

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعدحلبالبلدية
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

Guessoum Yacine

&

Laradj Zakaria

pour l'obtention du diplôme master traitement de l'information et système électronique

(TISE)

Thème

Application de l'analyse spectrale aux courants statoriques d'un moteur asynchrone triphasé

Proposé par : Abdelaziz Ferdjouni & El Merraoui Khadidja

Année Universitaire 2015-2016

Remerciements

Nous remercions Dieu, le Tout Puissant, le Miséricordieux qui nous a donné l'opportunité de mener à bien ce travail.

C'est avec un grand plaisir que, nous adressons nos sincères remerciements à l'égard de nos promoteurs Mr Abdelaziz Ferdjouni et Mme Merraoui Khadidja, d'avoir accepté de diriger ce travail.

Nous remercions également tous nos enseignants ayant contribué à notre formation.

Nous ne terminerons pas sans avoir exprimé des remerciements envers toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

ملخص:

الهدف من هذا البحث هو تحليل اشارة تيار لمحرك تزامني ثلاثي الطور من أجل استخلاص العطب التالي :

دائرة قصيرة بين الحلقات في الجزء الثابت

الوسيلة المعتمدة لاستخلاص العطب في المحرك الاتزامني ثلاثي الطور تتمثل في طريقتين الاولى هي تحويل

فوربيه التي تسمح بتمثيل تردد الإشارة و الطريقة الثانية هي تحويل الموجات وهذه الطريقة تمكننا من استخراج

التردد مع المعلومات المتعلقة بالزمن.

كلمات المفاتيح: الآلة الغير متزامنة, دائرة قصيرة بين حلقات الجزء الثابت, تشخيص الأعطاب, الموجات, تحويل

فوربيه

Résumé :

L'objectif de ce travail est d'analyser le comportement d'un moteur et de détecter le défaut de court-circuit de spires.

La méthode de diagnostic des défauts se base sur deux techniques l'une est la transformée de Fourier qui permet de représenter le signal dans le domaine fréquentiel, et la seconde est l'analyse par ondelette qui est une nouvelle méthode de traitement de signaux, qui permet d'extraire les informations temporelles et fréquentielles. Des résultats de simulations ont donnés.

Mots clés : machine asynchrone, Court circuit entre spire, Diagnostic, transformation de Fourier, ondelette.

Abstract :

This work fits into the theme of the monitoring and fault diagnosis of squirrel cage induction machine. The considered fault is the inter-turn short circuit.

The thematic fault diagnosis is based on the application of two techniques of signal processing which is an effective solution of the fault diagnosis problem: one is based on spectral analysis of the stator current using FFT and the second analysis from using the wavelet technique, through the decomposition into discrete "multilevel" we can extract the necessary information for the diagnostic of fault of the operating machine.

Keywords : asynchronous machine, inter turn short circuit, diagnosis, FFT, wavelet.

Table des matières :

Introduction Générale.....	1
Chapitre 1	Généralités sur l'analyse par ondelettes
1.1 Introduction.....	2
1.2 Fréquence, échelle, résolution et période.....	3
1.2.1 La fréquence	3
1.2.2 L'échelle.....	3
1.2.3 La période.....	3
1.3 La Transformation de Fourier	3
1.4 Les ondelettes.....	5
1.4.1 Transformée en ondelettes continue (TOC).....	5
1.4.2 Transformée en Ondelettes Discrète (TOD).....	6
1.4.3 Inversion.....	6
1.5 Algorithme d'analyse	7
1.5.1 Projection sur les fonctions d'échelle	7
1.5.2 Projection sur les fonctions ondelettes	9
1.6 Quelques types d'ondelettes.....	11
1.6.1 Ondelette de Haar.....	11
1.6.2 Ondelette à support compact (Daubechies).....	13
1.7 Conclusion	15
Chapitre 2	diagnostic de défaut de la machine asynchrone triphasée
2.1 Introduction.....	16
2.2 Généralités	16
2.2.1 Constitution de la machine asynchrone.....	16
2.2.2 Le stator.....	17
2.2.3 Le rotor	18
2.3 Fonctionnement du moteur	19
2.3.1 Fonctionnement à vide.....	19
2.3.2 Fonctionnement en charge	19
2.4 Défauts de la machine asynchrone triphasée.....	24

2.4.1 Défaillances au stator	22
2.5 Type de diagnostic.....	22
2.5.1Diagnostic inductif.....	22
2.5.2 Diagnostic déductif.....	22
2.5.3Diagnostic invasif.....	23
2.5.4Diagnostic non invasif.....	23
2.6 Méthode de diagnostic des défauts basée sur le traitement du signal.....	24
2.6.1 Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite.....	24
2.6.2 Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites.....	24
2.6.3 Diagnostic par mesure du couple électromagnétique et de la vitesse rotorique.....	25
2.6.4 Diagnostic par mesure du courant statorique.....	25
2.6.5 Diagnostic des défauts par analyse du vecteur de Park.....	26
2.7 Détection d'un court-circuit de spires.....	26
2.8 Détection d'une barre cassée.....	26
2.9 Détection Indicateurs d'excentricité.....	27
2.10 Détection défauts de roulement.....	28
2.10.1Fréquences caractéristiques et techniques de détection.....	29
2.11Conclusion.....	30

**Chapitre 3 diagnostic de défaut statorique de la machine asynchrone par
la technique des ondelettes**

3.1Introduction.....	31
3.2 Les coefficient d'approximations.....	32
3.3 Représentation d'état la machine asynchrone.....	32
3.4 La lecture d'une fréquence de signal par la transformation d'ondelette.....	34
3.5 Résultat de la simulation.....	37
3.5.1Cas sans défaut en vide et en charge.....	37
3.5.2 Cas d'un défaut court-circuit entre spire.....	41
3.5.2.1 Analyse spectrale du courant statorique par FFT.....	45
3.5.2.2 Analyse du courant statorique par la technique des ondelettes.....	46
3.5.2.3 Analyse du courant statorique par la décomposition multi niveau d'ondelette.....	46

3.6 Conclusion.....	49
Conclusion générale	50
Annexes.....	51
Bibliographie.....	53
liste des figures	
Figure 1.1 : Algorithme d'analyse de Mallat.....	11
Figure 1.2 : Algorithme de reconstruction de Mallat.....	12
Figure 1.3 : Fonction d'échelle de l'analyse de Haar.....	13
Figure 1.4 : Fonction ondelette de l'analyse de Haar.....	13
Figure 1.5 : Fonction d'échelle de l'analyse de Daubechies.....	14
Figure 1.6 : Fonction ondelette de l'analyse de Daubechies.....	14
Figure 2.1 : machine asynchrone.....	17
Figure 2.2 : stator.....	17
Figure 2.3 : Le rotor.....	18
Figure 2.4 : point de fonctionnement.....	19
Figure 2.5 : classification selon Thomsen.....	21
Figure 2.6 : classification selon Bonnett	21
Figure 2.7 : Rotor avec une barre rotorique cassée.....	27
Figure 2.8 : a) rotor centré, b) rotor excentré.....	27
Figure 2.9 : construction typique d'un roulement à billes.....	29
Figure 3.1 : Analyse multirésolution.....	31
Figure 3.2 signal d'origine	32
Figure 3.3 coefficients d'approximation.....	32
Figure 3.4 Signal d'original	33
Figure 3.5 les coefficients D'approximations.....	33
Figure 3.6 Les Coefficients d'détails.....	33
Figure 3.7 fft du courant isa (f= 55 Hz).....	34
Figure 3.8 TO du courant isa (f= 55 Hz).....	34

Figure 3.9	fft du courant isa (f= 50 Hz).....	35
Figure 3.10	TO du courant isa (f= 50 Hz).....	35
Figure 3.11	fft du courant isa (f= 40 Hz).....	35
Figure 3.12	TO du courant isa (f= 40 Hz).....	36
Figure 3.13	Les courant isd isq et is0	38
Figure 3.14	Zoom sur les courant isd isq et is0	38
Figure 3.15	Couple électromagnétique de la machine sain	39
Figure 3.16	Vitesse de la machine saine.....	39
Figure 3.17	Flux Phd Phq et Ph0	39
Figure 3.18	Zoom sur les flux Phd Phq et Ph0	40
Figure 3.19	Les courants statorique isa isb et isc	40
Figure 3.20	Zoom sur les courants statorique isa isb et isc	41
Figure 3.21	Les courant isd isq et is0	42
Figure 3.22	Zoom sur les courant isd isq et is0	42
Figure 3.23	Couple électromagnétique de la machine avec défaut	43
Figure 3.24	Vitesse du moture avec défaut de court-circuit	43
Figure 3.25	Flux Phd Phq et Ph0	44
Figure 3.26	Zoum sur les flux Phd Phq et Ph0	44
Figure 3.27	Les courants statorique avc un défaut dans la phase « A »	44
Figure 3.28	fft du courant isa (f= 50 Hz)cas de la machine saine.....	45
Figure 3.29	fft du courant isa (f= 50 Hz) cas de la machine en défautCC entre spires (25%).....	45
Figure 3.30	TO du courant isa sans défaut (f= 50 Hz)	47
Figure 3.31	TO du courant isa avec défaut (f= 50 Hz)	47
Figure 3.32	TO du courant isb avec défaut (f= 50 Hz)	48
Figure 3.33	TO du courant isa avec deux défaut l'un dans isa et l'autre dans isb(f= 50 Hz)	48
Figure 3.34	TO du courant isb avec deux défaut l'un dans ias et l'autre dans ibs(f= 50 Hz)	49

Conclusion générale

Ce mémoire a été consacré à la modélisation et à l'utilisation des méthodes de diagnostic en vue de la surveillance des entraînements électriques, et plus particulièrement la machine asynchrone à cage d'écureuil.

L'étude est basée sur deux objectifs principaux, le premier est la modélisation et la simulation des défauts statorique et rotorique et le second c'est l'utilisation de deux méthodes d'analyse du signal en vue du diagnostic et la détection des défauts dans la machine, l'une à base de la transformation de Fourier rapide (FFT) et l'autre est la transformation d'ondelette (TOD).

Pour mener cette étude, une modélisation et la simulation dans le repère de Park des défauts de court circuit entre spire de la phase as, un modèle simple de défaut basé sur l'association de modèle réellement représentatifs des défauts avec le mode commun (sain) et le mode différentiel (de défaut). Deux techniques de détection sont utilisées ou l'effet du défaut se manifeste par l'analyse FFT du courant statorique à travers l'apparition des raies de défaut à la fréquence de 150Hz pour le type de défauts ; .L'utilisation de l'analyse par ondelette discrète (TOD), « multi niveau »

Qui se base sur la décomposition du signal du courant à des signaux d'approximation et de détail.

1.1 Introduction

L'analyse par ondelettes a été introduite au début des années 1980 dans le contexte de l'analyse des signaux d'exploration pétrolière [1]. Il s'agit à l'époque de donner une représentation des signaux permettant la mise en valeur simultanément des informations temporelles et fréquentielles (localisation temps-fréquence).

En 1984, P. Goupillaud, A. Grossmann et J. Morlet [2], poussés par les exigences croissantes de la recherche d'hydrocarbures, proposent une méthode de reconstruction des signaux sismiques multidimensionnels permettant une restauration des hautes fréquences à l'aide d'une représentation temps-fréquence.

C'est ainsi que le "besoin" des ondelettes, famille de fonctions déduites d'une même fonction (appelée ondelette mère) par opérations de translations et de dilatations, s'est fait ressentir en remarquant que la transformée de Fourier, qui a dominée dès le début du 19^{ème} siècle, "perd" lors de la projection le "contrôle" de la variable temporelle et reste toujours incapable de décrire localement (en temps ou espace) le comportement fréquentiel des signaux.

L'idée originale sur laquelle sont basées les ondelettes est apparue vers les années 1940 grâce au physicien Denis Gabor, (prix Nobel de physique, en 1971, pour l'invention de l'holographie), qui a introduit la notion de la transformée de Fourier à fenêtrage glissant dans le but de remédier au problème de localisation temps-fréquence en proposant de multiplier le signal par une fonction localisée dans le temps (fenêtre) et ensuite appliquer la transformée de Fourier. L'inconvénient de cette transformée est que la taille et la forme de la fenêtre sont inchangées au cours de l'analyse. Or, pour étudier un signal qui a, en général, une allure irrégulière, il est potentiellement intéressant de pouvoir changer la forme de la fenêtre analysante en temps. C'est à partir de là que sont nées les ondelettes qui s'adaptent d'elles-mêmes[5].

1.2 Fréquence, échelle, résolution et période

1.2.1 La fréquence est un attribut physique d'un processus ou d'un signal. La fréquence est une quantité physique bien définie et mesurée.

1.2.2 L'échelle peut être vue selon deux manières : l'« échelle du processus » et « l'échelle d'observation ». L'échelle du processus est l'échelle à laquelle le phénomène naturel existe et qui n'est donc pas sous notre contrôle. Typiquement, elle est caractérisée en termes de [3] :

- durée de vie,
- période,
- longueur de corrélation du processus.

L'échelle d'observation dépend, quant à elle, de la façon dont on décide de mesurer le phénomène. Ainsi, l'échelle d'observation est définie en termes de :

- d'extension temporelle ou spatiale,
- de distance entre points d'échantillonnage.

L'extension temporelle ou spatiale fixe le champ d'observation; la distance entre les points d'échantillonnage représente la résolution du signal. Le terme d'échelle fera alors référence à une certaine mesure de la largeur de l'ondelette. Plus l'échelle augmentera, plus la portion du signal analysé localement par l'ondelette sera grande et plus les détails seront lissés.

1.2.3 La période est l'inverse de la fréquence. Quelle que soit l'ondelette, il existe une relation bijective entre échelle et période. Cette relation peut être déduite en calculant la transformée en ondelette d'une sinusoïde pure de fréquence connue et en cherchant pour quelle échelle le spectre d'ondelette atteint son maximum [7].

1.3 La Transformation de Fourier

Il est important de comprendre la transformation de Fourier pour passer au traitement du signal. La transformation de Fourier repose sur le principe suivant: toutes les fonctions

sont décomposables en une somme de cosinus et de sinus à des fréquences différentes. Cette dernière permet de les voir dans un repère (Amplitude/Fréquence) [7].

$$f_F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (1.1)$$

La transformation de Fourier ne pose pas de problèmes pour un signal stationnaire. Mais cela devient très problématique pour un signal dans lequel la fréquence varie très fortement au cours du temps. On perd ainsi complètement l'information temporelle. La plupart des signaux du monde réel ne sont pas stationnaires, et c'est justement dans l'évolution de leurs caractéristiques (statistiques, fréquentielles, temporelles,) que réside l'essentiel de l'information qu'ils contiennent. Les signaux vocaux sont, à ce titre, exemplaires. Or, l'analyse de Fourier propose une approche globale du signal, les intégrations sont réalisées de moins l'infini à plus l'infini, et toute notion de localisation disparaît dans l'espace de Fourier. Il faut donc trouver un compromis sur une transformation qui renseigne sur le contenu fréquentiel tout en préservant la localisation afin d'obtenir une représentation temps/fréquence du signal. La première solution qui vient naturellement à l'esprit est de limiter le domaine d'intégration temporel à l'aide d'une fonction fenêtre que l'on pourra faire glisser pour explorer le signal; on obtient ainsi la transformée de Fourier à fenêtre glissante (équation 1.2). [7].

$$f(\omega, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(s) g(s-t) e^{-j\omega s} ds \quad (1.2)$$

Un certain nombre de fonctions fenêtres sont utilisées, les plus connues sont les fenêtres de Hanning, de Hamming et de Gauss .

Dans ce cas, on comprend que l'analyse n'est pas idéale car si une résolution temporelle faible est automatiquement liée à la détection des basses fréquences, la détection des composantes hautes fréquences du signal peut être faite avec une résolution temporelle supérieure. Les deux résolutions doivent varier en sens inverse en conservant un produit constant pour un pavage régulier de l'espace temps-fréquence.

Ceci doit conduire à une utilisation rationnelle de cet espace par la réalisation de tous les cas, du meilleur compromis possible entre la résolution temporelle et la résolution fréquentielle. [4].

1.4 Les ondelettes

La transformée en ondelettes a été développée comme une approche alternative à la transformée de Fourier à court terme pour surmonter le problème des résolutions temporelle et fréquentielle d'un côté, et la non-stationnarité des signaux de l'autre côté.

La transformée en ondelette remplace la sinusoïde de la transformée de Fourier par une famille de translations et dilatations d'une même fonction, l'ondelette. Les paramètres de translation et de dilatation permettent de localiser l'information dans un signal en le représentant à différents niveaux de détails allant d'une approximation grossière et globale à des représentations plus précises et plus localisées.

En effet, la transformée en ondelette est considéré comme un microscope mathématique qui découpe le signal analysé en composantes fréquentielles suivant une résolution adaptée à l'échelle.

La principale caractéristique d'une fonction ondelette est son support compact, c'est-à-dire que la fonction d'ondelette est limitée à la fois dans les domaines du temps et de la fréquence. La fonction est donc considérée comme nulle à l'extérieur de ce support, bien qu'il soit possible d'utiliser comme ondelette une fonction qui est négligeable mais pas tout à fait nulle en dehors du support; celui-ci est alors dit effectif compact .

1.4.1 Transformée en ondelettes continue (TOC)

Cette transformation est définie dans [4] par :

$$f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1.4)$$

Dans cette expression, a est le facteur d'échelle et b le paramètre de translation.

La variable a joue le rôle de l'inverse de la fréquence : plus a est petit moins l'ondelette (la fonction analysante) est entendue temporellement, donc plus la fréquence centrale de son spectre est élevée.

On peut également interpréter cette expression comme une projection du signal sur une famille de fonctions analysantes $\psi_{a,b}$ construites à partir d'une fonction « mère » ψ conformément à l'équation (1.5).

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1.5)$$

On pourra noter :

$$f(a,b) = \langle f, \psi_{a,b} \rangle \text{ représente le produit scalaire} \quad (1.6)$$

1.4.2 Transformée en Ondelettes Discrète (TOD)

La transformation d'ondelette discrète utilise un facteur d'échelle et une translation discrétisée. On appelle transformée en ondelettes discrète dyadique toute base d'ondelettes travaillant avec un facteur 2^m .

Pour des applications d'analyse du signal, on choisit de restreindre les valeurs des paramètres de dilatation-translation (a,b) à un sous ensemble discret. On posera donc : $a = a_0^m$ et $b = nb_0 a_0^m$ avec $a_0, b_0 \in \mathbb{Z}$, d'où l'expression de la TOD dans [4] est:

$$f(m,n) = a_0^{-\frac{m}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi(a_0^{-m} t - nb_0) dt \quad (1.7)$$

Si on choisit $a_0 = 2$ et $b_0 = 1$, on parle alors de transformée dyadique.

1.4.3 Inversion On peut montrer que si la fonction analysante (l'ondelette) est convenablement bien choisie, la transformation en ondelettes est inversible [4]. La fonction peut être reconstruite après analyse, suivant l'équation (1.8) :

$$f = C_{\psi}^{-1} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{a^2} \langle f, \psi_{a,b} \rangle \psi_{a,b} da db \quad (1.8)$$

Cette possibilité reste théorique car le calcul n'est possible que numériquement et sa convergence peut-être très lente. Le coefficient C_{ψ} , s'il existe, est donné par l'équation (1.9) :

$$C_{\psi} = 2\pi \int_{-\infty}^{+\infty} |\hat{\psi}(\omega)|^2 \frac{d\omega}{\omega} \quad (1.9)$$

$\Psi(\omega)$: La Transformée de Fourier de $\psi(t)$

La condition d'existence de ce coefficient est également la condition d'admissibilité de la fonction ondelette analysante. Cette condition est explicitée par l'équation (1.10) :

$$\int_0^{+\infty} |\hat{\psi}(\omega)|^2 \frac{d\omega}{|\omega|} = \int_{-\infty}^0 |\hat{\psi}(\omega)|^2 \frac{d\omega}{|\omega|} < \infty \quad (1.10)$$

Cette relation se ramène le plus souvent à la condition exprimée par l'équation (1.11) qui n'est pas très contraignante et indique seulement que la fonction ondelette doit être à moyenne nulle. $\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0$ (1.11)

Le choix de l'ondelette est donc en principe très ouvert, il faut cependant noter que la robustesse et la vitesse de convergence de l'algorithme de reconstruction donné par l'équation (1.9) sont très dépendantes du choix de l'ondelette. Il est clair enfin, que la transformée en ondelettes ne sera intéressante comme outil d'analyse du signal que si la fonction analysante (l'ondelette) reste bien localisée dans le temps et en fréquence.

1.5 Algorithme d'analyse

1.5.1 Projection sur les fonctions d'échelle

Le point clef est fourni par la décomposition de $a_n^j = \langle f, \varphi_{j,n} \rangle$ en fonction de $a_n^{j-1} = \langle f, \varphi_{j-1,n} \rangle$.

Par construction $\varphi(x)$ est une fonction de V_0 ; comme $V_0 \subset V_{-1}$ (V_0 : espace de départ V_{-1} approximation niveau 1) on peut décomposer $\varphi(x)$ sur la base de V_{-1} . Et donc $\exists h(n)$ une suite numérique avec $n \in \mathbb{Z}$ tel que :

$$\varphi(x) = \sum_n h_n \varphi_{-1,n}(x) \quad (1.12)$$

Avec, conformément $\varphi_{-1,n}(x) = 2^{1/2} \varphi(2x - n)$ soit :

$$h(n) = \langle \varphi, \varphi_{-1,n} \rangle \quad (1.13)$$

La suite numérique $h(n)$ sera considérée comme étant la réponse impulsionnelle d'un filtre numérique. La construction de cette suite peut être menée à partir de la donnée de $\varphi(x)$ et qu'un choix de $h(n)$ étant fait (certaines conditions sont à respecter), la fonction d'échelle peut être déterminée. On pourra donc définir une analyse multirésolution indifféremment en partant de la fonction d'échelle ou du filtre numérique associé.

Il faut noter que cette dualité d'approche correspond à l'existence de deux écoles : les traiteurs de signal continu qui ont abordé le problème par les fonctions de projection et les traiteurs de signal discrets qui ont travaillé sur le filtrage et sur les « bancs de filtres ». Il a été largement reconnu et démontré que ses deux approches reposaient en fait sur les mêmes concepts de base [7].

La norme se conservant à travers les échelles :

$$\sum_n h^2(n) = 1 \quad (1.14)$$

Montrons que la décomposition est la même pour des échelles quelconques.

On a :

$$\varphi(x) = \sum_n h(n) 2^{1/2} \varphi(2x - n) \quad (1.15)$$

Donc :

$$\varphi_{j,n}(x) = 2^{-j/2} \sum_k h(k) 2^{1/2} \varphi(2(2^{-j}x - n) - k) \quad (1.16)$$

Ce qui en regroupant les indices et les exposants conduit à l'équation :

$$\varphi_{j,n}(x) = \sum_k h(k) \varphi_{j-1,k+2n} \quad (1.17)$$

Donc on peut calculer les coefficients $a_n^j = \sum_k h(k) \langle f, \varphi_{j,n} \rangle$ de l'approximation à la résolution j :

$$a_n^j = \sum_k h(k) \langle f, \varphi_{j-1,k+2n} \rangle \quad (1.18)$$

Si on pose $l = k + 2n$, cette expression s'écrit :

$$a_n^j = \sum_l h(l - 2n) \langle f, \varphi_{j-1,l} \rangle \quad (1.19)$$

Et si on note : $\tilde{h}(n) = h(-n)$ la séquence retournée ou le filtre symétrique de h , on obtient :

$$a_n^j = \sum_l \tilde{h}(2n - l) \langle f, \varphi_{j-1,l} \rangle \quad (1.20)$$

et on aura finalement l'équation récursive suivante :

$$a_n^j = \sum_l \tilde{h}(2n - l) a_l^{j-1} \quad (1.21)$$

Si on considère a_n^j comme une séquence numérique indexée par n , le calcul précédent peut être interprété comme un produit de convolution entre \tilde{h} et a^{j-1} évalué pour un indice sur deux ; ou encore comme le filtrage de la séquence a^{j-1} par le filtre de réponse impulsionnelle \tilde{h} suivi par un sous-échantillonnage de rapport 2.

1.5.2 Projection sur les fonctions ondelette

$g(n)$ sera également considérée comme la réponse impulsionnelle d'un filtre numérique ; nous verrons que ce filtre est lié au filtre $h(n)$ et qu'il peut être construit à partir de ce dernier. Un calcul analogue en tous points au précédent permet d'écrire les coefficients de détail :

$$d_n^j = \langle f, \psi_{j,n} \rangle \quad (1.22)$$

$$d_n^j = \sum_k g(k) \langle f, \varphi_{j-1, k+2n} \rangle \quad (1.23)$$

On introduit également le filtre symétrique dont la réponse impulsionnelle correspond à la séquence $g(n)$ retournée :

$$\tilde{g}(n) = g(-n) \quad (1.24)$$

La décomposition en ondelettes à l'échelle j pourra donc s'écrire :

$$d_n^j = \sum_l \tilde{g}(2n - l) \langle f, \varphi_{j-1, l} \rangle \quad (1.25)$$

ou encore :

$$d_n^j = \sum_l \tilde{g}(2n - l) d_l^{j-1} \quad (1.26)$$

Cette relation sera interprétée de la même manière que précédemment. On constate que l'algorithme de décomposition est très simple car les filtres $h(n)$ et $g(n)$ impliqués sont très courts. En fait le signal numérique à la résolution inférieure est obtenu par un calcul de moyenne entre le point étudié et son plus proche voisin, tandis que le signal de détail (perdu lors du changement de résolution) est obtenu en faisant la différence entre le point étudié et son plus proche voisin, le tout à un facteur de normalisation près.

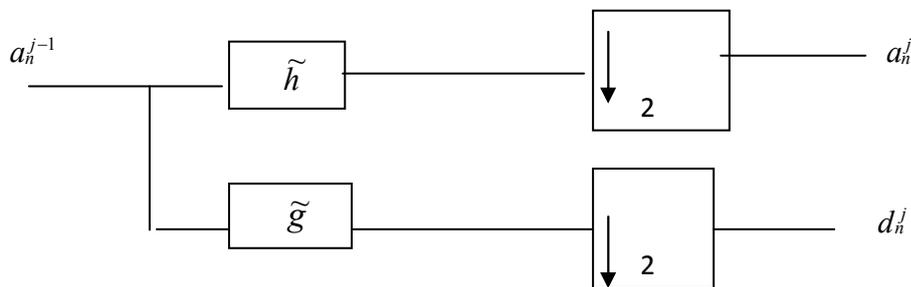


Figure 1.1 Algorithme d'analyse de Mallat.

$$a_n^{j-1} = \sum_k a_k^j h(n - 2k) + \sum_k d_k^j g(n - 2k) \quad (1.27)$$

Cette équation est une somme d'équations de filtrage (produits de convolution) si on remplace la suite a_k^j par une suite a_l^j qui coïncide avec a_k^j pour $l = 2k$; $a_{2k}^j = a_k^j$ et qui est nulle pour les valeurs de l intermédiaires (et de même pour la suite d_k^j).

$$a_k^j = \{.,.,.,.,.,.\} \text{ et } a_l^j = \{.,0,.,0,.,0,.,0,.,0\} \quad (1.28)$$

Cette opération qui consiste à intercaler un zéro entre les échantillons d'une série s'appelle sur-échantillonnage.

L'équation 1.27 s'écrit :

$$a_n^{j-1} = \sum_l a_l^j h(n-l) + \sum_l d_l^j g(n-l) \quad (1.29)$$

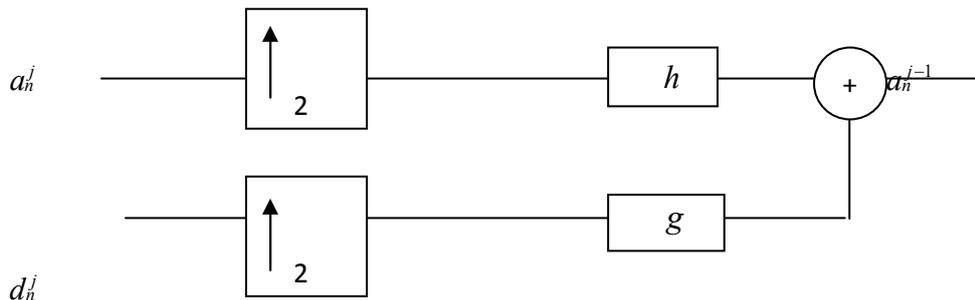


Figure 1.2 : Algorithme de reconstruction de Mallat.

La figure(1.2) présente l'algorithme de synthèse ou de reconstruction.

Les algorithmes d'analyse et de reconstruction que nous venons de présenter sont appelés algorithmes de Mallat ou parfois algorithmes pyramidaux.

On peut dire en conclusion que le calcul de la transformée en ondelettes discrète sur des bases orthonormées se ramène à des opérations de filtrage numérique suivies de sous échantillonnage.

La reconstruction est parfaite et s'effectue également par des filtrages numériques précédés de sur-échantillonnage. Les mêmes filtres (à un renversement du temps près) sont utilisés dans les deux cas.

1.6 Quelques types d'ondelettes

1.6.1 Ondelette de Haar

On prend comme point de départ, la construction de la fonction de Haar utilisée comme mère des fonctions d'échelle. La fonction d'échelle de l'analyse de Haar est donnée dans [4] par l'équation (1.30) et représentée par la figure (1.3).

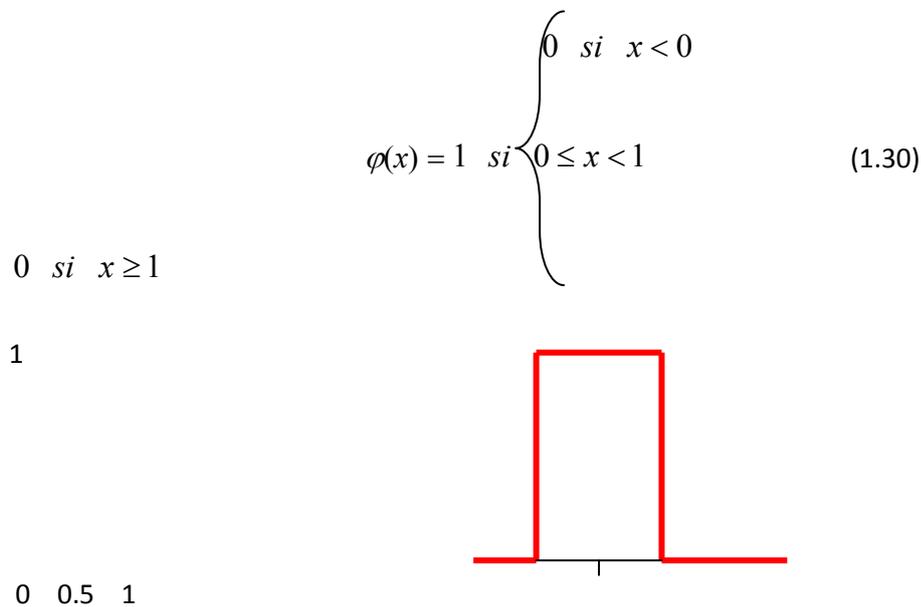


Figure 1.3 : Fonction d'échelle de l'analyse de Haar.

L'ondelette mère de l'analyse de Haar est donnée dans [4] par l'équation (1.31) et représentée par la figure 1.4.

$$\psi(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 0 \\ 1 & \text{si } 0 \leq x < 1/2 \\ -1 & \text{si } 1/2 \leq x < 1 \\ 0 & \text{si } x \geq 1 \end{cases} \quad (1.31)$$

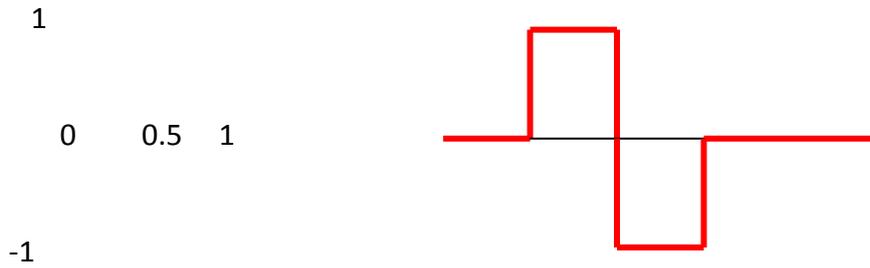


Figure 1.4 : Fonction ondelette de l'analyse de Haar.

1.6.2 Ondelette à support compact (Daubechies)

On présente dans ce paragraphe, la construction d'une famille de bases d'ondelettes et des filtres associés qui assure la compacité des supports tout en préservant l'orthonormalité. Le prix à payer est l'abandon de la linéarité en phase ou plus simplement de la symétrie droite-gauche. L'avantage de la compacité des fonctions de base et surtout des filtres associés, est l'économie en coût de calcul qu'elle procure.

Le filtrage peut s'effectuer directement par l'application de masques de convolution courts et des applications temps réel sont facilement envisageables. Ces bases ont été proposées pour la première fois dans le cadre de l'analyse multirésolution en ondelettes par Ingrid Daubechies en 1988. Ces ondelettes n'ont aucune expression explicite excepté l'ondelette de Haar (qui est l'ondelette de Daubechies d'ordre 1), mais le module carré de la fonction de transfert du filtre numérique h associée à la fonction d'échelle $\varphi(x)$ est explicite et assez simple.

L'expression de la fonction de transfert est donnée dans [4] par :

$$H(z) = \left[\frac{1+z}{2} \right]^N \cdot H_N(z) \quad (1.32)$$

N : ordre d'ondelettes

Le deuxième facteur : $H_N(z)$ est un filtre à N coefficients.

Exemple : pour N=4

$$H(z) = \frac{(1+z)^4}{16} \cdot (3.6860z^3 - 3.3066z^2 + 1.20436z - 0.1696) \quad (1.33)$$

Exemple: pour N=6

$$H(z) = \frac{(1+z)^6}{16} \cdot (7.13860z^5 - 11.17572z^4 + 8.04775z^3 - 3.24691z^2 + 0.71943z - 0.06895) \quad (1.34)$$

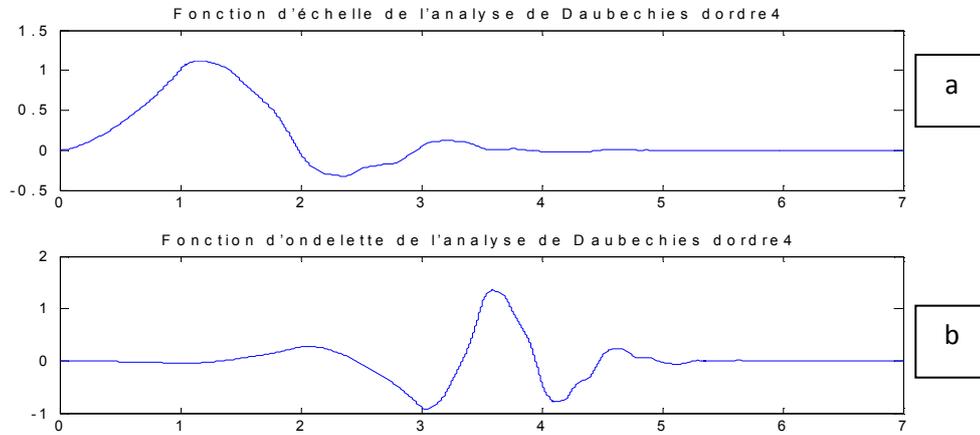


Figure 1.5 : a-Fonction d'échelle de l'analyse de Daubechies d'ordre 4.

b- Fonction d'ondelette de l'analyse de Daubechies d'ordre 4.

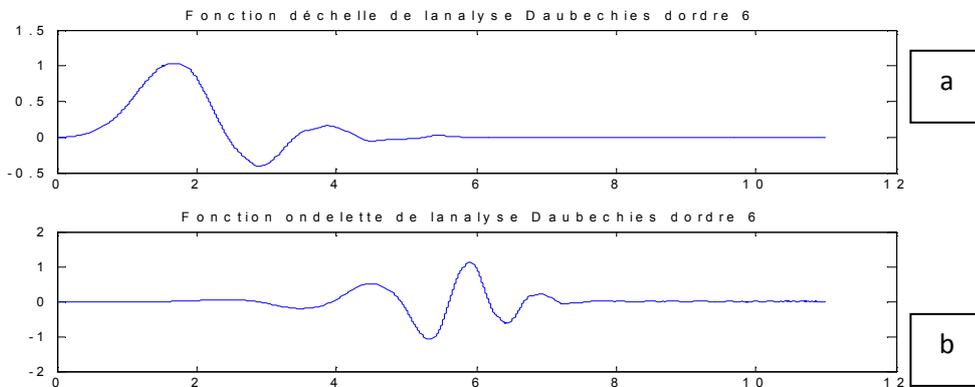


Figure 1.6 : a-Fonction d'échelle de l'analyse de Daubechies d'ordre 6.

b- Fonction d'ondelette de l'analyse de Daubechies d'ordre 6.

Pour des valeurs élevées de N (l'ordre), la précision des calculs peut poser problème et l'orthonormalité des bases obtenues peut alors n'être qu'approximative. De la figure (1.6), on constate que lorsque l'ordre des polynômes augmente, la fonction d'échelle gagne en régularité et voit son étendue spectrale diminuer ; cette évolution apparaît de la même façon pour les ondelettes. Elle se paie évidemment par l'allongement des filtres associés.

1.7 Conclusion

Les ondelettes sont considérées comme une découverte importante en mathématiques appliqués. Dans plusieurs domaines d'applications où l'analyse de Fourier était habituellement utilisée, elles ont proposé une voie alternative souvent mieux adaptée à la nature des signaux étudiés. L'étude qui a été menée dans ce chapitre a permis de mieux cerner les bases théoriques, les propriétés et les caractéristiques de la transformée en ondelettes, et mieux apprécier ses avantages et ses inconvénients.

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.

2.1 Introduction

La machine asynchrone est la plus utilisée dans le domaine des puissances allant de quelques centaines de Watt à plusieurs kiloWatt. Elle présente de nombreux avantages tels que sa puissance massique, sa robustesse, sa facilité de mise en œuvre, son faible coût, etc.... L'apparition dans les années 1980 des variateurs permettant de faire varier la fréquence de rotation dans une large gamme a grandement favorisé son développement. En effet, elle entre dans la conception de nombreux procédés industriels associant des convertisseurs statiques et des machines électriques (traction électrique, laminoirs, lavage, pompage, etc....).

Bien que la machine asynchrone soit robuste, elle peut présenter comme toute autre machine électrique, des défaillances d'ordre électrique ou mécanique. Ainsi, en raison des conséquences importantes et coûteuses que peut engendrer l'apparition d'un défaut sur les processus industriels, le diagnostic des défauts fait l'objet de nombreux travaux de recherche depuis les deux dernières décennies.

2.2 Généralités

La machine asynchrone triphasée est constituée d'un stator (inducteur) et d'un rotor (induit).

2.2.1 Constitution de la machine asynchrone

Le stator et le rotor sont constitués de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles sont placés les enroulements. Le stator est fixe ; on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor est monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieure ou sont fermés sur eux-mêmes en permanence, on définit deux types de rotor : bobiné ou à cage d'écureuil. Toutefois, il est admis que sa structure est électriquement équivalente à celle d'un rotor bobiné dont les enroulements sont en court-circuit. Les éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil sont illustrés dans la figure (2.1).

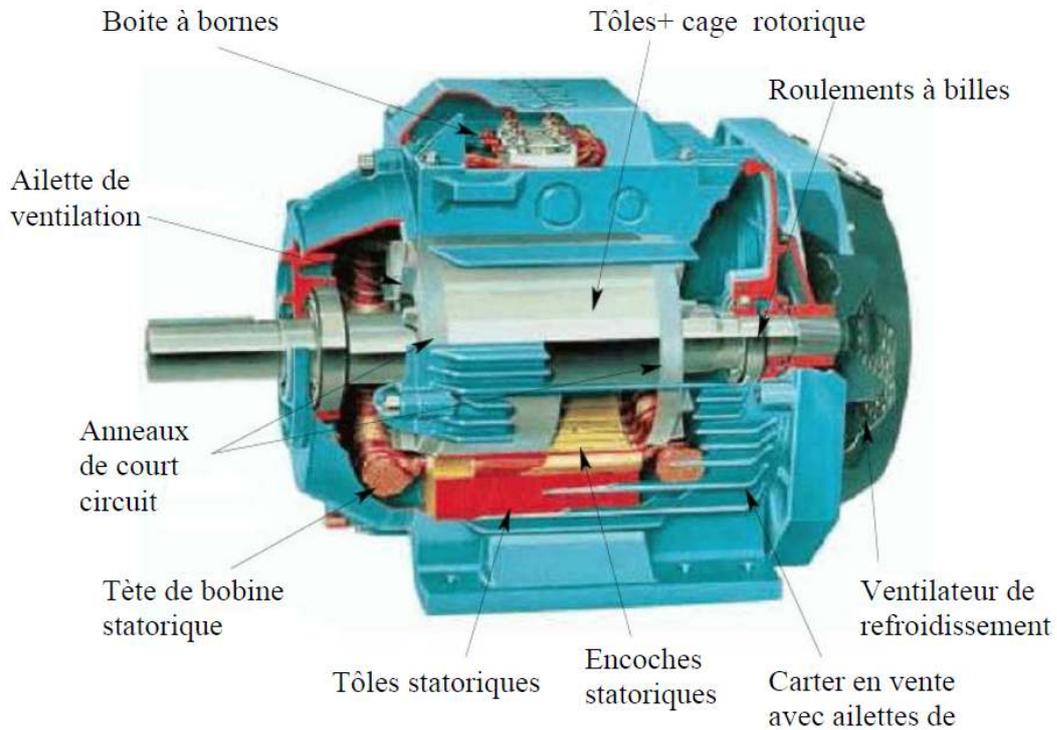


Figure 2.1 : machine asynchrone

2.2.2 Le stator

Le stator est composé de 3p bobines alimentées par un système de tension triphasées de fréquence f .

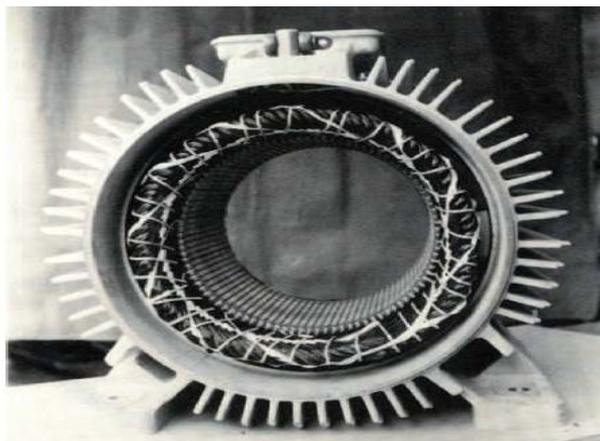


Figure 2.2 : stator

Ces 3p bobines créent un champ magnétique tournant à la pulsation de synchronisme

Ω_s qui se répartit sinusoïdalement dans l'entrefer (espace entre le rotor et le stator) de la machine. Ω_s est donnée par la relation :

$$\Omega_s = \omega / P \quad (2.1)$$

Avec : $\omega = 2\pi f$ en [rad / s] ; p : nombre de paires de pôles et Ω_s : vitesse angulaire en [rad/ s]

La vitesse de rotation synchrone n_s du champ magnétique tournant est :

$$n_s = \frac{f}{p} = \Omega_s / (2\pi) \quad (2.2)$$

2.2.3 Le rotor

Le rotor peut-être « à cage d'écureuil » ou bobiné. Le rotor ne possède aucune liaison électrique avec le stator. Le rotor constitue un circuit électrique fermé où se créent des courants induits qui entraînent sa mise en rotation. Le rotor tourne à la vitesse n qui est inférieure à la vitesse synchrone.

On dit que le rotor glisse par rapport au champ magnétique tournant; on parle alors de glissement qui dépend de la charge

On définit le glissement par :

$$g = (n_s - n) / n_s = (\Omega_s - \Omega) / \Omega_s \quad (2.3)$$

(g est grandeur sans unité ou en %).

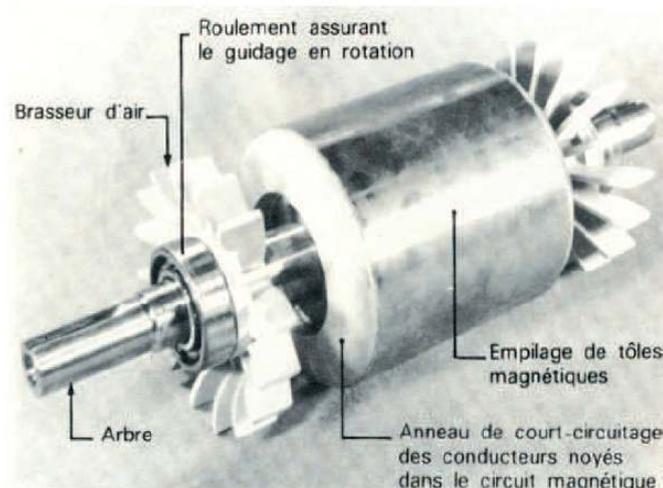


Figure 2. 3 Le rotor

2.3 Fonctionnement du moteur

2.3.1 Fonctionnement à vide

Lorsque le moteur fonctionne à vide (pas de charge couplée au moteur), sa vitesse de rotation n_0 est proche de la vitesse de synchronisme n_s . On considère que $g=0$ et $n_0 = n_s$

2.3.2 Fonctionnement en charge

Au voisinage du point de fonctionnement, on assimile la caractéristique $T_U(n)$ à une droite telle que :

$$T_U = a.n + b \quad (2.4).$$

Les coefficients a et b se trouvent en utilisant deux points de la caractéristique.

Le premier est le fonctionnement à vide : $T_U = 0$ et $n = n_s$

Le deuxième est le fonctionnement nominale $T_U = T_N$

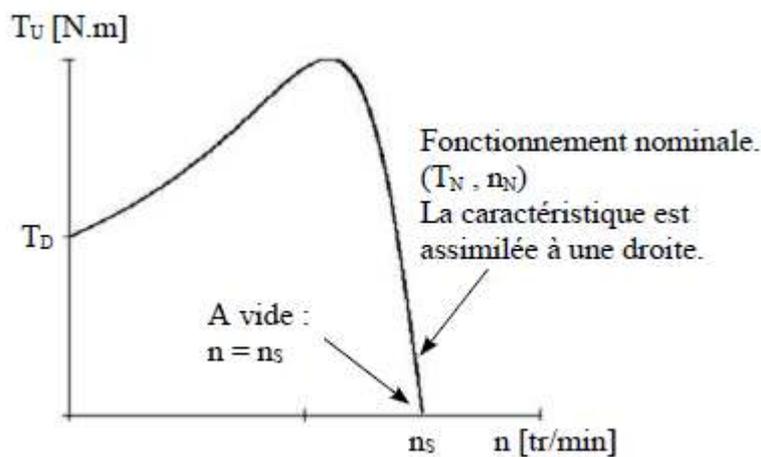


Figure 2.4 : point de fonctionnement

2.4 Défaits de la machine asynchrone triphasée

Dans ce paragraphe sont présentés différents défauts du moteur asynchrone triphasé, leurs origines et leur classification.

Une défaillance de la machine asynchrone triphasée représente tout incident donnant lieu à un comportement anormal de la machine et qui peut à court ou long terme provoquer son endommagement [8]. Les raisons de défaillances dans les machines tournantes

Chapitre 2 Diagnostic de défaut de la machine asynchrone triphasée

électriques ont leur origine dans la conception, la tolérance de fabrication, l'assemblage, l'installation, l'environnement de travail, la nature de la charge et le calendrier de maintenance.

Les défauts peuvent être classés selon leurs origines en deux catégories : interne et externe. Les défauts internes sont provoqués par les constituants de la machine (bobinages du stator et du rotor, circuits magnétiques, cage rotorique, entrefer mécanique, etc.). Les défauts externes sont causés par le type d'alimentation, la charge mécanique ainsi que par l'environnement d'utilisation de la machine.

Une classification des défauts qui existent dans les machines asynchrones triphasées selon leurs origines est présentée dans le Tableau (2.1) [9.10]

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

Tableau 2.1 : classification des défauts

Statistiquement, il est difficile de donner une répartition exacte des défaillances de machines électriques puisque le recensement des pannes et défauts n'est pas automatique dans l'ensemble des parcs d'exploitation et des ateliers de maintenance [11].

La répartition des pannes dans les différentes parties du moteur est présentée sur la figure 2.5:

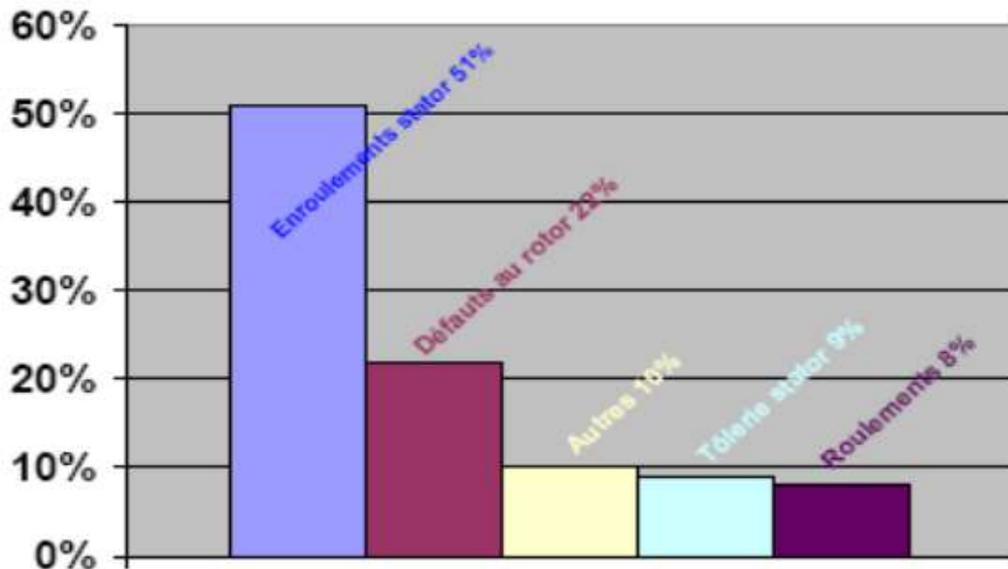


Figure 2.5. Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances Une autre

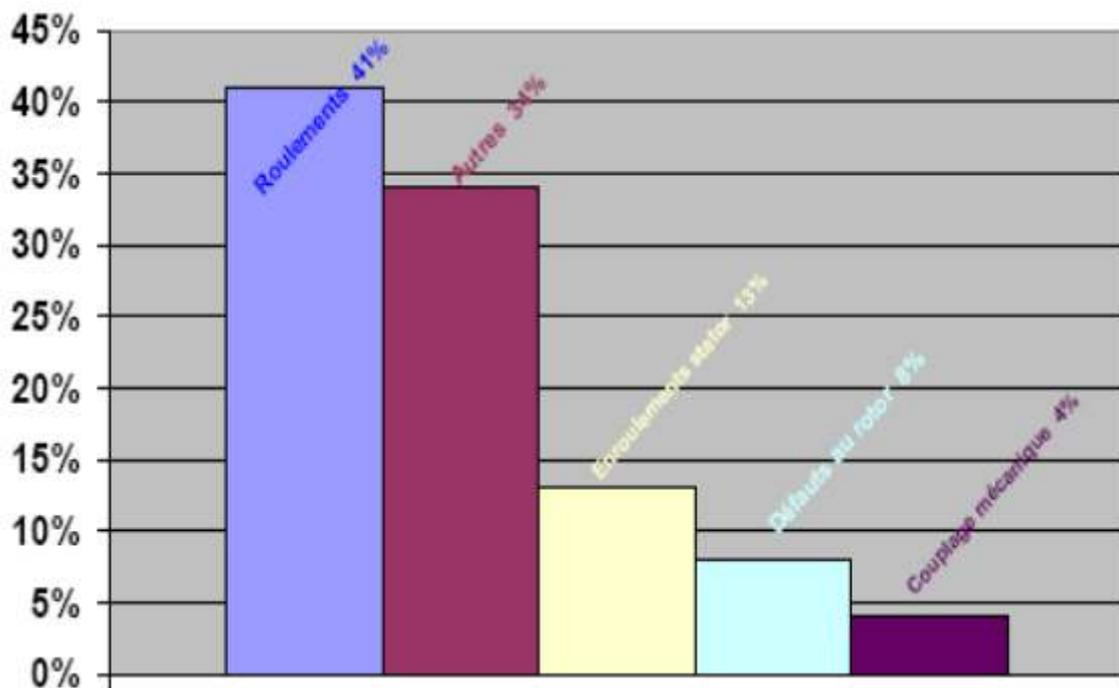


Figure 2.6. Répartition des pannes sur les machines fortes puissances.

Un' étude statistique faite sur des machines de grande puissance (de 100 kW à 1 MW) donne des résultats qui sont présentés sur la figure 2.6. Répartition des pannes sur les machines de fortes puissances. Les contraintes mécaniques sont plus grandes pour ces types de machines

ce qui explique le taux élevé des pannes dues aux roulements. Celles-ci exigent une maintenance mécanique accrue.

2.5 Type de diagnostic

Le type de diagnostic le plus approprié à un système industriel donné ne peut se faire qu'après un recensement raffiné des besoins et des connaissances disponibles.

Pour effectuer le diagnostic des machines d'une installation industrielle, les opérations de maintenance analysent un certain nombre de signaux issus de la machine. En effet, l'évolution temporelle et le contenu spectral de ces signaux peuvent être exploités pour détecter et localiser les anomalies qui affectent leurs bons fonctionnements.[14]

De ce fait, le diagnostic peut être classé en deux grandes familles :

- Diagnostic inductif et déductif.
- Diagnostic invasif (interne) et non invasif (externe).

2.5.1 Diagnostic inductif

Ce type de diagnostic correspond à une approche de recherche montante (en amont). Il s'agit de trouver le défaut à partir de ses effets sur le système. Ce type utilise un mécanisme de raisonnement en avant qu'a pour objectif d'interpréter les symptômes ainsi que leurs combinaisons afin de trouver le défaut.[14]

2.5.2 Diagnostic déductif

Le raisonnement en arrière (en aval) est la principale caractéristique de ce type. Le diagnostic déductif doit trouver quels sont les effets dans les systèmes. Une vérification des « effets trouvés » par rapport aux « effets possibles » permet de confirmer et/ou d'infirmer l'existence du défaut. Le diagnostic peut utiliser soit une seule méthode de raisonnement (avant ou arrière) soit une combinaison. La connaissance « à priori » de la cause « défaut » implique la connaissance de certains effets.[14]

2.5.3 Diagnostic invasif

Le diagnostic invasif dépend de la connaissance obtenue à partir des modèles mathématiques du système.

Ce type de diagnostic est principalement dérivé des techniques utilisées primitivement par les automaticiens. A partir des techniques d'identification des paramètres, il devient possible de mettre en œuvre la méthode du problème inverse. Le diagnostic de défaillance est possible en suivant en temps réel l'évolution des paramètres physiques ou bien en utilisant l'inversion des modèles de type « boîte noire ». Il implique une connaissance approfondie du fonctionnement sous la forme de modèles mathématiques qui devront être obligatoirement validés expérimentalement avant toute utilisation industrielle[14].

Les différents types de diagnostic invasif se regroupent en 04 grandes familles :

- Méthode à base de modèle.
- Méthode d'identification des paramètres.
- Méthodes d'estimation du vecteur d'état.

2.5.4 Diagnostic non invasif

Le diagnostic non invasif utilise la connaissance issue de l'expertise humaine. Ce diagnostic se base sur l'analyse spectrale des signaux que fournit la machine lors de son fonctionnement.

Les signaux les plus utilisés sont :

Electriques : analyse des grandeurs électriques aux bornes de la machine :Tensions, courants, puissance instantanée partielle, puissance instantanée totale ..

Mécanique : analyse des vibrations acoustiques : accéléromètre....

Thermiques : analyse de la température de la machine : sonde de température, mesure infrarouge.

Electromagnétiques : analyse des flux dans l'entrefer :spire de mesure de flux, ou des flux de dispersion radial ou axial par des bobines externes.

Chimique : analyse des huiles ou des gaz.

Dans les sections suivantes, on présente les méthodes basées sur l'approche 'Signal' des grandeurs « mesurables » ce qui permet par la suite, à détecter et localiser les défauts des machines électriques[14].

Ce type de diagnostic, possède les avantages ci-dessous :

- Facile à mettre en œuvre
- Le modèle n'est pas nécessaire (grandeurs issues directement des bancs d'essais).

2.6 Méthode de diagnostic des défauts basée sur le traitement du signal

2.6.1 Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite

Dans le cas idéal de fonctionnement, les courants et les tensions statoriques de la machine sont équilibrés. Mais lors d'un défaut quelconque, il entraîne un déséquilibre électrique dans la partie statorique, ce qui provoque l'apparition des flux axial, on place à l'extrémité de la machine ou autour de l'arbre une bobine. Elle sera le siège d'une force électromotrice induite. Le flux de mesure peut être utilisé sans l'analyse spectrale pour le suivi de l'état électrique et détecter le défaut. [14]

2.6.2 Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites

La rupture d'une barre va affecter directement la tension induite dans les enroulements statoriques. On peut utiliser cette technique pour exploiter le contenu fréquentiel de la tension induite, par le flux rotorique, directement dans les enroulements statoriques pendant la déconnexion du moteur de réseau, en éliminant ainsi toutes les asymétries de la source d'alimentation (déséquilibres, harmoniques) ou la non linéarité des caractéristiques magnétiques de la machine.[14]

2.6.3 Diagnostic par mesure du couple électromagnétique et de la vitesse rotorique

Lorsqu'une rupture de barre se produit, les spectres fréquentiels de la vitesse rotorique et du couple électromagnétique laissent paraître des composantes supplémentaires, il s'est avéré que l'analyse de ses composantes ne renseigne pas aussi bien sur le défaut rotorique que celles présents dans le spectre du courant statorique (augmentation des amplitudes moins significatives). De plus, l'acquisition de ces deux signaux nécessite un équipement assez coûteux par rapport à un simple capteur de courant, ce que limite leur utilisation pour le diagnostic de défauts des machines asynchrones. Certains systèmes reconstruisent une image du couple électromagnétique à partir des tensions et des courants mesurés sur la machine, mais cette approche reste moins efficace que les méthodes précédemment citées.[12]

2.6.4 Diagnostic par mesure du courant statorique

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

Cette technique est dénommée dans la littérature « MotorCurrent Signature Analysis » (MCSA). Les défauts de la MAS se traduisent dans le spectre du courant statorique soit par, Les raies spectrales qui apparaissent avec des fréquences qui sont directement liées à la vitesse de rotation de la machine, aux vitesses des champs tournants et aux paramètres de la machine. Ou bien, les raies spectrales ont une modification de leurs amplitudes, dans le spectre du courant [12].

2.6.5 Diagnostic des défauts par analyse du vecteur de Park

Une représentation en deux dimensions peut être utilisée pour détecter les défauts. Une des plus connues repose sur le calcul des courants dits de Park. En fonction des courants de phase $i_{sa}(t)$, $i_{sb}(t)$, $i_{sc}(t)$, les courants de Park $i_d(t)$ et $i_q(t)$ peuvent être calculés pour l'obtention de la courbe de Lissajou : $i_q = f(i_d)$. Le changement de l'épaisseur et de la forme de cette courbe donne une information sur le défaut [12].

2.7 Détection d'un court-circuit de spires

D'une façon générale, à la suite d'un court-circuit, apparaissent des vibrations et des oscillations de couple synonymes de présence de nouvelles composantes dans le couple électromagnétique, et par conséquent dans les courants statoriques et rotoriques. En effet, un court-circuit de spires est à l'origine de déséquilibre des enroulements statoriques induisant un champ inverse en plus du champ direct principal. Ces nouvelles composantes entraînent des harmoniques dans les courants statoriques de la machine.

En plus, de cela, un indicateur de présence de défaut de court-circuit entre spires [13] est décrit par :

$$f_{cc} = \left[\left(\frac{n}{p} \right) \times (1 - g) \pm k \right] \times f \quad (2.5)$$

Avec f : fréquence de la tension d'alimentation

$n = 1, 2, 3, \dots$, $k = 1, 3, 5, \dots$, n, k entiers p est le nombre de paire de pôle, et g le glissement.

2.8 Détection d'une barre cassée

Les fréquences caractéristiques des défauts de barres rotoriques cassées sont données par [13]

$$f_{bc} = (1 \pm 2g) \times f \quad (2.6)$$



Figure2.7 : Rotor avec une barre rotorique cassée

2.9 Détection indicateurs d'excentricité

Si un certain niveau d'excentricité entre le rotor et le stator se produit dans un moteur électrique, quelle que soit son origine, il fait apparaître de nouvelles harmoniques dans l'entrefer et/ou une augmentation dans l'amplitude des harmoniques existants auparavant. Ensuite, il produit un effet global qui stimule le développement d'effets secondaires suivants :

- Distorsion du couple,
- Intensification de vibrations et de bruit,
- Réduction de la vitesse du rotor,
- Passage du courant électrique à travers les roulements

La surveillance du spectre de Fourier du courant d'une phase permet de surveiller l'état du moteur. Les fréquences des harmoniques spécifiques du défaut sont calculées à partir du nombre de barres du rotor et du glissement [13]. Les fréquences d'intérêt sont données par [10]:

$$f_{ex} = \left[(1 \pm k) \times \left(\frac{1-g}{p} \right) \right] \times f \quad (2.7)$$

où $k = 1, 2, 3, \dots$

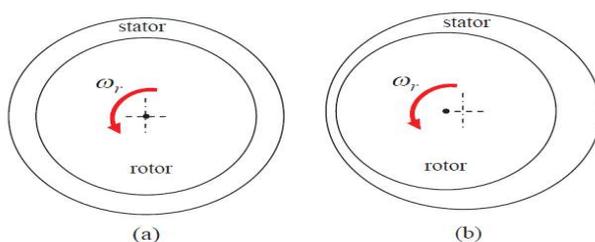


Figure2.8 : a) rotor centré, b) rotor excentré

2.10 Détection de défauts de roulement

Le roulement est un organe de base qui assure une liaison mobile entre deux éléments d'un mécanisme en rotation l'un par rapport à l'autre. Sa fonction est de permettre la rotation relative de ces éléments, sous charge, avec précision et avec un frottement minimal.

La majorité des machines électriques utilisent les roulements à billes ou à rouleaux.

Le roulement est composé des éléments suivants :

- deux bagues concentriques en acier, appelés bague intérieure et bague extérieure, comportant des chemins de roulement (surfaces sur lesquelles "roulent" les corps roulants) .
- des corps roulants, billes ou rouleaux généralement en acier, permettant le mouvement des deux bagues avec un frottement minimal.
- une cage séparant et guidant les corps roulants (en polyamide, tôle acier, laiton ou résine).

On distingue deux types de roulements : le roulement à billes, où le contact bille-chemin est théoriquement ponctuel et le roulement à rouleaux où le contact rouleau-chemin est théoriquement linéaire. Le roulement à billes est le plus utilisé dans le monde industriel parce qu'il a le meilleur rapport performance-prix.

La Figure 2.9 montre la construction typique d'un roulement à billes. Les billes sont liées par une cage qui assure une distance uniforme entre elles et empêche tout contact.

Les défauts de roulement peuvent se produire lors d'une fatigue des matériaux sous des conditions normales de fonctionnement. Au début, des fissures vont apparaître sur les pistes et sur les billes. Ensuite, des écaillages et des arrachements de matière peuvent accélérer rapidement l'usure d'un roulement. Ces phénomènes seront accompagnés par des niveaux de bruit et de vibrations croissants

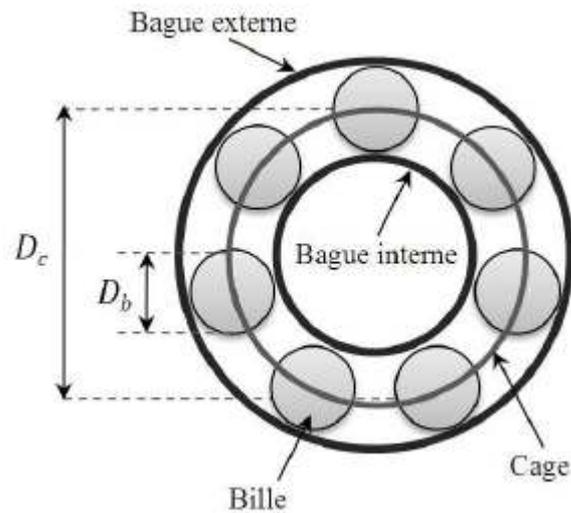


Figure 2.9 : construction typique d'un roulement à billes

Nous utilisons les notations suivantes :

D_c : diamètre de la cage (entre les centres de deux billes opposées),

D_b : diamètre d'une bille,

β : angle de contact de la bille avec les bagues,

N_b : nombre de billes.

Suivant l'emplacement géométrique du défaut dans le roulement, nous pouvons distinguer les types de défauts suivants :

- Défaut de bague extérieure,
- Défaut de bague intérieure,
- Défaut de billes,
- Défaut de cage

2.10.1 Fréquences caractéristiques et techniques de détection

Chaque type de défaut a sa propre signature et est caractérisé par une fréquence fondamentale, qui peut être calculée à partir de la structure et des dimensions du roulement et de la fréquence de rotation de l'arbre. En analyse vibratoire, il est donc possible d'observer certaines bandes de fréquences et d'identifier le type de défaut.

Chapitre 2 Diagnostic de défaut de la machine asynchrone triphasée

Les expressions de ces fréquences caractéristiques sont développées d'après [15]. On peut les résumer de la manière suivante :

Défaut de bague externe

$$f_{ex} = \frac{Nb}{2} \times f \left(1 - \frac{Db}{Dc} \times \cos \beta \right) \quad (2.7)$$

Défaut de bague interne :

$$f_{in} = \frac{Nb}{2} \times f \left(1 + \frac{Db^2}{Dc^2} \times \cos^2 \beta \right) \quad (2.8)$$

Défaut de bille :

$$f_{in} = \frac{Dc}{2Db} \times f \left(1 - \frac{Db^2}{Dc^2} \times \cos^2 \beta \right) \quad (2.9)$$

Défaut de cage :

$$f_{ca} = \frac{1}{2} \times f \left(1 - \frac{Db}{Dc} \times \cos \beta \right) \quad (2.10)$$

Dans le cas où la bague externe est fixe, la fréquence caractéristique du défaut de bille s'écrit sous la forme :

$$f_{bi} = \frac{Dc}{Db} \times f \left(1 - \frac{Db^2}{Dc^2} \times \cos^2 \beta \right) \quad (2.11)$$

2.11 Conclusion

Dans ce chapitre, on a rappelé que les principales défaillances d'une machine asynchrone triphasée entraînent la plupart du temps un arrêt intempestif de cette dernière. C'est pour pallier ce problème que le diagnostic de défaut a pris une importance de plus en plus grandissante dans les milieux industriels. Les défauts des machines électriques peuvent être classifiés dans 2 catégories : électrique ou mécanique. Pour chaque type de défauts, nous avons cité les causes principales, les mécanismes et les symptômes produits, ainsi que les techniques de détection. La détection d'un défaut s'effectue majoritairement par la surveillance de l'amplitude de composantes spécifiques dans le spectre fréquentiel d'une grandeur mesurable.

3.1 Introduction

L'objectif de ce travail est d'analyser les courants statoriques d'un moteur et de détecter les défauts qui peuvent exister notamment le défaut court-circuit.

La méthode de diagnostic des défauts se base sur deux techniques l'une est la transformée de Fourier (FFT) qui permet de représenter le signal dans le domaine fréquentiel. La seconde méthode est la transformée en ondelette qui tient compte de l'information temporelle et fréquentielle.

Matlab dispose de fonctions de calcul de base ainsi que de bibliothèques spécialisées appelées boîtes à outils (*toolboxes*). On va s'intéresser à l'une d'elles en particulier, la boîte à outils ondelettes. La théorie des ondelettes, apparue au début des années 1990, trouve des applications dans de nombreux domaines, notamment le traitement du signal et des images. La boîte à outils Ondelettes de Matlab propose de nombreuses fonctions de manipulation des ondelettes. L'analyse multirésolution donne un ensemble de signaux d'approximation et de détails d'un signal de départ en suivant une approche fin-à-grossier (*fine-to-coarse*). On obtient une décomposition multi-échelle du signal de départ en séparant à chaque niveau de résolution les basses fréquences (approximation) et les hautes fréquences (détails) du signal. V_0 : Espace de départ, V_{-1} : Approximation Niveau 1, W_{-1} : Détails niveau -1

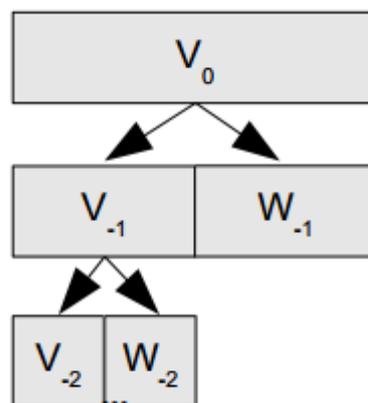


Figure 3.1 :Analyse multirésolutions

3.2 Les coefficients d'approximations et détails

On prend un signal de 512 points chaque points à amplitude de valeur égale à 50, et on a prend trois points à des amplitudes différents. Les points sont 50, 75 et 500. On a fait la transformation d'ondelette de type multirésolution sur ce signal, la transformation d'ondelette donne un ensemble de signaux d'approximation et de détails

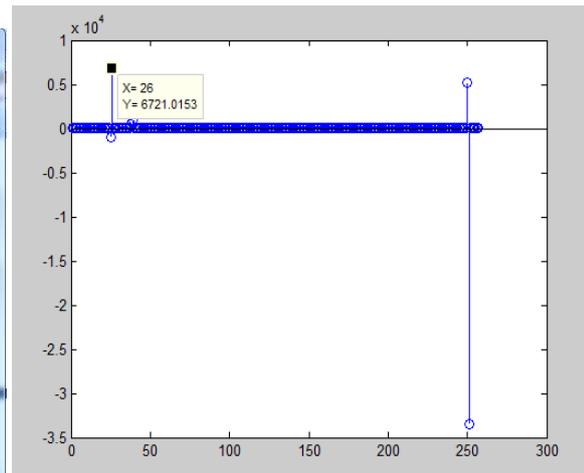
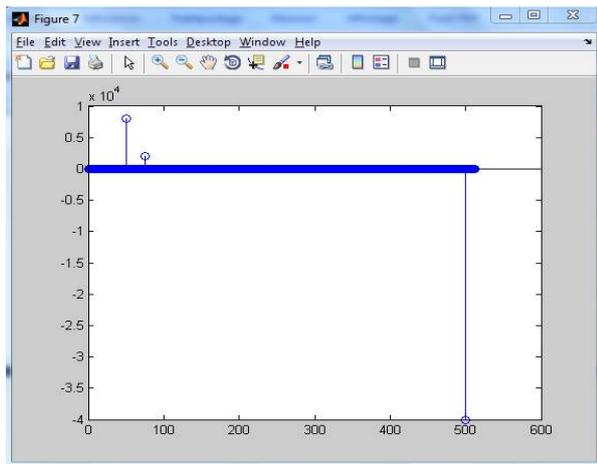


Figure 3.2 signal d'origine

Figure 3.3 coefficients d'approximation

On remarque dans la figure 3.2, l'existence de 512 points (à partir de 1 à 512) et dans la deuxième figure 3.3 ; on a 257 points (à partir de 1 à 257) et la pulsation au point 50 de la figure 3.2 est devenu dans le point 26 dans la figure 3.3, on conclue que les coefficients d'approximation prennent un point sur deux. Mais, on conclue aussi qu'il y a une perte d'information Cette information manquante se trouvent dans les coefficients de détails.

On peut reconstruire le signal d'origine à l'aide des coefficients de détails.

Pour les coefficients détails on prend un autre signal de 40 points à partir de 0 à 20 et de 30 à 50 a d'amplitude de 50 et on prend 10 points a amplitude de 0.

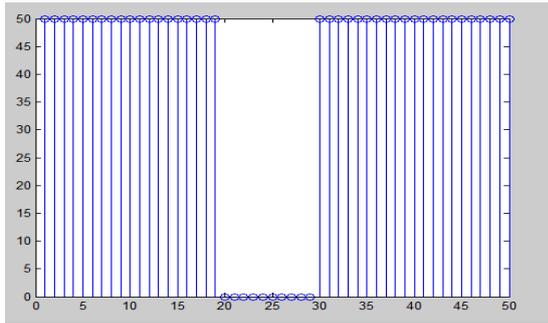


Figure 3.4 Signal d'original

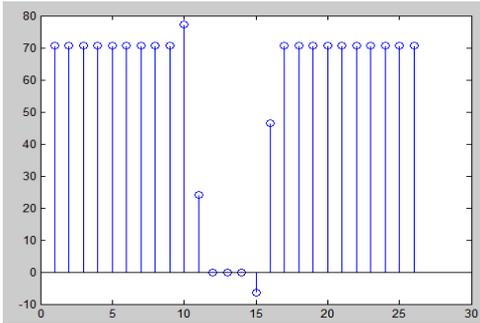


Figure 3.5 les coefficients D'approximations

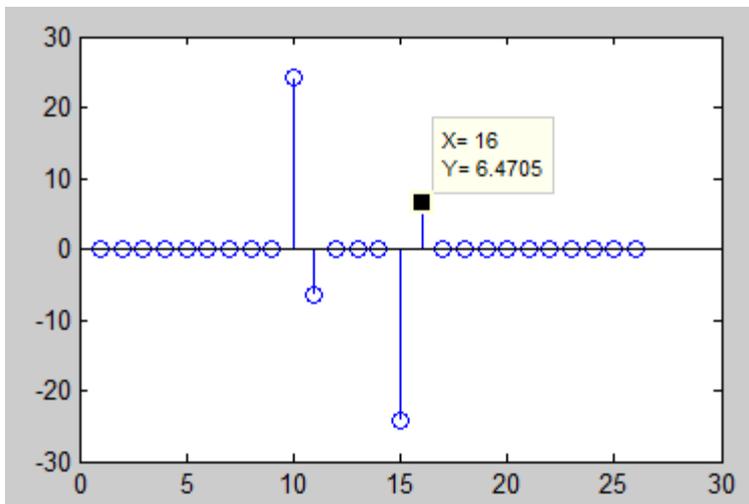


Figure 3.6 Les Coefficients d'détails

Les points de la figure 3.6 sont changés seulement quand il y a un changement dans la figure 3.5, qui représente les coefficients d'approximations.

Dans l'intervalle de points de 1 à 10 et de 12 à 14 et de 16 à 26, il n'y a aucun changement dans la courbe mais il existe dans les coefficients détails dans les points 11 et 15.

3.3 Représentation d'état la machine asynchrone

Après l'application de la transformation de Parksur le modèle multiplicatif [voir annexes]

$$\frac{d[I_{sdqo}]}{dt} = [P_s] \left([A_{m11}][P_s]^{-1} - \frac{d}{dt} [P_s]^{-1} \right) [I_{sdqo}] + [P_s][A_{m12}][P_s]^{-1} [\varphi_{rdqo}] + [P_s][B_{m11}][P_s]^{-1} [U_{sdqo}]$$

$$\frac{d}{dt} [\varphi_{rdqo}^*] = [P_s][A_{m12}][P_s]^{-1} [I_{sdqo}] + [P_s] \left([A_{m22}][P_s]^{-1} + \frac{d}{dt} [P_s]^{-1} \right) [\varphi_{rdqo}^*]$$

(3.1)

$$f_i = \frac{n_s - n_{cci}}{n_s}; i = a, b, c \quad (3.1)$$

n_s : nombre total de spires par phase

n_{cci} : nombre de spires en court-circuit par phase

3.4 La lecture d'une fréquence de signal par la transformation d'ondelette

On va présenter l'analyse des courants statoriques de moteur asynchrone triphasé par la méthode de transformation de Fourier qui donne la valeur numérique de fréquence et avec la méthode de la transformation d'ondelette qui donne les informations fréquentielles et temporelles. On a fait trois essais avec trois fréquences différents 55Hz, 50Hz et 40 Hz, la période d'essai est 3(s)

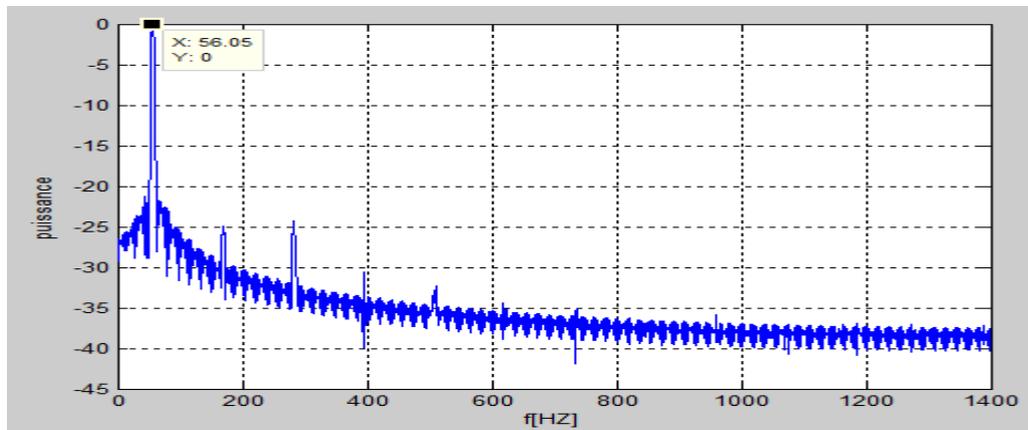


Figure 3.7 FFT du courant isa ($f = 55$ Hz)

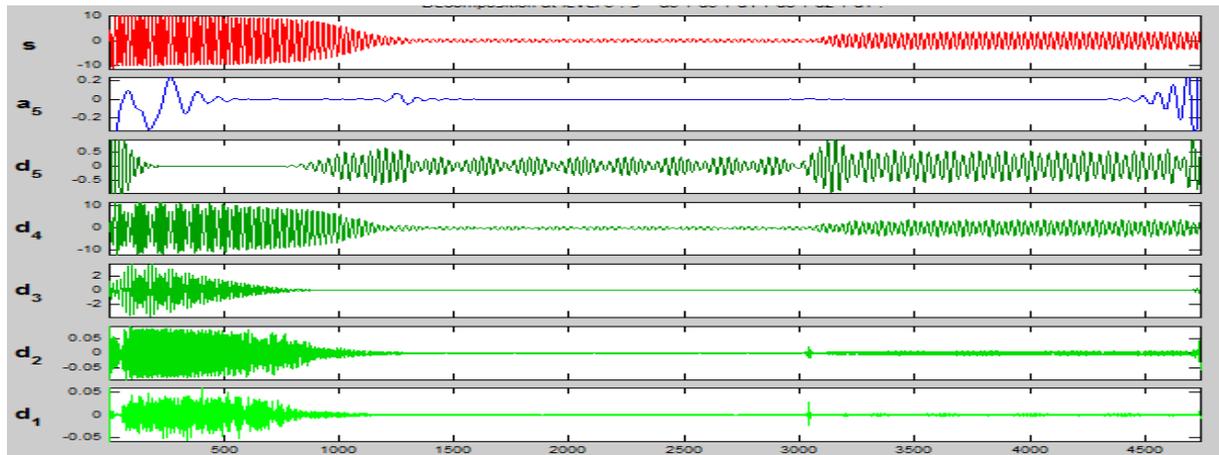


Figure 3.8 TO du courant isa ($f = 55$ Hz)

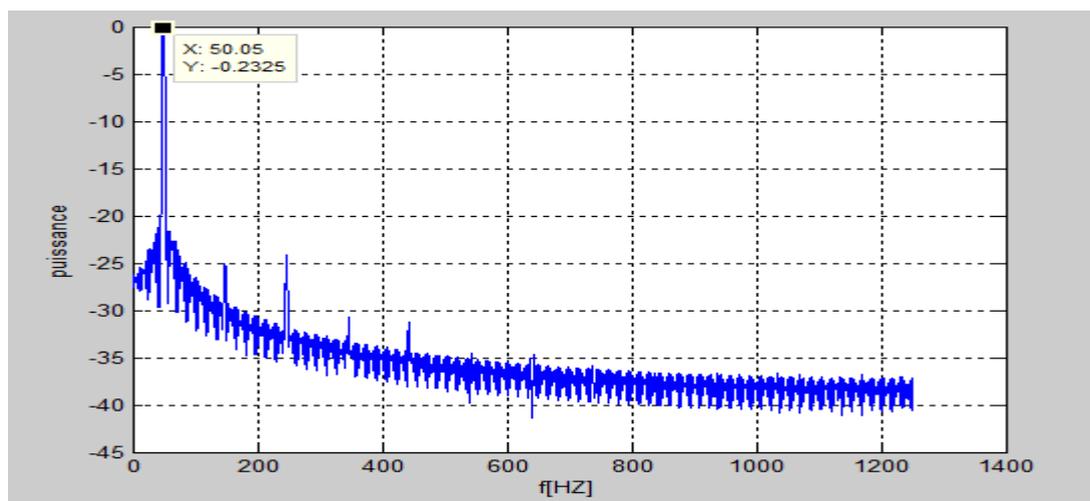


Figure 3.9 FFT du courant isa ($f = 50$ Hz)

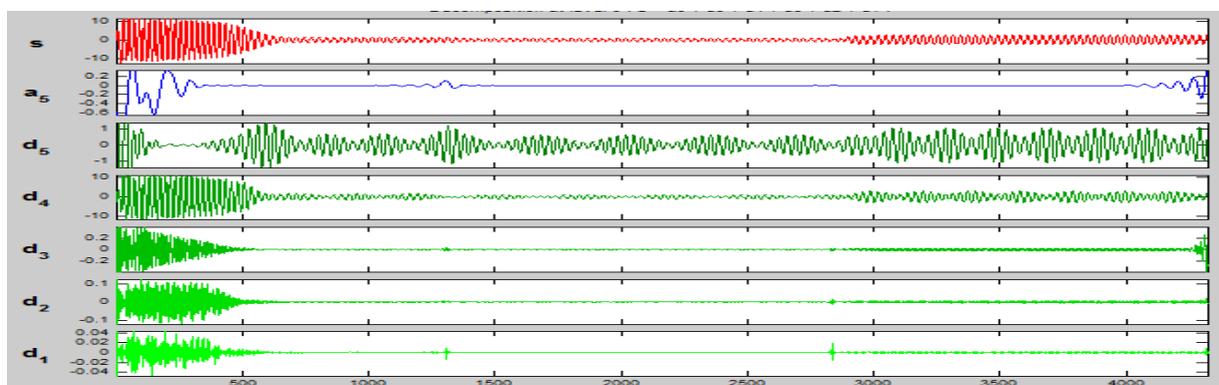
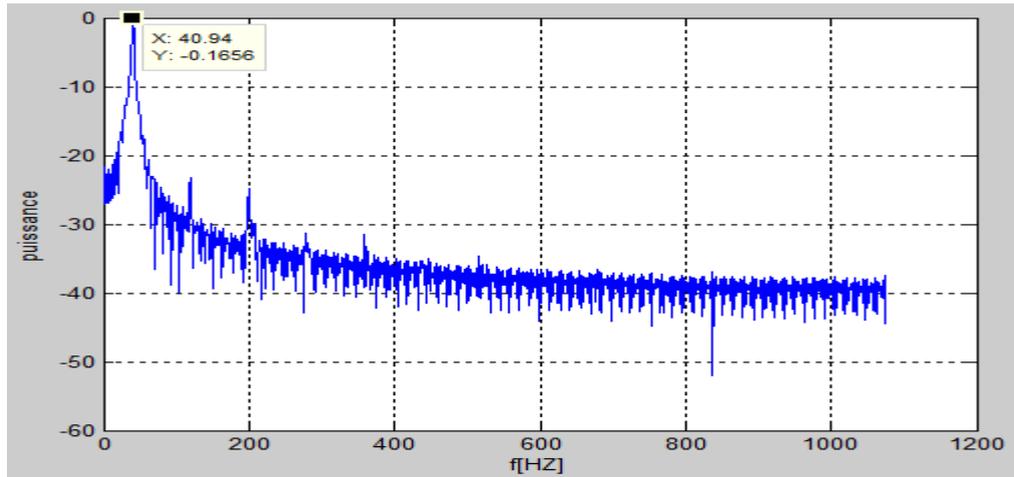
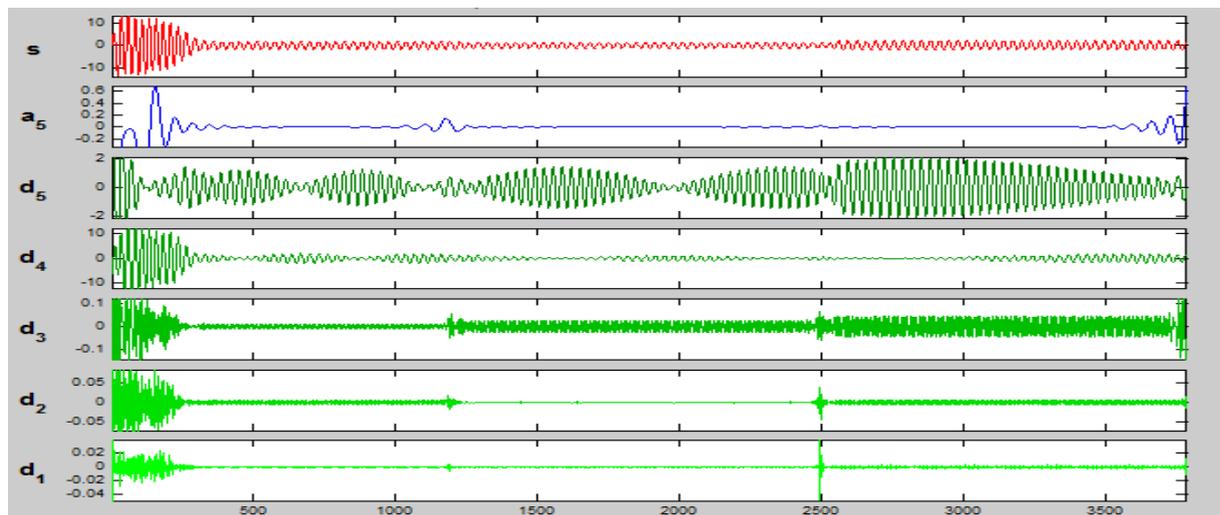


Figure 3.10 TO du courant isa ($f = 50$ Hz)

Figure 3.11 FFT du courant isa ($f = 40$ Hz)Figure 3.12 TO du courant isa ($f = 40$ Hz)

On remarque que les signaux sont différents pour les trois essais (fréquences à 55, 50 et 40 Hz). Pour les trois figures qui représentent la transformation en ondelette, on trouve l'information de fréquence et l'information temporelle qu'on ne trouve pas dans la transformation de Fourier,

On peut extraire les fréquences des signaux pour la transformation d'ondelette comme suit. D'abord, il faut connaître la fréquence d'échantillonnage f_e , et ensuite, il faut diviser cette fréquence selon le tableau 3.1.

Niveau	Bandes de fréquences détail	
J=1	D1	$fe/4 - fe/2$
J=2	D2	$fe/8 - fe/4$
J=3	D3	$fe/16 - fe/8$
J=4	D4	$fe/32 - fe/16$
J=5	D5	$fe/64 - fe/32$
	A5	$0 - fe/64$

Tableau 3.1 bandes des fréquences obtenues par la décomposition multi-niveau

Chaque ligne dans le tableau 3.1 représente une bande de fréquence, donc on peut connaître les fréquences qui sont représentés dans le signal. Pour le deuxième essai,

Pour le signal est à la fréquence de 50 Hz, 90% de signal se trouve dans la bande D4 et 10% de signal dans la bande D5.

Pour le signal à la fréquence 55 Hz, 80% de signal se trouve dans la bande D4 et 20% dans la bande D3,

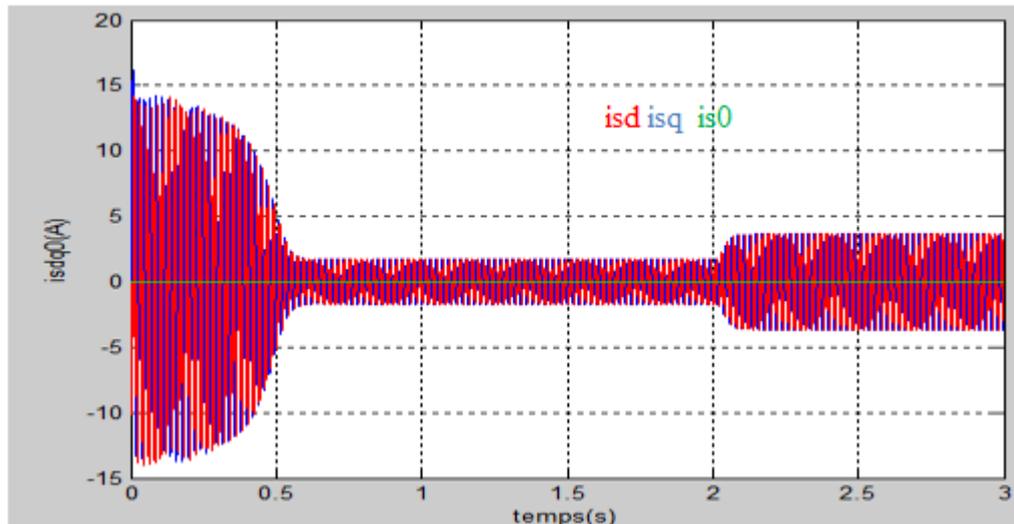
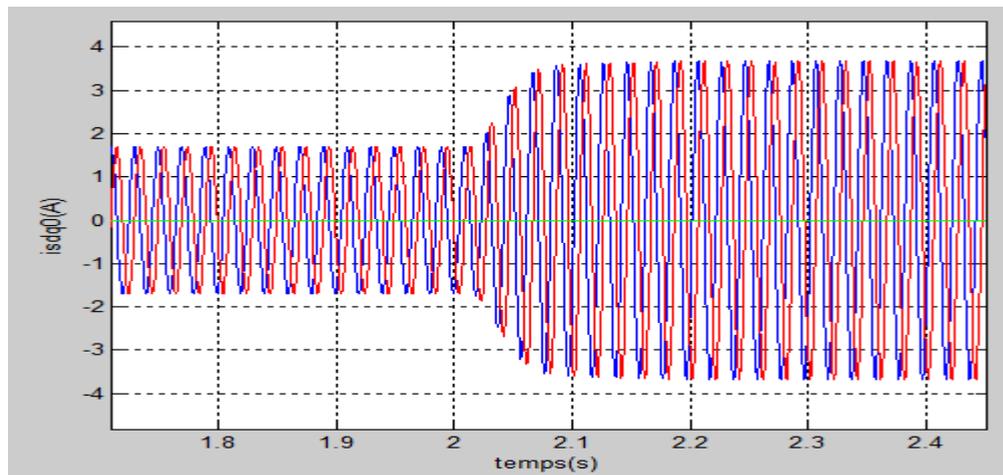
Pour le signal à la fréquence 40 Hz, 80% de signal se trouve dans la bande D4 et 20% dans la bande D5.

On conclue qu'on peut connaître la fréquence de signal par la transformation d'ondelette par le pourcentage de la représentation de signal dans les bandes des fréquences.

3.5 Résultat de la simulation

3.5.1 Cas sans défaut en vide et en charge

La simulation du modèle d'état de la machine asynchrone tenant compte du défaut de court circuit entre spires se fait dans le référentiel de Park lié au stator. L'alimentation se fait directement à travers le réseau. La machine asynchrone démarre à vide et ensuite, une charge est appliquée.

Figure 3.13 Les courant i_{sd} i_{sq} et i_{s0} Figure 3.14 Zoom sur les courant i_{sd} i_{sq} et i_{s0}

On remarque que les deux signaux i_{sd} et i_{sq} ont même amplitude et sont en quadrature. Le courant i_{s0} est nul, donc le moteur est dans le cas équilibré.

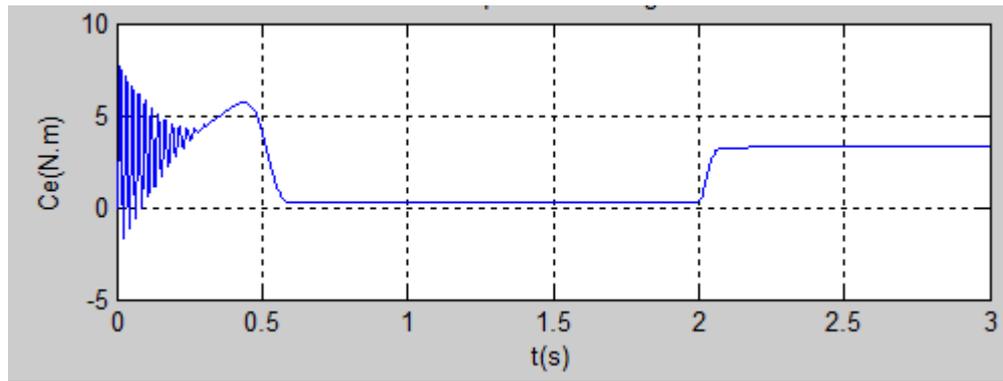


Figure 3.15 Couple électromagnétique de la machine saine

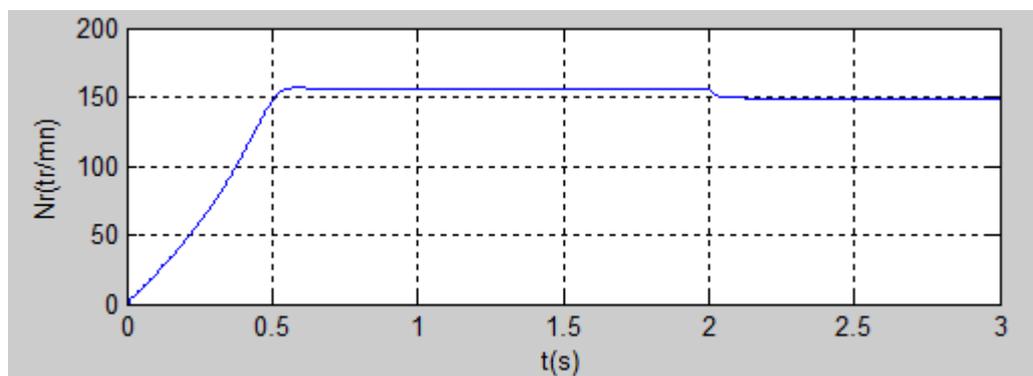


Figure 3.16 Vitesse de la machine saine

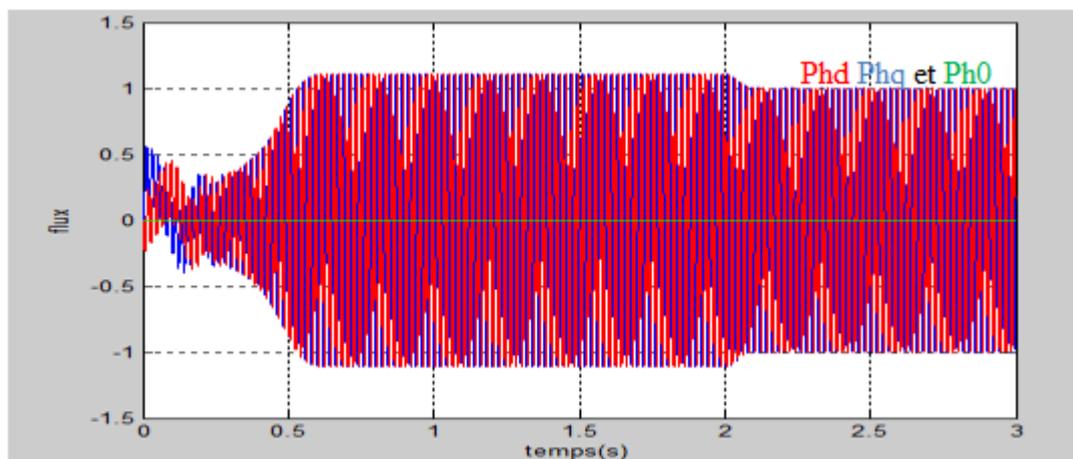


Figure 3.17 Flux Ph_d Ph_q et Ph_0

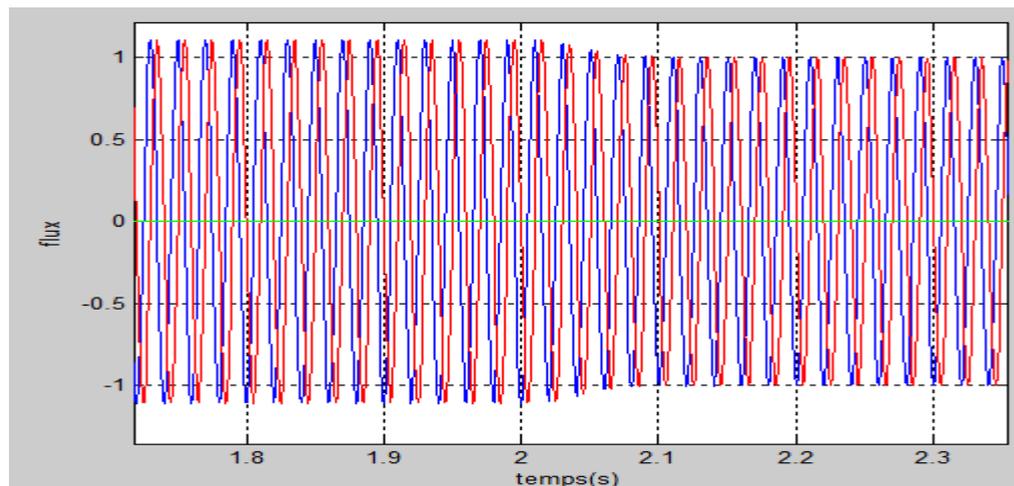


Figure 3.18 Zoom sur les flux Phd Phq et Ph0

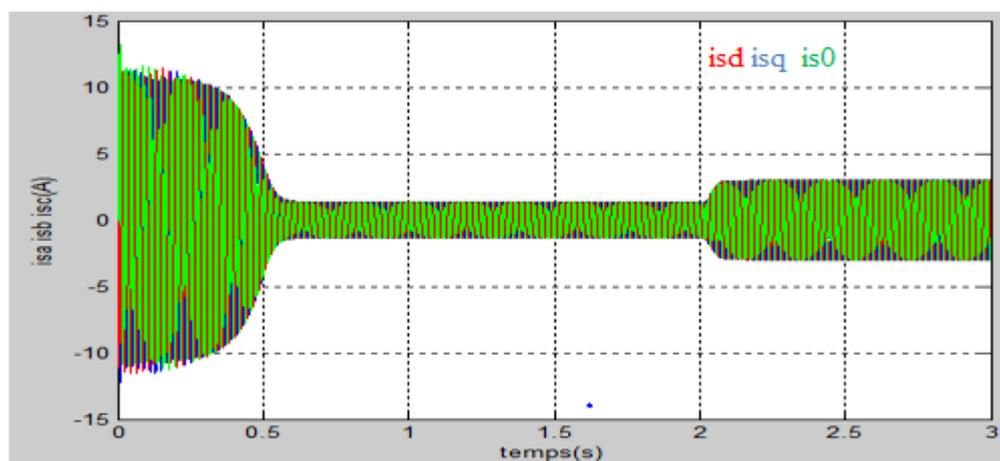


Figure 3.19 Les courants statoriques isa isb et isc

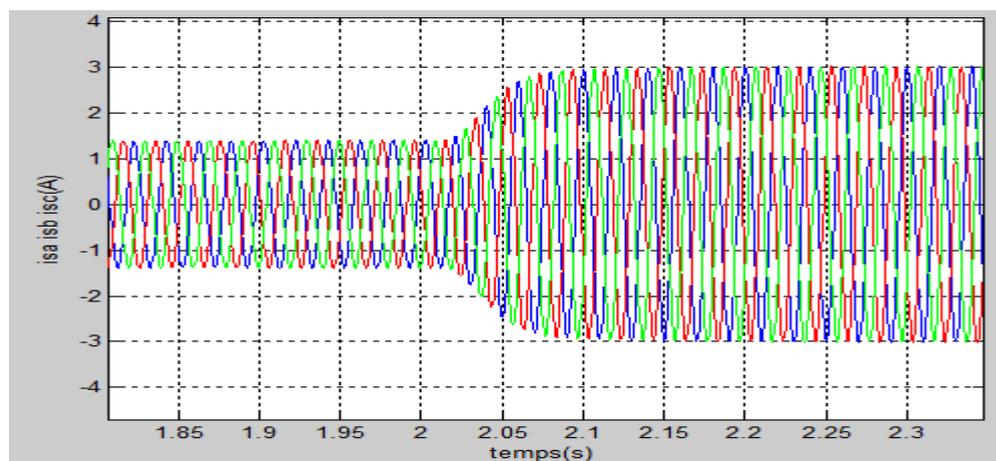


Figure 3.20 Zoom sur les courants statoriques triphasés

3.5.2 Cas d'un défaut court-circuit entre spire

La simulation du modèle d'état de la machine asynchrone tenant compte du défaut de court-circuit entre spires se fait dans le référentiel de Park lié au stator et que l'alimentation se fait directement à travers le réseau et à charge moyenne.

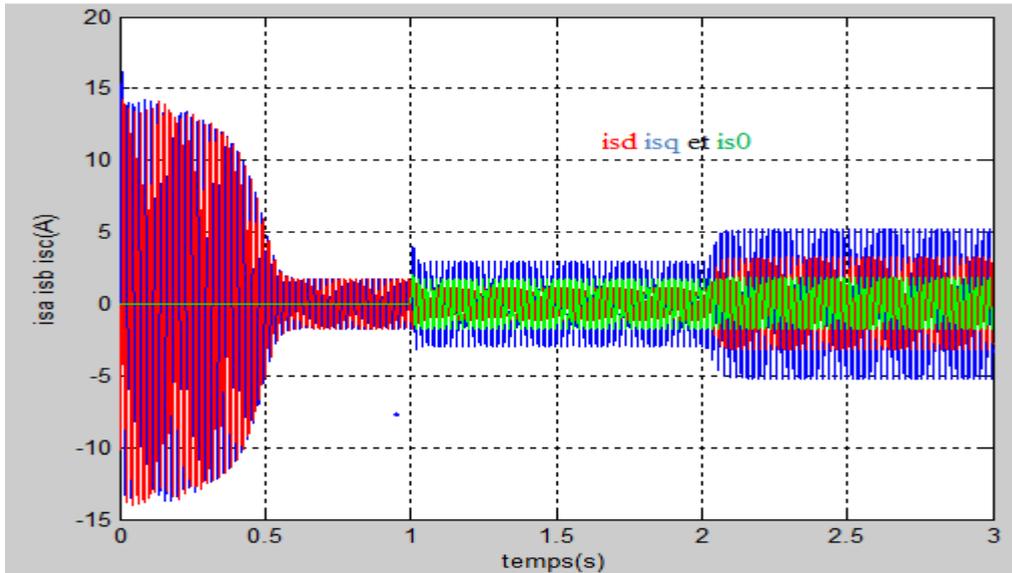


Figure 3.21 Les courants i_{sd} , i_{sq} et i_{s0}

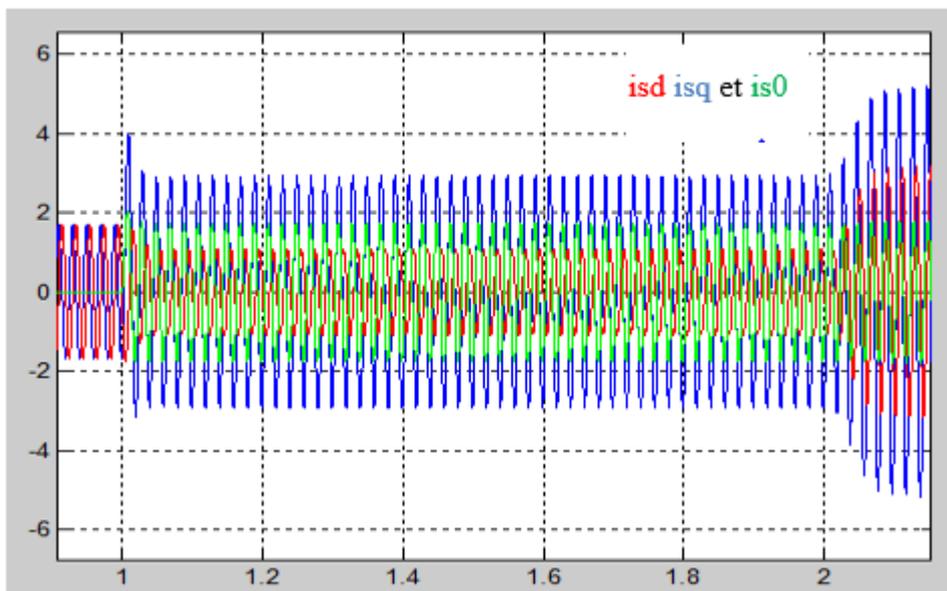


Figure 3.22 Zoom sur les courants i_{sd} , i_{sq} et i_{s0}

On remarque que les deux signaux i_{sd} et i_{sq} n'ont pas la même amplitude. Le courant i_{s0} n'est pas nul, alors la machine n'est pas dans le cas équilibré.

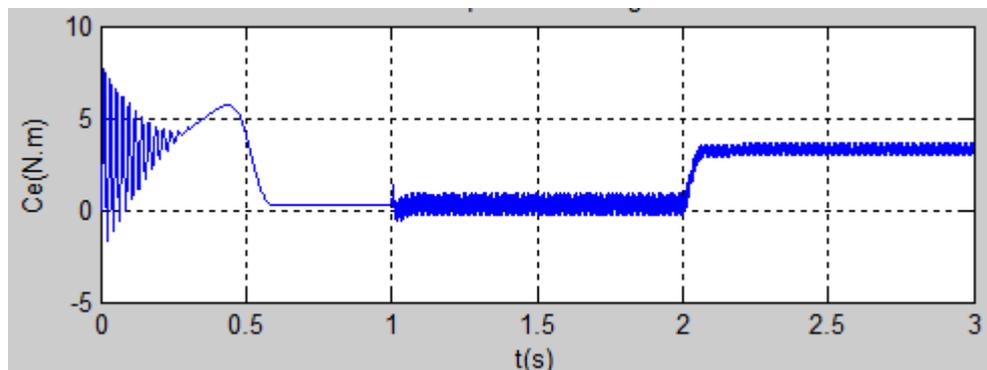


Figure 3.23 Couple électromagnétique de la machine avec défaut

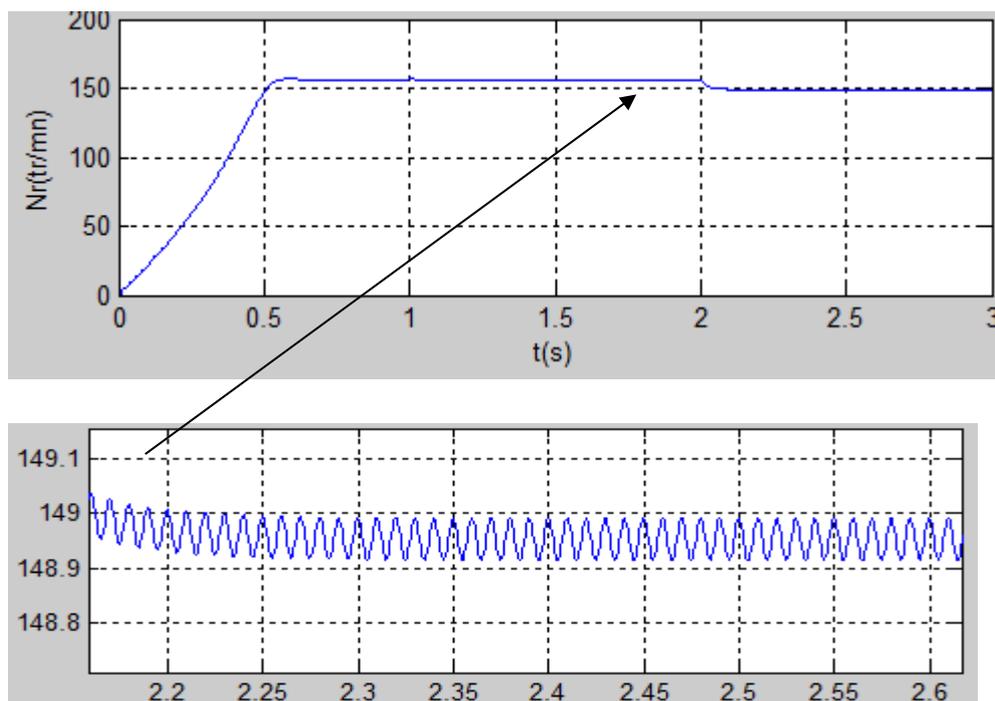


Figure 3.24 Vitesse du MAS avec défaut de court-circuit

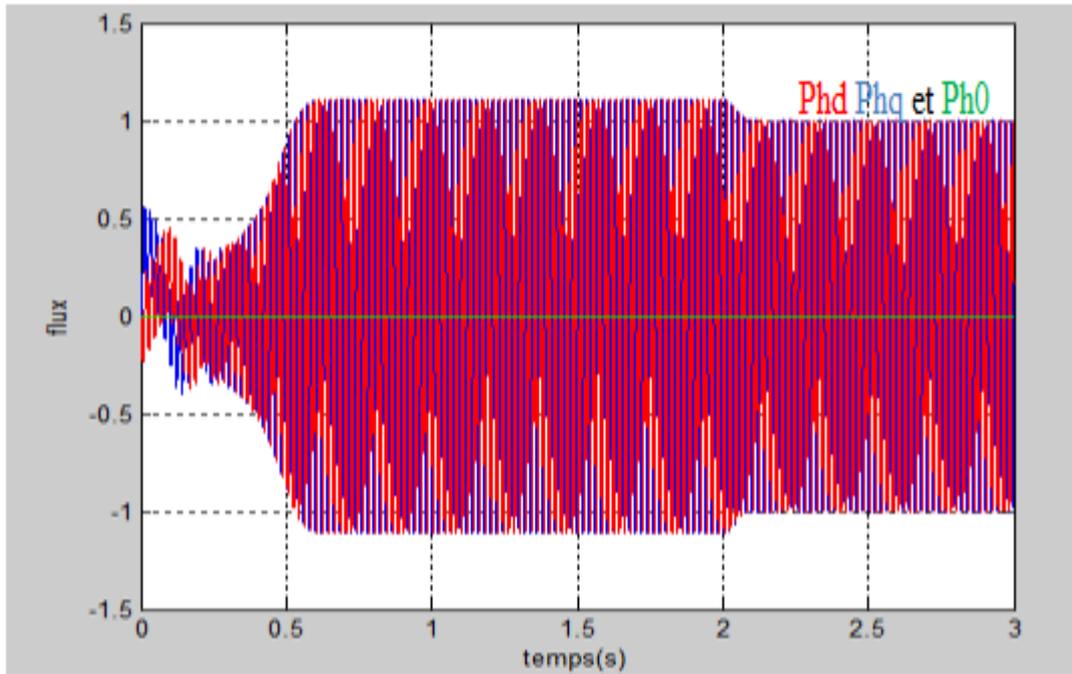


Figure 3.25 Flux Phd Phq et Ph0

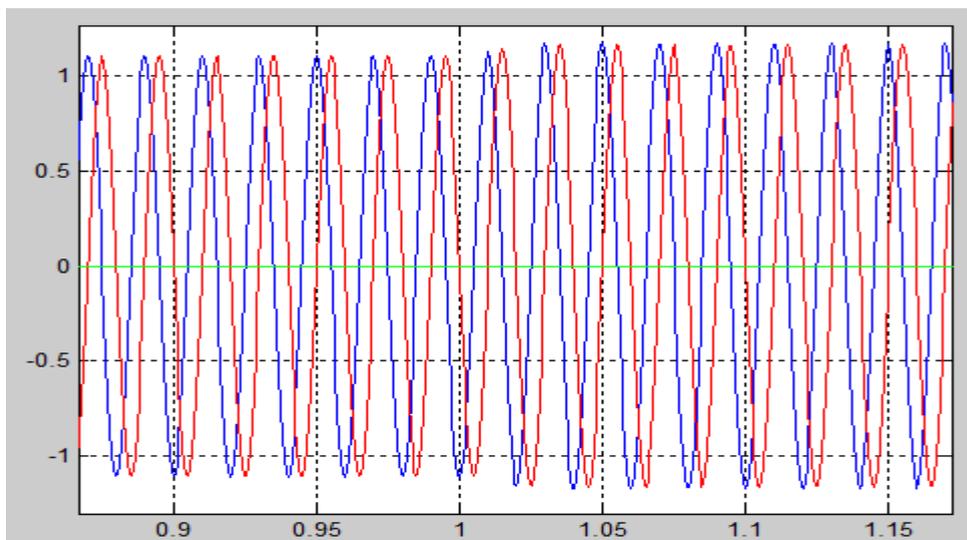


Figure 3.26 Zoom sur les flux Phd Phq et Ph0

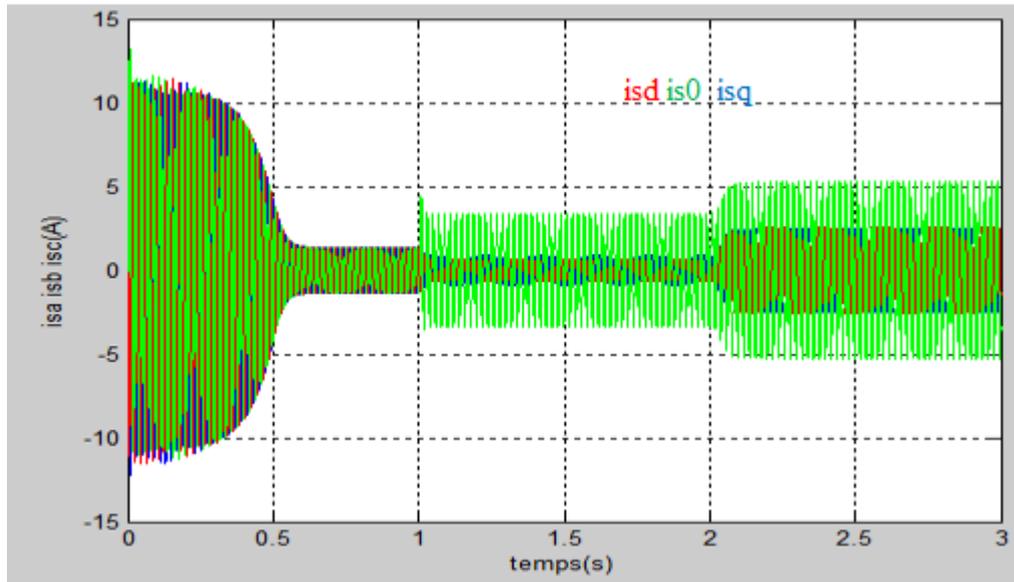


Figure 3.27 Les courants statoriques avec un défaut dans la phase « A »

La figure (3.27) représente les trois courants statoriques pour un défaut de court-circuit de 20% à l'instant $t=1s$ dans la phase « A ». Un déséquilibre se manifeste sous forme d'une augmentation importante au niveau du courant de la phase où s'est produit le défaut. Le défaut de court-circuit des spires dans la phase « A » affecte aussi la vitesse de rotation, le couple électromagnétique, où apparaissent des oscillations qui sont importantes provoquées par le déséquilibre du courant statorique.

3.5.2.1 Analyse spectrale du courant statorique par FFT

L'analyse spectrale (FFT) du courant statorique se réalise avec fenêtrage de type Hanning. La période d'échantillonnage est de 1456 pour le cas d'une machine saine et avec défaut de court-circuit entre spires au stator.

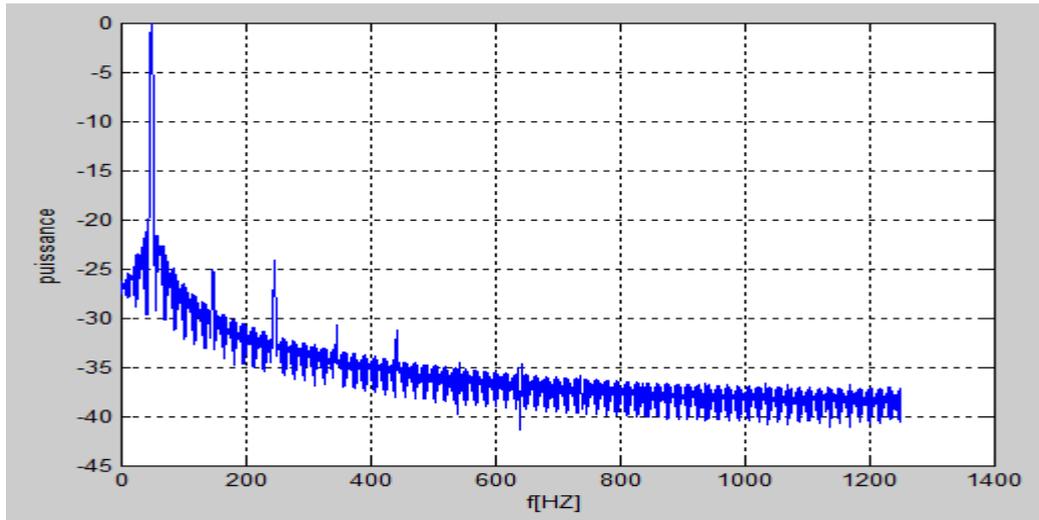


Figure 3.28 FFT du courant isa ($f = 50$ Hz) cas de la machine saine

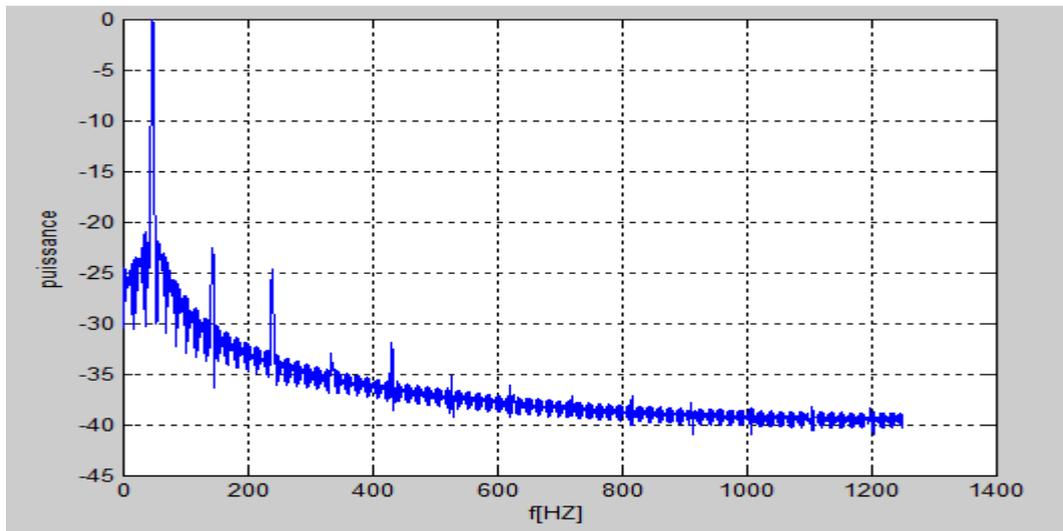


Figure 3.29 FFT du courant isa ($f = 50$ Hz) cas de la machine en défaut court-circuit entre spires (25%)

Les figures 3.28 et 3.29 représentent les spectres du courant isa pour un moteur en charge à l'état sain et en défaut de types court-circuit entre spires.

Durant le défaut de court-circuit entre spires dans la phase « A » figure (3.29), on remarque une augmentation d'amplitude dans la composante de fréquence de 150 Hz dans les spectres.

3.5.2.2 Analyse du courant statorique par la technique des ondelettes

La transformée en ondelette est une technique avancée, utilisée pour améliorer l'analyse du signal du courant statorique et de permettant la détection les défauts d'une machine asynchrone en régime stationnaire et variable.

Dans cette partie, On applique la transformée en ondelettes discrète aux signaux du courant statorique. L'extraction des informations des signaux nécessite des choix judicieux pour certains paramètres tels que, la fréquence d'échantillonnage des signaux expérimentaux, le type de l'ondelette, l'ordre de l'ondelette et le niveau de décomposition. Le choix de l'ondelette mère type "Daubechies" en raison que la fonction d'échelle réduit au minimum le recouvrement entre les bandes de fréquence qui ne peuvent pas être évitées. En fait, le recouvrement n'affecte pas l'exécution de diagnostic, mais il aide à améliorer l'analyse de l'approximation et des détails.

3.5.2.3 Analyse du courant statorique par la décomposition multi niveau d'ondelette

La décomposition en multi niveau du courant statorique est réalisée à l'aide de l'ondelette mère Daubechies44 (db44)

Niveau	Bandes de fréquences approximation		Bandes de fréquences détail	
J=1	A1	0-250	D1	364-728
J=2	A2	0-125	D2	182-364
J=3	A3	0-62.5	D3	91-182
J=4	A4	0-31.25	D4	91-45
J=5	A5	0-15.625	D5	45-22.5

Tableau 3.2 niveau de décomposition en ondelette

Le **Tableau 3.2** indique les différentes bandes de fréquence obtenues par la décomposition en ondelettes discrète.

On va présenter l'analyse des signaux des courants statoriques du moteur asynchrone triphasé à l'aide méthode de transformation d'ondelette qui donne les informations

fréquentielles et temporelles. On a fait cinq essais appliquer à deux courant staorique pour un défaut de court-circuit de 20% à l'instant $t= 1s$ dans la phase « A »et « B ».

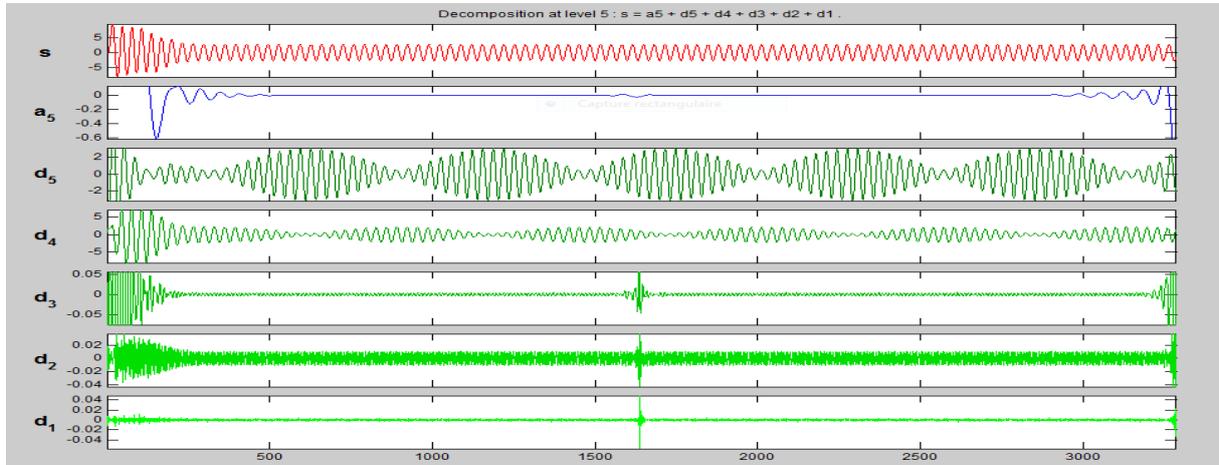


Figure 3.30 TO du courant isa sans défaut ($f= 50$ Hz)

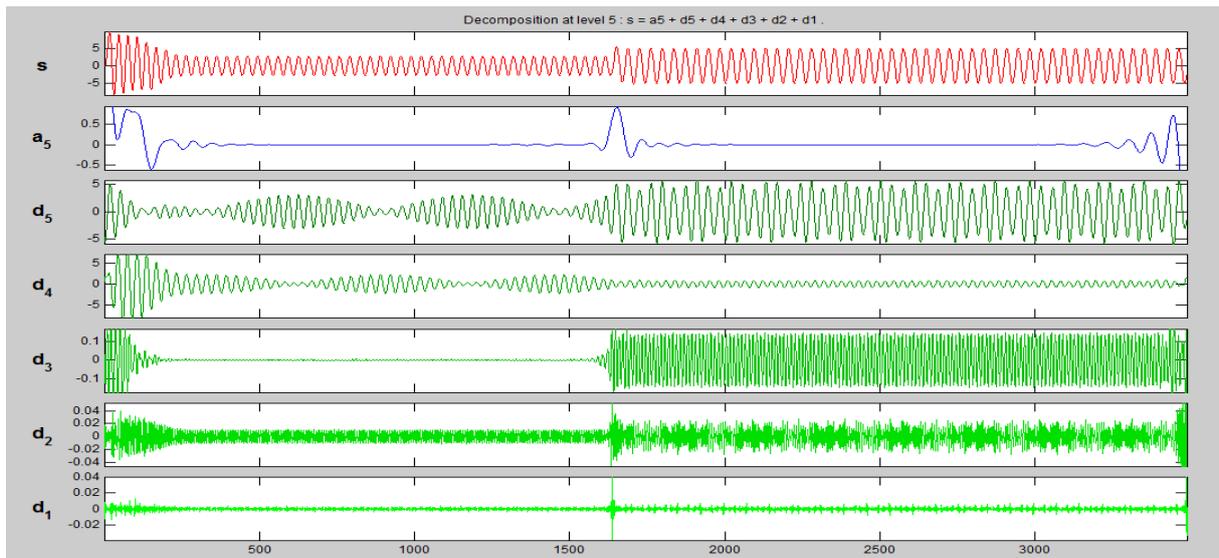


Figure 3.31 TO du courant isa avec défaut ($f= 50$ Hz)

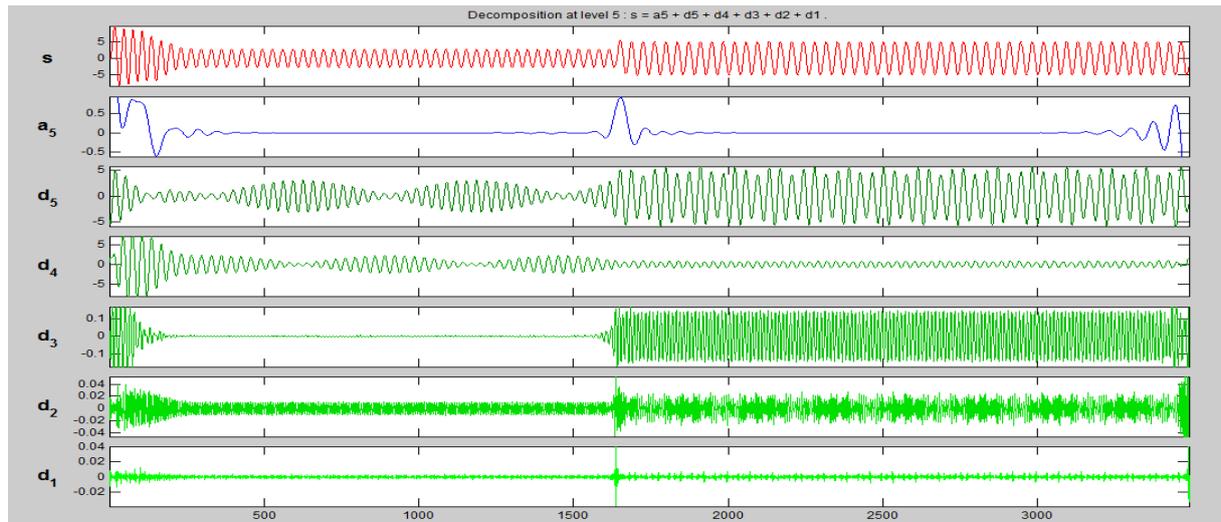


Figure 3.32 TO du courant isb avec défaut ($f = 50$ Hz)

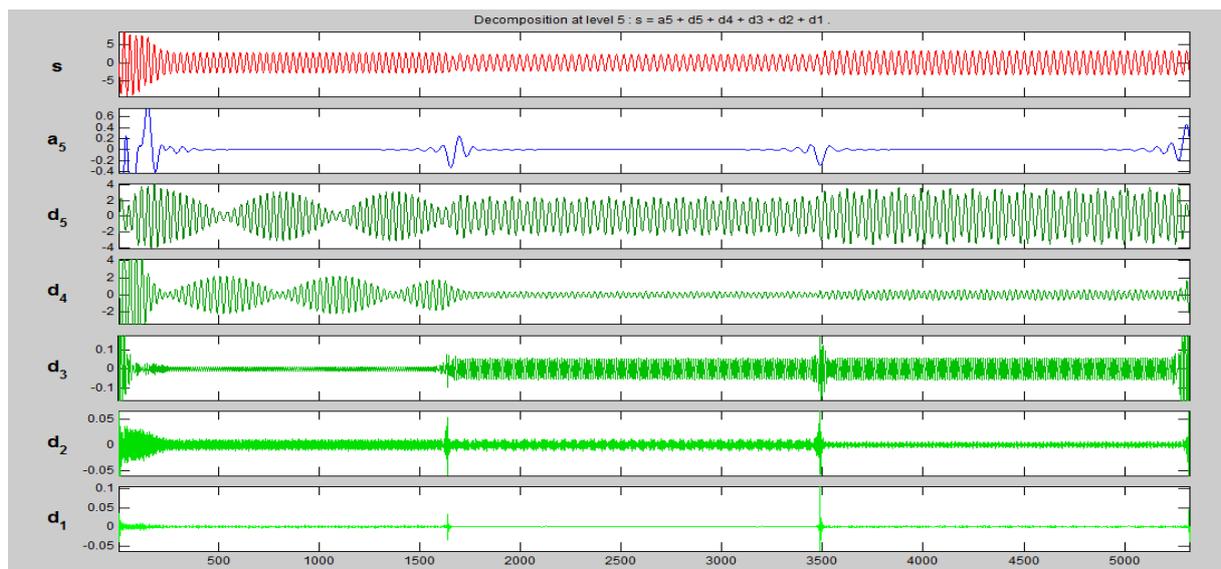
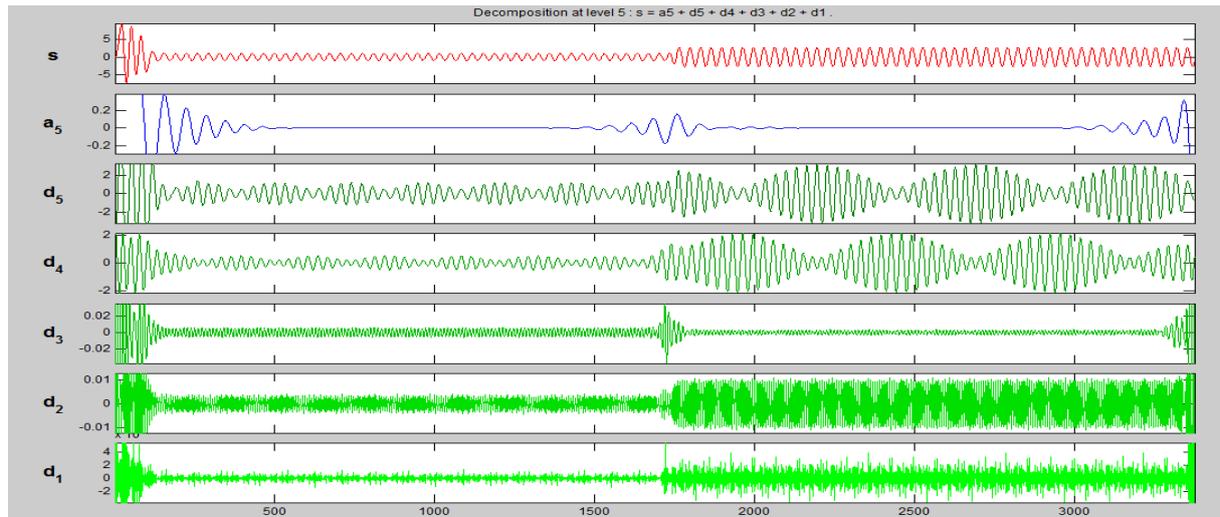


Figure 3.33 TO du courant isa avec deux défaut l'un dans isa et l'autre dans isb ($f = 50$ Hz)



Figures 3.34 TO du courant i_{sb} avec deux défaut l'un dans i_{sa} et l'autre dans i_{sb} ($f = 50$ Hz).

Les figures 3.30, 3.31, 3.32, 3.33 et 3.34 représentent respectivement les résultats d'analyse du courant statorique de la phase « A » et « B » par l'ondelette type décomposition multi niveau pour des fonctionnements sains, à vide et en charge, et avec de défaut de type court-circuit entre spire (20%) dans la phase « A » et « B ». L'ondelette est utilisée en régime variable où la machine est considérée avec défaut et démarrage en charge.

La comparaison des signaux de détail et d'approximation pour une machine avec défauts (court-circuit entre spires) montre que l'amplitude de D_3 , D_4 , D_5 et A_5 ont augmenté par rapport à celui dans le cas de la machine saine. Cette augmentation dans D_3 est due à l'effet que la bande de fréquence correspondantes est affectée par les différents types de défauts.

3.6 Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à la diagnostic de la machine asynchrone triphasée à cage en vu du défaut de court-circuit entre spire, essentiellement sensible au changement d'état de la machine a été établi, ce qui a permis d'étudier et d'analyser l'effet du défaut de court-circuit par le biais du spectre du courant statorique, en utilisant deux technique de base la FFT et l'ondelette.

L'analyse par la transformée d'ondelettes constitue donc un outil efficace pour la détection du défaut de court-circuit entre spires.

Introduction générale

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire présente la détection des défauts statoriques de la machine asynchrone. Les outils d'analyse et diagnostic de défaut sont à base de l'utilisation du spectre par le biais de la transformée de Fourier (FFT) et d'ondelette(TOD). Pour mener cette étude, le mémoire est structuré en trois chapitres :

Dans le premier chapitre nous allons présenter le cadre théorique des ondelettes suite de leur grande importance dans le domaine de traitement du signal, pour cela nous citons les différentes transformations apparues avant les ondelettes.

Le second chapitre, est consacré audiagnostic de défaut de la machine asynchrone. Une analyse de référence bibliographiques des divers défauts pouvant affecter le bon fonctionnement de la machine asynchrone ainsi que les différents méthodes de détection et diagnostique de ces défauts sont représentés.

Le troisième chapitre, est consacré au diagnostic de défaut de type court-circuit. Deux technique d'analyse spectrale du courant statorique sont utilisées en régime stationnaire à base de FFT et non stationnaire à base de l'ondelette.

Enfin une conclusion générale où on présente une synthèse des résultats obtenus ainsi que les perspectives futures pour l'amélioration de ce travail.

Bibliographie

- [1] J.Morlet, G. Arens , E. Fourgeau et D. Giard, "Wave propagation and sampling theory, 1, complex signal and scattering in multilayered media", Geophysics,1982.
- [2]P. Goupillaud, A. Grossmann and J. Morlet, "Cycle-octave and retard transforms in seismic signal analysis", Geoexploration, Elsevier Science publishers, Amsterdam, 23 pp.85-102, 1984.
- [3] Philippe Gaillot. Ondelettes continues en Sciences de la Terre - méthodes et applications - .Signal and Image processing. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2000.
- [4] FrédéricTruchetet, « Ondelettes pour le signal numérique », 1998.
- [5]YOUSSEF BENTALEB Analyse par ondelettes des signaux sismiques : Applications aux ondes de surface université Mohammed v- agdal , Rabat – Maroc 2007.
- [6] R. BENALI « Analyse du signal ECG par réseau adaptif d'ondelettes en vue de la reconnaissance de pathologies cardiaques », Université Abou BEKR BELKAID, 2013.
- [7] Y.MOHIEDINE,«Etude et implémentation de la transformée en ondelette discrète dans la détection des échos de défauts noyés dans le bruit de structure des matériaux ». Mémoire de magistère en signaux et système, Université de Blida, 2007.
- [8] B. Vaseghi, "Contribution à l'étude des machines électriques en présence de défaut entrespires," Thèse de doctorat, GREEN - Groupe de Recherche en Electrotechnique et Electronique de Nancy, Nancy Université - Institut National Polytechnique de Lorraine, 2009.
- [9] R. Casimir, E. Bouteleux, H. Yahoui, G. Clerc, H. Henao, C. Delmotte, G. A. Capolino, G. Rostaing, J. P. Rognon, E. Foulon, L. Loron, H. Razik, G. Didier, G. Houdouin, G. Barakat, B. Dakyo, S. Bachir, S. Tnani, G. Champenois, J. C. Trigeassou, V. Devanneaux, B. Dagues, and J. Faucher, "Comparison of modelling methods and of diagnostic of asynchronous motor in case of defects," in 9th IEEE International Power Electronics Congress - CIEP 2004, 2004, pp. 101-108.
- [10] S. A. S. Al Kazzaz and G. K. Singh, "Experimental investigations on induction machine condition monitoring and fault diagnosis using digital signal processing techniques," Electric Power Systems Research, vol. 65, pp. 197-221, 2003.

Bibliographie

- [11] D. Thailly, "Etude du champ de dispersion des machines à courant alternatif : Application au diagnostic," Thèse de doctorat, Laboratoire Systèmes Electrotechniques et Environnement (LSEE), Université d'Artois, Béthune, France, 2007.
- [12] G. Didier « Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances ».Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 1,2004.
- [13] H. RAZIK « le contenu spectral du courant absorbe par la machine asynchrone en cas de défaillance, un état de l'art. *GREEN-UHP Faculté des Sciences, Vandœuvre-lès-Nancy*. 2002
- [14] A. Abdrhime « grandeurs non invasives pour le diagnostic des machines asynchrones » université Ferhat Abbas Sétif ,2010.
- [15] A. Ibrahim « Contribution au diagnostic de machines électromécaniques : Exploitation des signaux électriques et de la vitesse instantanée », thèse doctorat, université de Saint Etienne 2009.
- [16] B. Oussama Abdelkader et M. Youcef « Estimation des défauts statoriques de la machine asynchrone triphasée par le filtre de Kalman étendu » mémoire de master en génie électrique, Université de Blida, 2012.

Représentation multiplicative du modèle

On notera le modèle de la MAS obtenu, modèle multiplicatif, on le représentera avec un vecteur d'état à sept variables qui seront [16] :

- trois courants statoriques.
- trois flux rotoriques.
- la vitesse mécanique.

Le vecteur d'état est donné ci-dessous :

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \\ \varphi_{ra}^* \\ \varphi_{rb}^* \\ \varphi_{rc}^* \\ \Omega \end{bmatrix}$$

Le modèle de la MAS en présence de défaut de court-circuit de spires est

$$\frac{d}{dt}[i_s] = A_{m11}[I_s] + A_{m12}[\varphi_r^*] + B_{m11}[U_s]$$

$$\frac{d}{dt}[\varphi_r^*] = A_{m21}[i_s] + A_{m22}[\varphi_r^*]$$

A ces équations, il faut ajouter l'équation mécanique.

Les matrices A_{m11} , A_{m12} , A_{m21} , A_{m22} , B_{m11} sont données par :

$$[A_{m11}] = \begin{bmatrix} \frac{a_1}{f_a} + a_2 & \frac{a_3 + a_4 f_b}{f_a} & \frac{a_3 + a_4 f_c}{f_a} \\ \frac{a_3 + a_4 f_a}{f_b} & \frac{a_1}{f_b} + a_2 & \frac{a_3 + a_4 f_{bc}}{f_b} \\ \frac{a_3 + a_4 f_b}{f_c} & \frac{a_3 + a_4 f_b}{f_c} & \frac{a_1}{f_c} + a_2 \end{bmatrix}$$

$$[A_{m12}] = \begin{bmatrix} \frac{2a_5}{f_a} & \frac{-a_5 + a_6 \omega}{f_a} & \frac{-a_5 - a_6 \omega}{f_a} \\ \frac{-a_5 - a_6 \omega}{f_b} & \frac{2a_5}{f_b} & \frac{-a_5 + a_6 \omega}{f_b} \\ \frac{-a_5 + a_6 \omega}{f_c} & \frac{-a_5 - a_6 \omega}{f_c} & \frac{2a_5}{f_c} \end{bmatrix}$$

$$[A_{m12}] = \begin{bmatrix} 2a_7 f_a & -a_7 f_b & -a_7 f_c \\ -a_7 f_a & 2a_7 f_b & -a_7 f_c \\ -a_7 f_a & -a_7 f_b & 2a_7 f_c \end{bmatrix}$$

$$[A_{m22}] = \begin{bmatrix} a_8 & a_9 + \frac{\sqrt{3}}{3}\omega & a_9 - \frac{\sqrt{3}}{3}\omega \\ a_9 - \frac{\sqrt{3}}{3}\omega & a_8 & a_9 + \frac{\sqrt{3}}{3}\omega \\ a_9 + \frac{\sqrt{3}}{3}\omega & a_9 - \frac{\sqrt{3}}{3}\omega & a_8 \end{bmatrix}$$

$$[B_{m11}] = \begin{bmatrix} \frac{b_1}{f_a^2} & \frac{b_2}{f_a f_b} & \frac{b_2}{f_a f_c} \\ \frac{b_2}{f_a f_b} & \frac{b_1}{f_b^2} & \frac{b_2}{f_b f_c} \\ \frac{b_2}{f_a f_c} & \frac{b_2}{f_c f_b} & \frac{b_1}{f_c^2} \end{bmatrix}$$

La transformation de Park lié au stator est donnée par :

$$[P_s] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

Après l'application de la transformation de Park sur le modèle multiplicatif, le modèle du MAS devient :

$$\frac{d[I_{sdqo}]}{dt} = [P_s] \left([A_{m11}][P_s]^{-1} - \frac{d}{dt} [P_s]^{-1} \right) [I_{sdqo}] + [P_s][A_{m12}][P_s]^{-1} [\varphi_{rdqo}] + [P_s][B_{m11}][P_s]^{-1} [U_{sdqo}]$$

$$\frac{d}{dt} [\varphi_{rdqo}^*] = [P_s][A_{m12}][P_s]^{-1} [I_{sdqo}] + [P_s] \left([A_{m22}][P_s]^{-1} + \frac{d}{dt} [P_s]^{-1} \right) [\varphi_{rdqo}^*]$$

Les paramètres de la machine asynchrone utilisée pour la simulation

$$R_r = 4.85 \Omega$$

$$R_s = 10.4 \Omega$$

$$l_{rs} = 0.0566 \text{ mH}$$

$$l_{rr} = 0.017 \text{ mH}$$

$$M = 0.44 \text{ mH}$$

$$j_0 = 0.0135 \text{ Nm}^2$$

$$fv = 0.00182 \text{ Nm}^2 \text{ s}^{-1}$$

$$p = 2 \text{ (nombre de paires de pôles)}$$

Courant nominal de la machine : 2 Ampère.

