes

Resumé

De nos jours, l'utilisation des machines asynchrones dans les systèmes d'entraînements électriques occupe une place clé à cause de leur robustesse, leur puissance massique et à leur coût de fabrication. Leur maintenance et leur surveillance permettent de rentabiliser les installations. Il est donc important de développer des outils de diagnostic pour détecter de manière précoce les défauts pouvant apparaître dans ces machines (cassure de barres rotoriques). La méthode introduite dans notre cas d'étude est basée sur l'utilisation de la technique des ondelettes continues(TOC).

Des défauts ont été créés au rotor par simulation de la machine asynchrone, alimentée à partir du réseau. Les méthodes d'analyse temps-fréquence ou temps-échelle (TOC) utilisées ont montré via leurs résultats obtenus, l'efficacité de l'application de ces techniques dans la détection des défauts rotoriques dans les machines asynchrones à cage.

MotsClés : Machineasynchroneàcage, Transforméeen Ondelettes, Modèle-multi spires, Analyse spectrale, FFT, STFT, CWT, Diagnostic, Détection de défauts, Spectrogramme, Scalogramme.