



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



## **Université Amar Thelidji- Laghouat**

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : ELECTROTECHNIQUE

### **MEMOIRE DE MASTER**

Présenté par :

**Chachi Khaoula**

DOMAINE : Sciences et techniques

FILIERE : Génie Electrique

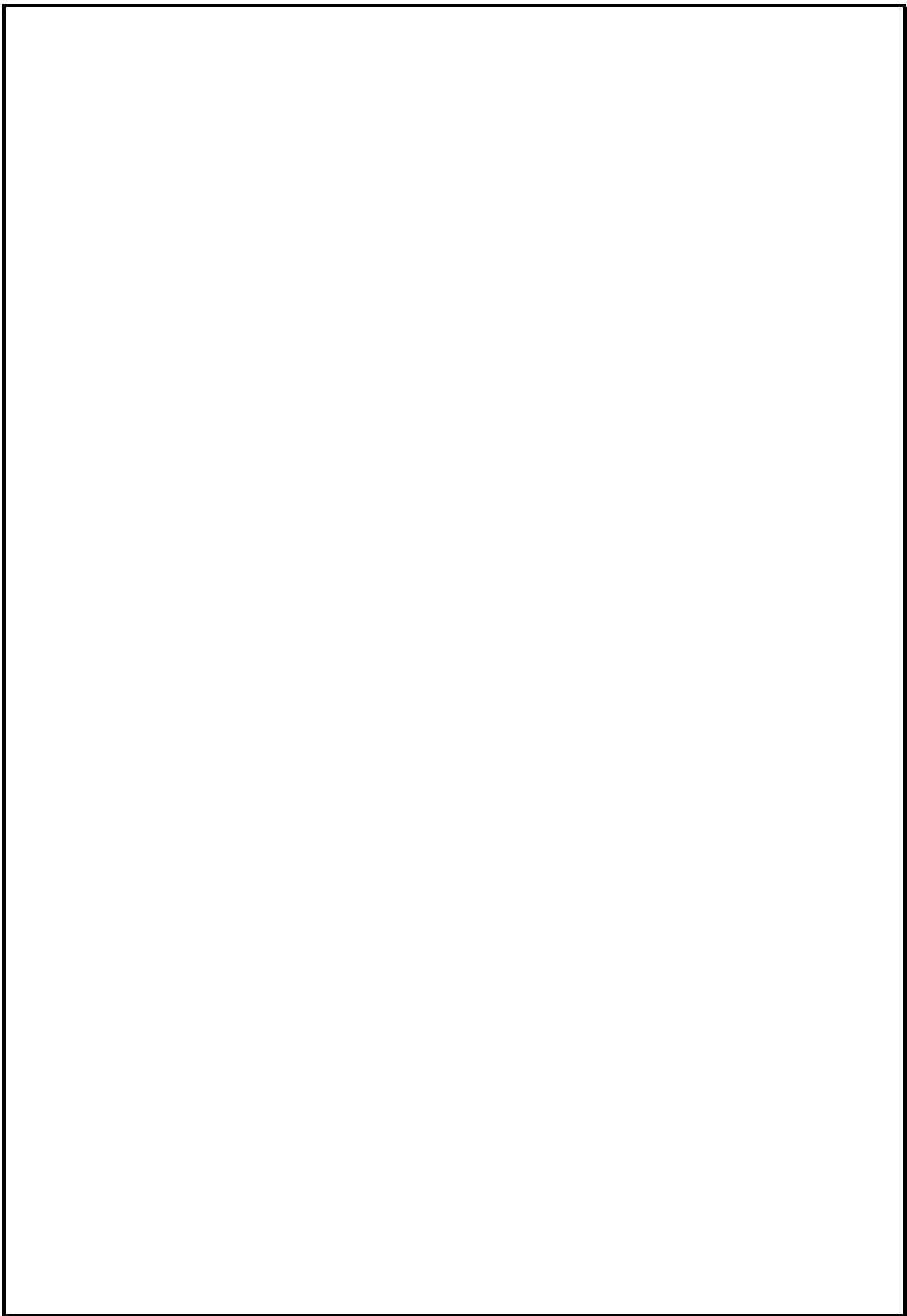
OPTION : Commandes Electriques

#### **Thème**

**Analyse et Diagnostic des défauts d'une machine asynchrone double étoile  
utilisant la technique des ondelettes**

#### **Jury de soutenance :**

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>qualité</b>
<b><i>Mr. A. AMEUR</i></b>	<i>Prof</i>	Président
<b><i>Mme. KOUZI Katia</i></b>	<i>MCA</i>	Rapporteur
<b><i>Mr Guermi Hossine</i></b>	<i>Doctorant</i>	Co-Rapporteur
<b><i>Mr . Benssedik Sid Ahmed</i></b>	<i>MCA</i>	Examineur



## Table des matières

<b>Remerciements</b> .....	<b>I</b>
<b>Dédicaces</b> .....	<b>II</b>
<b>Liste des figures</b> .....	<b>V</b>
<b>Notation</b> .....	<b>IV</b>
<b>Résumé</b>	
<b>INTRODUCTION GENERALE</b> :.....	<b>1</b>
<b>0.1 CONTEXTE ET PROBLEMATIQUES</b> .....	<b>1:</b>
<b>0.1 STRUCTURE DU MEMOIRE</b> :.....	<b>2</b>
<b>Chapitre I : Analyse et diagnostic des défauts MASDE</b>	
I.1 Introduction : .....	3
I.2 Eléments de constitution de la machine asynchrone : .....	3
I.3 caractéristiques des machines multi-phasées : .....	3
I.4.1 Avantages et inconvénients des machines multi-phasées : .....	5
I.4.2. Inconvénients des machines multi-phasées .....	5
I.5 Défaillances dans la machine asynchrone : .....	5
I .5.1 Défauts internes et externes : .....	5
I.6 Différent types des défauts : .....	8
I.6.1 Défauts rotorique : .....	8
I.6.2 Les défauts de roulements : .....	9
I.6.3 Les défauts statoriques : .....	10
I.7 Principe du diagnostic des défauts dans la machine asynchrone : .....	12
I.8 Méthodes de diagnostic des machines asynchrone : .....	13
I.8.1- Méthodes sans modèle : .....	13
I.8.2- Diagnostic par l'analyse des tensions statorique induites : .....	13
I.8.3- Diagnostic par mesure du couple électromagnétique : .....	13
I.8.4- Diagnostic par analyse du courant statorique : .....	13
I.8.4- Diagnostic par mesure des vibrations : .....	14
I.8.6- Diagnostic par utilisation des techniques d'intelligence artificielle : .....	14
I. 8.7 Diagnostic par utilisation Transformée de Fourier rapide (FFT) : .....	14
I.8.8 Diagnostic par utilisation Transformée en Ondelettes (TO) : .....	15
I .9. Conclusion : .....	16

---

## **Chapitre II Modélisation du MASDE sans et avec défaut**

II.1. Introduction :.....	17
II.2 Description de la MASDE :.....	17
II.3 Hypothèses simplificatrices :.....	17
II.4 Modélisation de la machine asynchrone double étoile :.....	18
II.4.1 Représentation de la machine :.....	18
II.5 Modèle naturel de la MASDE :.....	18
II.6 Transformation de Park :.....	22
II.7 Choix de référentiel :.....	23
II.8. Application de la transformation de Park à la MASDE :.....	23
II.9 Puissance absorbée et couple électromagnétique :.....	24
II.10 Modèle d'état de la MASDE dans le repère (d,q) lié au champs tournant :.....	25
II.11 Résultats de simulation :.....	28
II.12 La Transformée de Fourier Rapide (FFT) :.....	31
12.1 Analyse du courant statorique par la FFT :.....	31
II.13 Conclusion :.....	39

## **Chapitre III Diagnostic MASDE Utilisation des Techniques Ondelett**

III.1 Introduction :.....	40
III.2 Techniques de traitement du signal utilisées dans le diagnostic.....	40
III.2 .1 Transformée de Fourier :.....	40
III.2.2 La Transformée de Fourier Rapide (FFT) :.....	41
III.3 Les ondelettes(wavelets):.....	41
III.4. Transformée en ondelettes :.....	42
III.4.1 Définition :.....	42
III.4.2 Transformée en ondelettes continue :.....	44
III.4.3 Transformée en ondelettes discrète (TOD):.....	45
III.5Application de la Technique des Ondelettes au diagnostic de la MASDE :.....	46
III.5.1 Résultats de simulation par la transformée en ondelettes discrète :.....	46

---

# Table des Matières

---

III.6 Conclusion :.....	55
<b>Conclusion Générale : .....</b>	<b>.56</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>57</b>
<b>Annexe</b>	



# *Remerciement*

Louange à Allah, Seigneur des mondes, et que notre Prophète"  
Muhammad"  
prie et que la paix soit sur nous

Tout d'abord je remercie mon encadreur Dr . KOUZI Katia.  
pour avoir encadré projet et pour le soutenir le suivre et l'aider  
sans discontinuer et ses conseils précieux tout au long ce  
travail

Je remercie Mr. Guermi Houssine pour son aide tout le temps et  
dans toutes les étapes de ce travail

Ainsi que mes professeurs et les professeurs qui ont réussi dans  
ce travail.

Je suis très reconnaissant aux membres du jury d'avoir accepté  
l'évaluation et à tous les enseignants du département de génie  
électrique de leurs efforts.

Je voudrais remercier tous ceux qui ont contribué au  
développement de ce travail, à la fois proche et lointain





إلى من علمني النجاح و الصبر... إلى من علمني العطاء بدون انتظار... أبي

إلى من علمتني و عانت الصعاب لأصل إلى ما أنا فيه... إلى من كان دعاؤها سر نجاحي و  
حنانها بلسم جراحي... أمي

إلى جميع أفراد أسرتي العزيزة و الكبيرة كل باسمه أينما وجدوا

إلى ملاكي في الحياة أينما كان

إلى أصدقائي رفاق دربي من داخل الجامعة و خارجها

إلى الاستاذة المشرفة الدكتورة كوزي ...، إلى أساتذتي الكرام الذين أناروا دروبنا بالعلم و  
المعرفة

إلى كل من يقتنع بفكرة فيدعو إليها و يعمل على تحقيقها، لا يبغى بها إلا وجه الله و منفعة  
الناس

إليكم أهدي ثمرة هذا العمل المتواضع





## Dédica

### Dédicace

"A ceux qui m'ont appris le succès et la patience ... A ceux qui m'ont appris l'appel d'offres sans attendre ... Mon père.

"A ceux qui m'ont appris et qui ont eu des difficultés pour arriver à ce que je suis ... A celui qui s'appelait le secret de ma chirurgie de succès et de tendresse ... Ma mère.

À tous mes chers et grands membres de la famille en son nom, où qu'ils se trouvent.

À mon ange dans la vie où qu'il soit.

À mes amis, mon compagnon Derby de l'université et de l'extérieur.

encoadreur Dr . KOUZI Katia ..., à mes chers professeurs qui ont éclairé nos chemins avec le savoir et le savoir.

Pour quiconque est convaincu de l'idée, le demande et s'efforce de le réaliser, ne désire pas seulement le visage de Dieu et le bénéfice des gens.

Voici le fruit de cet humble travail.



### Figures du Chapitre I :

Figur I.1 Machines multi-phasées de type 1.....	4
Figur. I.2 Machines multi-phasées de type 2.....	4
Figure I .3: Causes internes de défauts de la machine asynchrone.....	6
Figure I.4: Causes externes de défauts de la machine asynchrone .....	7
Figure I.5 rupture de barre.....	9
Figure I.6 défaut roulement.....	9
Figure 1.7: Représentation des différents défauts statoriques possible.....	10
Figure I .8: Facteurs aggravant le défaut .....	12

### Figures du Chapitre II :

Figure II.1 Représentation schématique des enroulements de la machine asynchrone double étoile..	18
FigurII.2 Représentation du modèle du MASDE selon les axes (d, q). .....	23
Figure II.3 : Structure de la cage du rotor.....	27
Figure II.5 Performances de la machine asynchrone double étoile avec application d'un couple En charge $C_r=15$ N.m entre $t=3$ s .....	29
Figure II.6 : Spectre du courant statorique pour une machine et avec défaut rotorique(en charge et auid...)	32
Figure II.7: Spectre du courant statorique pour une machine et avec défaut rotorique.....	33
Figure II.7: Spectre du courant statorique pour une machine et avec défaut rotorique.....	33
Figure II. 8 : Couple électromagnétique de la machine avec un défaut les cassur 1barre .....	35
Figure II 9 : Courants statorique $i_{as1}, i_{as2}$ de la machine avec défaut les cassur 1barres à vide et en charge...)	35
Figure II. 10 : Vitesse de la machine pour un défaut les cassur 1barre a vide en charg.....)	33
Figure II 11 : Couple électromagnétique de la machine avec un défaut les cassur 2 barre .....	36
Figure II. 12 : Courants statorique $i_{as1}, i_{as2}$ de la machine avec défaut les cassur 2 barres .....	36
Figure II.13 : Vitesse de la machine pour un défaut les cassur 5 barre.....)	36

## Liste des figures

---

Figure II. 14 : Couple électromagnétique de la machine avec un défaut les cassur 5 barre.....	37
Figure II. 15 : Courants statorique de la machine avec défaut les cassur 5 barres.....	37
Figure II .16 : Vitesse de la machine pour un défaut les cassur5 barre.....	37

### **Figures du Chapitre III :**

Figure III.1: Représentation temporelle vers fréquentielle.....	41
Figure III.2: Représentation temporelle vers ondelettes.....	43
Figure III.3: Quelques formes des ondelettes usuelles.....	44
Figure III.4: Décomposition du signal f en approximations et détails.....	45
FigureIII.5: Décomposition simple du signal f en approximations et détails.....	46
Figure III.6 :TOD multi niveau du courant ias1 en fonctionnement sain.....	47
Figure III. 7:TOD multi niveau du courant ias2 en fonctionnement sai .....	47
Figure III.8 :TOD multi niveau du courant ias1 en fonctionnement .....	48
Figure III.9 :TOD multi niveau du courant ias2 en fonctionnement .....	48
Figure III.10 :TOD multi niveau du courant ias1 en fonctionnement .....	50
Figure III.11 :TOD multi niveau du courant ias2 en fonctionnement .....	50
Figure III.13 :TOD multi niveau du courant ias2 en fonctionnement .....	51
Figure III.14 :TOD multi niveau du courant ias1 en fonctionnement .....	51
Figure III.15 :TOD multi niveau du courant ias2 en fonctionnement .....	52
Figure III.17 :TOD multi niveau du courant Ias2 en fonctionnement .....	52
Figure III.18 :TOD multi niveau du courant ias1 en fonctionnement .....	53
Figure III. 19:TOD multi niveau du courant ias2 en fonctionnement .....	53

<b>Tableau I.1- Les causes des défauts de la machine asynchrone.....</b>	<b>11</b>
--	-----------

<b>Tableau III .1: Familles d'ondelettes.....</b>	<b>42</b>
---	-----------

---

## Notations

---

MASDE: Machine Asynchrone Double Etoile.

$C_{e_{mx}}$  : Couple électromagnétique maximal (N.m)

$p$  : Nombres de phases

$i$  : Courant

$v$  : Tension

$a_{s1}, b_{s1}, c_{s1}$  : Indices correspondants aux trois phases du stator 1

$a_{s2}, b_{s2}, c_{s2}$  : Indices correspondants aux trois phases du stator 2

$a_r, b_r, c_r$  : Indices correspondants aux trois phases du rotor

$R, R_r$  : Résistances statoriques et rotorique

$L_{s1}, L_r, L_{s2}$ : Inductance propres des étoiles statoriques et du rotorique

$L_{ms}$  : Inductance mutuelle entre phases statoriques.

$L_{mr}$  : Inductance mutuelle entre phases rotoriques.

$M_{s1,2}$ : Inductance mutuelle des étoiles statoriques

$M_{s,r}$ : Inductance mutuelle entre phases statoriques et rotoriques

$C_{em}$  : Couple électromagnétique (N.m)

$C_r$  : Couple résistant.

$\Psi_{s1}, \Psi_{s2}, \Psi_r$  : Flux statoriques, rotoriques;

$\Psi_{sq}, \Psi_{sd}$  : flux statorique de la MASDE suivant l'axe d, q ;

$\Psi_{rq}, \Psi_{rd}$  : flux rotorique de la MASDE suivant l'axe d, q ;

$\Psi_m$  : Flux magnétisant ;

$[P(\theta)]$ : Matrice de transformation de Park ;

$[P(\theta)]^{-1}$  : Matrice de transformation inverse de Park ;

$d_{s1,2}, q_{s1,2}, d_r, q_r$  : Axes correspondants au référentiel de PARK

$P$  : nombre de paire de pôles ;

$J$  : Le moment d'inertie de la machine

$F_r$  : Le coefficient de frottement ;

$\Omega$  : Vitesse angulaire de rotation ;

$\theta$  : Angle électrique du rotor par rapport au stator de la machine ;

$\omega_s, \omega_r$ : Pulsations électriques statoriques et rotoriques

FFT :Fast Fourier Transformation

TOC :Transformées en ondelettes continues (continus wavelet transform CWT)

TOD :Transformées en ondelettes discrètes (discrete wavelet transform DWT)

## ملخص:

يتناول العمل الحالي تحليل وتشخيص عيوب الجهاز غير المتزامن ذو النجمتين

باستخدام تقنية الموجات. في المرحلة الأولى ، صممنا المحرك غير المتزامن ذو النجمتين في حالتين ، أي صحي ومع خلل وهو كسر العارضة. تم توضيح العديد من نتائج المحاكاة العددية للنمذجة المقدمة MASDE على أساس تقنية MASDE والتعليق عليها. في المرحلة الأخيرة ، تم اقتراح طريقة لتشخيص عيوب الموجات. العيوب التي تم بحثها في هذا العمل هي كسر القضبان (شريط واحد ، واثنين من القضبان المجاورة ، وخمسة أشرطة) من الدوار. أظهرت نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها فعالية الطريقة المقترحة

الكلمات المفتاحية: محرك غير متزامن ثنائي النجمة ، تشخيص العيوب ، كسر شريط

## Résumé :

Le présent travail traite l'analyse et diagnostic des défauts d'une machine asynchrone double étoile (MASDE) en utilisant la technique des ondelettes. Dans une première phase, on a modélisé le moteur asynchrone double étoile en deux cas à savoir MASDE sain et avec défaut à savoir cassure de barre. Différents résultats de simulation numérique de la modélisation présentée ont été illustrés et commentés. Dans la dernière phase, on a proposé une méthode de diagnostic des défauts du MASDE basée sur la technique des ondelettes. Les défauts considérés dans ce travail sont la cassure des barres (une barre, deux barres adjacentes, et cinq barres) du rotor. Les résultats de simulation obtenus ont montré l'efficacité de la méthode proposée.

**Mots clés :** Moteur asynchrone double étoile, Diagnostic des défauts, Cassure de barre, FFT, technique des ondelettes.

**Abstract:**

The present work deals with the analysis and the detection of Dual Star induction Motor (DSIM) faults using wavelet technique. In a first phase, we modeled the dual star induction motor in two cases such as DSIM healthy and with faults namely broken bar. Various Different numerical simulation results of the presented modeling were illustrated and commented. In the last phase, we proposed faults diagnosis method of DSIM based on wavelet technique. The faults considered in this work are the broken bar (one bar, two adjacent bars, and five bars) of the rotor. The simulation results obtained showed the effectiveness of the proposed method.

**Keywords-** Dual Star Indication Motor (DSIM); Faults diagnosis; Broken bar; FFT, wavelet technique.

## INTRODUCTION GENERALE

### 0.1 CONTEXTE ET PROBLEMATIQUES :

De nos jours, pour ses qualités traditionnellement connues, la machine à induction, ou la machine asynchrone spécialement à cage d'écuriel, s'impose dans le marché de la vitesse variable comme un candidat d'une grande utilité. Ses qualités spécifiques sont celles liées à sa robustesse électromagnétique incarnée par le pouvoir d'entraînement des masses par un champ tournant, ce qui lui confère une simplicité technologique, un prix de revient relativement réduit et un entretien périodique quasi absent.

Actuellement, les grandes variétés des applications industrielles, la croissance de la consommation d'énergie électrique et les applications électriques de fortes puissances telles que l'aviation, la traction ferroviaire....., ont posé des problèmes au niveau de l'ensemble convertisseur-machine en mode normal ou dégradé. Pour répondre aux ces exigences, la segmentation de la puissance constitue une solution appropriée tout en utilisant des machines asynchrones multi-phasées où le nombre de phase est supérieur à trois, alimentées par convertisseurs multi bras. En effet, cette structure offre une réduction des tensions commutées à courant donné, minimisation de manière significative les ondulations du couple électromagnétique, et les pertes rotoriques.

L'exemple le plus courant de la structure multiphasée est la machine asynchrone double étoile (MASDE) qui présente un bon compromis technico-économique. Dans la configuration classique, deux enroulements triphasés identiques, les étoiles se partagent le même stator et sont décalés d'un angle électrique  $\alpha$ . Ces enroulements ont le même nombre de pôles et sont alimentés à la même fréquence. La structure du rotor reste identique à celle d'une machine asynchrone triphasée.

Cependant, la constitution des machines multi-phasées asynchrones ne se diffère par rapport à celle des machines triphasées qu'au niveau statorique, la structure du rotor reste similaire bobinée ou à cage d'écuriel. Pour cela, les machines multi-phasées subissent aussi des défauts comme l'excentricité ou cassure des barres au niveau ou bien un court-circuit au stator.

Dans ce contexte, le présent travail s'inscrit avec comme objectif d'une part, la modélisation de la machine asynchrone double étoile saine et avec défauts, d'autre part l'application de la technique d'ondelettes pour diagnostic des défauts au niveau du rotor du MASDE.

## 0.1 STRUCTURE DU MEMOIRE :

Le présent travail est structuré en trois chapitres donnés comme suit :

Le premier chapitre sera consacré à l'exposé d'un aperçu général sur les différents défauts dans les machines électriques ainsi que les différentes méthodes de diagnostic des défauts.

Le deuxième chapitre sera destiné à la modélisation du MASDE sain et avec défaut. Les défauts considérés dans ce travail sont cassure d'une barre, cassure deux barres adjacentes et cassure de cinq barres. Différents résultats de simulation numérique de la modélisation du MASDE sain et avec défaut seront illustrés et commentés.

Le dernier chapitre fera l'objet de l'application de la technique d'ondelettes pour diagnostic des défauts au niveau du rotor du MASDE. Les résultats de simulation seront alors donnés pour confirmer cette assertion.

Pour clôturer ce travail, une conclusion générale sera donnée pour avancer quelques remarques et présenter les éventuelles perspectives quant à la continuation de ce travail.

## I.1 Introduction :

Dans ce chapitre, on essaye de décrire le comportement du système à étudier à savoir à la machine asynchrone double étoile. Après avoir cité les différents défauts pouvant survenir dans la machine et leurs causes, on essaye d'abord de parler brièvement des techniques de base couramment utilisées dans le domaine du diagnostic des défauts.

une citation des méthodes de modélisation de la machine en le diagnostic des défauts rotorique et statorique sera effectuée [1].

## I.2 Eléments de constitution de la machine asynchrone :

La machine asynchrone à cage ou MAS est une machine électrique tournante assurant la tâche de la conversion d'énergie par induction électromagnétique.

Les parties constitutives de la machine asynchrone sont:

- **le stator:** partie fixe de la machine, constituée de disques en tôles magnétiques portant les enroulements chargés de magnétiser l'entrefer.
- **le rotor:** c'est la partie tournante où est constitué de disques en tôles magnétiques empilés sur l'arbre de la machine.
- **les organes mécaniques:** permettant la rotation du rotor et le maintien des différents sous-ensembles.

## I.3 caractéristiques des machines multi-phasées :

Suivant le nombre de phases qu'on peut avoir dans le stator (les phases statoriques)

qui est ou nom multiple de trois on distingue deux types de "machines multi phases de type 1" type 2 plus, on considère rarement les où le nombre de phases est un nombre pair sauf si celui-ci est un multiple de trois [1].

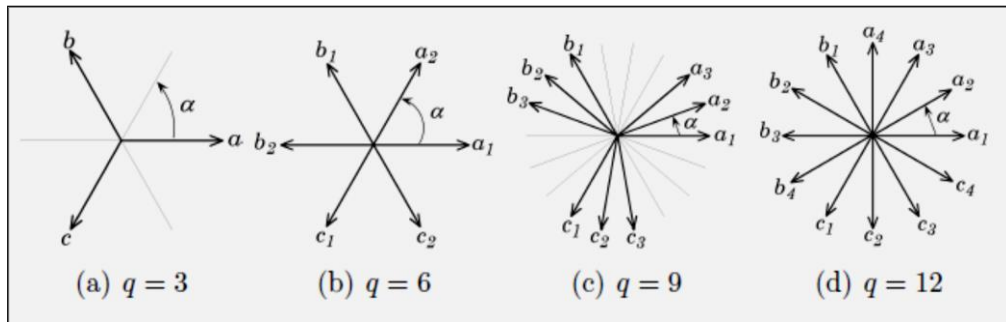
On peut avoir plusieurs configurations possible dans une machines à nombre de phases donné suivant le décalage angulaire  $\alpha$  entre deux bobines adjacentes. C-à-est dire le décalage entre les étoile, pour pouvoir différencier entre les configurations possibles, on peut introduire un autre terme : le nombre de phases équivalent, il est défini comme suit :

$$n_{ph} = n_{ph} \alpha = \frac{180^\circ}{\alpha}$$

Par exemple : une machine double étoile hexa-phasées (6 phases) et le décalage angulaire entre les étoiles  $\alpha = \frac{\pi}{6}$  a des caractéristiques différentes de celles d'une machine ayant même nombre de phase mais leurs étoile sont décalées de  $\frac{\pi}{3}$

- **Machines multiphasées type 1**

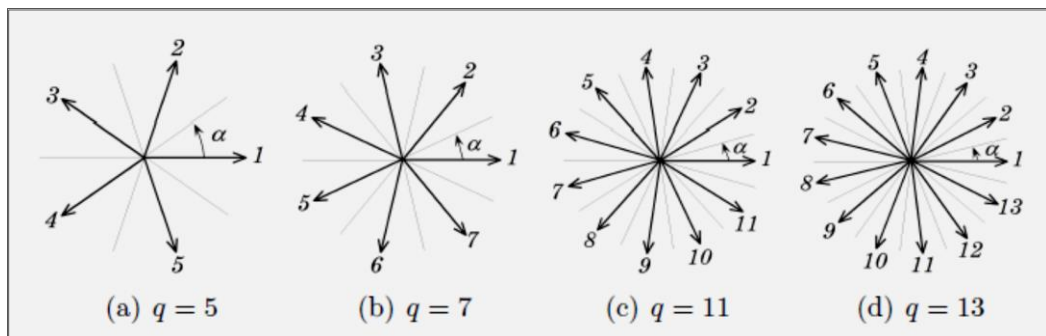
Les machines polyphasées du type 1 dans lesquelles le nombre de phases statoriques  $q$  est multiple de trois  $q = 3k$  ( $k = 1, 2, 3\dots$ ). Ses machines sont également connues sous l'appellation machines multi-étoiles, la machine asynchrone double étoile (MASDE). Elle est robuste, fiable et répond à de meilleurs critères de performances par rapport à la machine ordinaire (simple étoile) avec un rendement très élevé. La figure ci-dessous donne des exemples sur les machine multiphasées de type 1 [1].



Figur I.1 Machines multi-phasées de type 1.

- **Machines multiphasées type 2**

Les machines polyphasées du type 2 sont bien entendu des moteurs dont le nombre de phases statoriques  $q$  est un nombre impair. La figure suivante montre des exemples sur les machines multiphasées de type 2 [2].



Figur. I.2 Machines multi-phasées de type 2.

### I.4.1 Avantages et inconvénients des machines multi-phasées :

Les machines multi-phasées sont plus avantageuses que les machines conventionnelles.

Parmi ces avantages on peut citer : la segmentation de puissance et la fiabilité

- **Segmentation de puissance :**

L'une des solutions pour réduire les courants de phases sans réduire les tensions d'alimentations, est d'augmenter le nombre de phases statoriques.

La puissance totale demandée par une machine est alors réduite dans chaque phase.

Avec cette puissance, on peut alimenter la machine par un onduleur dont les composants semi-conducteurs de calibre inférieur peuvent fonctionner à des fréquences de commutation plus élevées.

Cela permet de minimiser les ondulations du courant et de couple.

- **Fiabilité :**

Pour la machine multiphasée la contrainte d'avoir une ou plusieurs phases au moins déconnectée ne pose pas de problème tant que trois phases restent actives. On peut avoir jusqu'à  $(q-3)$  phases ouvertes, tandis que la perte d'une phase dans une machine triphasée provoque des ondulations du couple de forte amplitude [2].

### I.4.2. Inconvénients des machines multi-phasées

L'inconvénient majeur des machines multi-phasées est l'apparition des courants harmoniques de circulation lors d'une alimentation par onduleur de tension.

**Le coût :** le nombre de semi-conducteurs dont est constitué le convertisseur statique augmente avec l'augmentation du nombre de phases statoriques de la machine, ce qui augmente le coût de l'ensemble convertisseur-machine.

Complication du système de commande, cela est dû à la multiplication du nombre de semi-conducteurs

## I.5 Défaillances dans la machine asynchrone double étoile :

La machine asynchrone est considérée comme robuste mais peut être soumise à des contraintes au cours de son fonctionnement : longue durée, conditions dures, ce qui provoque sa défaillance.

Les principaux défauts de la machine asynchrone peuvent être classés par catégories dans deux types: mécaniques et électriques.

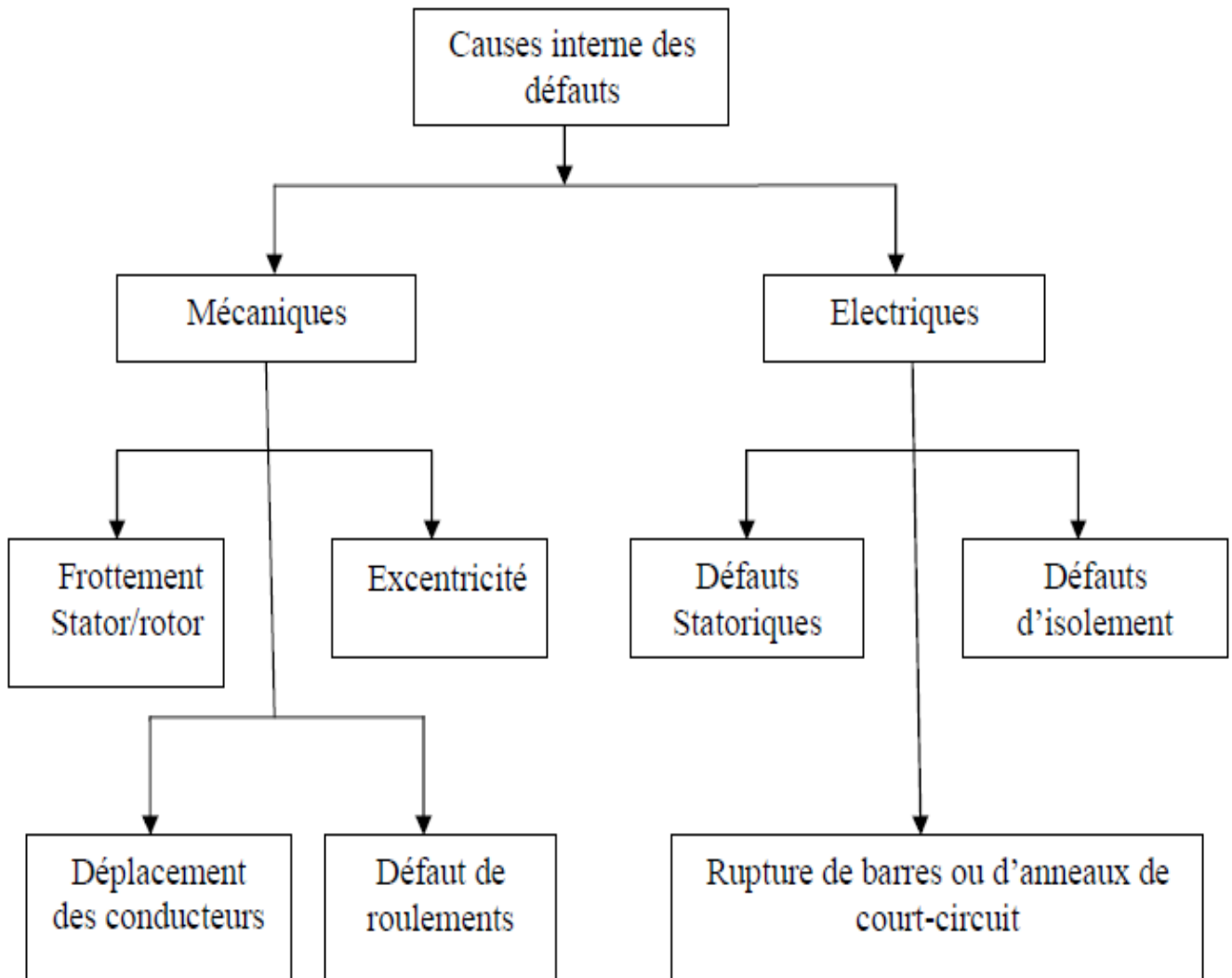
Les sources des défauts de la machine peuvent être internes, externes .

### I.5.1 Défauts internes et externes :

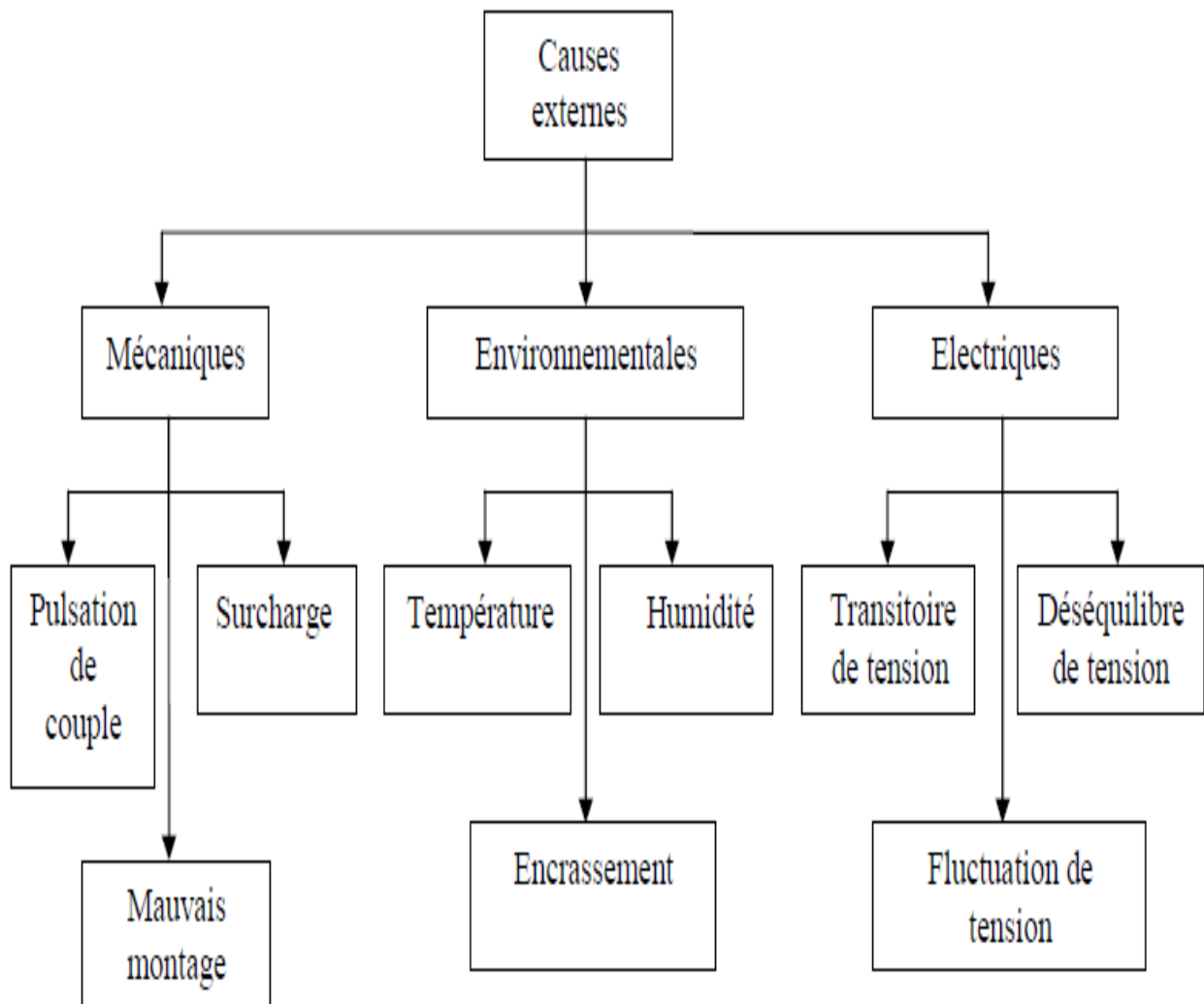
Il existe deux types de défauts principaux : *internes* et *externes*. Les causes de ces défauts sont brièvement et respectivement décrites dans les organigrammes des figures I.3 et I.4 on peut ainsi

remarquer que les défauts internes de la machine sont causés par les constituants de la machine (circuits magnétiques rotorique et statorique, bobinages statoriques, entrefer mécanique, cage rotorique,...) alors que les défauts *externes* sont provoqués, soit par les tensions d'alimentation et la charge mécanique, soit par l'environnement de l'utilisation de la machine.[ 2]

D'après les organigrammes Figure I .3 et Figure I.4 les origines des défauts sont diverses Thermique, mécanique, électrique ou encore environnementale. A titre indicatif, les démarrages fréquents provoquent des courants élevés dans les barres rotoriques.[3 ]



**Figure I .3: Causes internes de défauts de la machine asynchrone**



**Figure I.4: Causes externes de défauts de la machine asynchrone**

Celles-ci engendrent par conséquent des sur échauffements et des contraintes *mécaniques* conduisant à terme à des fissures puis à une cassure de barres.

Par effet d'avalanche la barre cassée accélère la rupture des barres adjacentes pouvant aboutir jusqu'à la destruction totale du rotor.

De même, les efforts électrodynamiques que subissent les conducteurs des phases se traduisent par des vibrations mécaniques ayant pour effet de détériorer l'isolation. Sur le plan *électrique*, les fronts de tensions générés par les convertisseurs statiques accentuent le phénomène de décharges partielles et réduisent, par conséquent, la durée de vie de l'isolant [4].

Quand aux origines *environnementales*, l'humidité et les produits corrosifs ou abrasifs sont les plus rencontrés.

Au niveau de l'*entrefer*, les défauts se manifestent par une excentricité statique, une excentricité dynamique ou une excentricité mixte. Le défaut d'excentricité statique est généralement dû à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator [ 5].

Le défaut d'excentricité dynamique peut être causé aussi bien par une déformation du cylindre rotorique que par une déformation du cylindre statorique.

L'excentricité mixte est une combinaison des deux.

Au niveau de la cage, les défauts se manifestent par la rupture de barres ou d'anneaux de court-circuit.

Ces ruptures de barres ou de portions d'anneau peuvent être dues, par exemple, à une surcharge mécanique (démarrages fréquents,..), à un échauffement local excessif ou encore à un défaut de fabrication (bulles d'air ou mauvaises soudures) [6 ].

## **I.6 Différent types des défauts :**

Les défauts rencontrés dans la machine suivant leurs localisations sont :

### **I.6.1 Défauts rotorique :**

Les cassures de barres et de portion d'anneaux des cages sont très fréquentes, la détection de ces défaillances est rendue difficile par le fait que lors de leurs apparitions, la machine continue de fonctionner.

Ces défauts ont par ailleurs un effet cumulatif.

Le courant que conduisait une barre cassée, par exemple, se répartit sur les barres adjacentes.

Ces barres sont alors surchargées, ce qui conduit à leurs ruptures, et ainsi de suite jusqu'à la rupture d'un nombre suffisamment important de barres pour provoquer l'arrêt de la machine.

Elles provoquent aussi une dissymétrie de répartition de courants au rotor et conduisent à de fortes oscillations dans le couple et la vitesse. Ceci va générer des vibrations et l'apparition de défauts mécaniques [7].

- Rupture des barres.
- Cassure d'une portion d'anneau.
- Excentricité statique et dynamique.
- Défaut du circuit magnétique (rupture de tôles).



*Figure 1.5 rupture de barre*

### **I.6.2 Les défauts de roulements :**

Les défauts de roulements peuvent être causés par un mauvais choix de matériaux à l'étape de fabrication.

Les problèmes de rotation au sein de la culasse du roulement, causés par un roulement abîmé, écaillé ou fissuré, peuvent créer des perturbations au sein de la machine.

La graisse, qui permet la lubrification et la bonne rotation des roulements, peut, dans certaines applications, se rigidifier et causer une résistance à la rotation. L'analyse vibratoire de la machine ou l'analyse harmonique des courants statoriques permet de détecter ce type de défaillances [8].

- Trous dans les gorges déroulements intérieurs et extérieurs.
- Ondulation de la 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.



*Figure 1.6 défaut roulement*

### 1.6.3 Les défauts statoriques :

Les courts-circuits entre spires ou bobines sont les défauts les plus nuisibles et les plus rencontrés au niveau du stator.

Ils proviennent souvent d'une dégradation du matériau isolant recouvrant les conducteurs.

Cette dégradation est due principalement à un échauffement anormal dans le bobinage.

Le courant, dans les spires court-circuitées, atteint des valeurs énormes et l'augmentation de la température qui en suit entraîne la destruction de tous les isolants et par conséquent la défaillance complète de la machine. [9]

- Court-circuit dans les spires d'une même phase.
- Court-circuit entre phases.
- Coupure d'une phase.
- Défaut du circuit magnétique (rupture de tôles).
- Défaut de l'isolation masse au niveau du bobinage suite à un vieillissement prématuré du au milieu de fonctionnement hostile ou non et à la façon dont est alimenté le moteur.
- Défaut d'alignement prononcé par une irrégularité de l'entrefer qui introduirait des frottements, donc des préjudices sur le bobinage du stator.

Ces défauts produisent un ou plusieurs des symptômes suivants :

- Déséquilibre des tensions et des courants.
- Balancement de l'entrefer.
- Augmentation du couple pulsatoire et diminution du couple moyen.
- Augmentation des pertes et diminution du rendement.
- Echauffement et vibration excessifs.

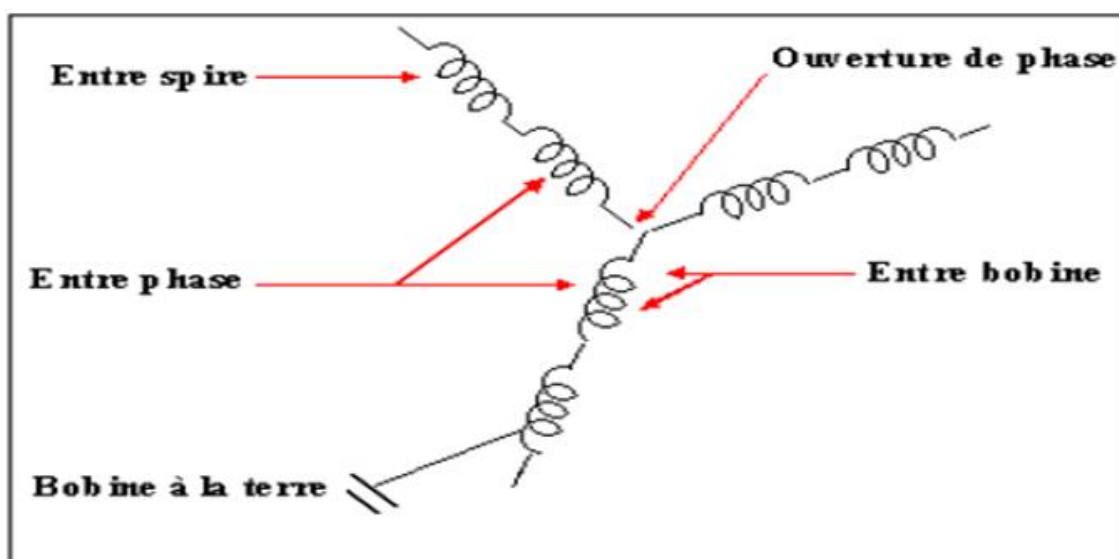


Figure 1.7: Représentation des différents défauts statoriques possible

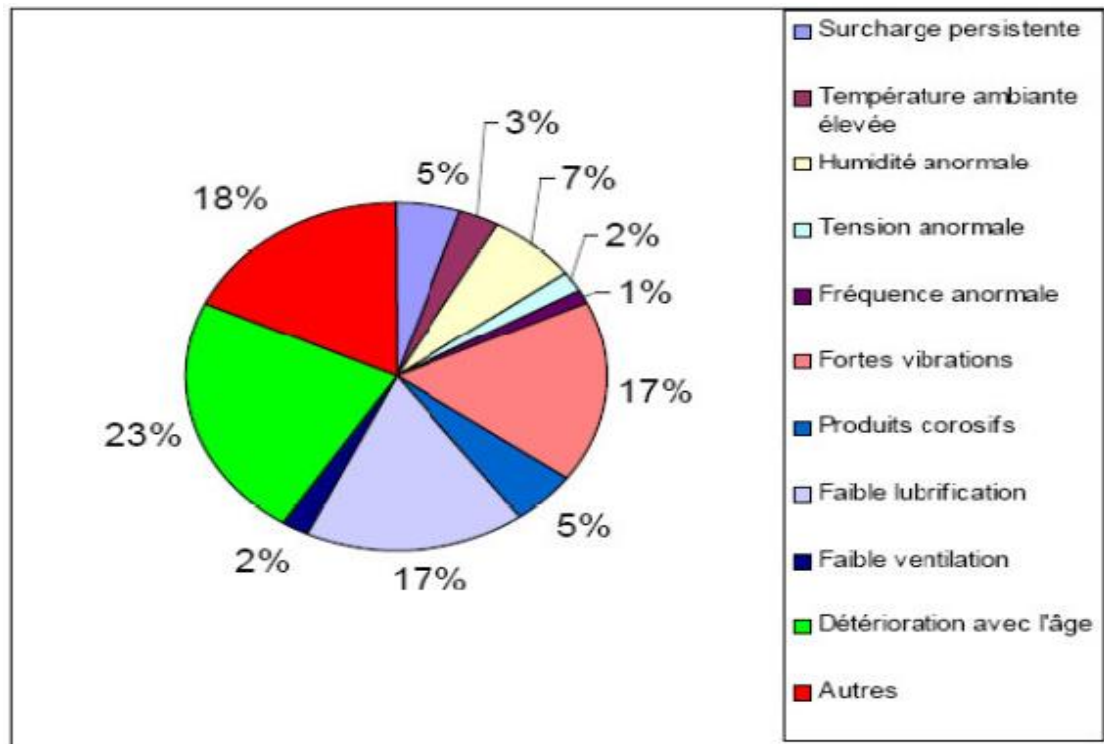
Le (tableau I.1) présente un résumé des causes provoquant des défauts statorique et rotorique [9]

<b>Défauts statorique</b>	
<b>Defaults</b>	<b>Causes</b>
Court-circuit enté Spires	Température excessive, humidité, vibration, surtension
Court-circuit enté Phases	Défaut d'installation, haute température, alimentation déséquilibrée, contrainte d'écrasement au niveau des enroulements.
Vibration du support	Un déséquilibre magnétique, mouvement des enroulements, un déséquilibre de l'alimentation, surcharge, mauvaise installation, un contact avec le rotor
Défaut dissolution	endommagement de l'isolant lors de l'insertion des enroulements, démarrage fréquent, condition de température ou d'humidité extrême.
Un défaut entre le stator et les carcasses	Ecrasement des spires par la carcasse, le cycle thermique, une abrasion de l'isolant, présence de points anguleux dans les encoches, un choc.
déplacement des conducteurs	choc dû à un défaut, démarrage fréquent, vibration des têtes de bobines.
Défaillance des Connecteurs	Ecrasement des conducteurs, vibration excessive

<b>Défauts rotorique</b>	
<b>Defaults</b>	<b>Causes</b>
Défaut du circuit Magnétique	Défaut de fabrication, fatigue thermique, surcharge.
Défaut de roulements	Mauvaise installation, déséquilibre magnétique, perte de lubrifiant, haute température, manque de propreté, charge déséquilibrée.
Désalignement du rotor	Mauvaise installation, déséquilibré magnétique, défaut de roulements.
Roulements mal Lubrifiés	Température excessive, mauvaise qualité de lubrifiant.
Déséquilibre mécanique	Mouvement des anneaux de court-circuit, problème d'alignement.
Rupture de barres	Déséquilibre magnétique, régime transitoire a longue durée, fatigue thermique

**Tableau I.1- Les causes des défauts de la machine asynchrone**

La figure I.5 précise les conditions qui aggravent le défaut: la première source d'aggravation provient de l'usure des éléments avec l'âge et la durée de service. Cette usure est renforcée par les différentes conditions de fonctionnement (surchauffe, humidité, exposition,...). En règle générale, toute différence par rapport au point de fonctionnement nominal contribue à aggraver le défaut naissant voir à le faciliter



**Figure I.8: Facteurs aggravant le défaut**

### I.7 Principe du diagnostic des défauts dans la MASDE:

Le diagnostic consiste à détecter de façon précoce un défaut avant qu'il ne conduise à une défaillance.

La procédure de diagnostic s'articule autour des étapes suivantes:

- ✓ extraction des informations issues de capteurs de la machine pour obtenir des indicateurs de défauts ou résidus.
- ✓ Le résidu représente la différence entre l'observation et la valeur de référence. Avant de chercher la cause du défaut, il est important de valider l'information fournie par les résidus.
- ✓ la valeur du résidu doit être quantifiée afin de produire des symptômes. Le problème d'évaluation des résidus consiste à définir le seuil à partir duquel on déclarera le défaut.
- ✓ la décision constitue la dernière étape de la tâche du diagnostic. A partir de la comparaison de la signature actuelle avec celle de l'expérience, il s'agit de déclarer, dans un premier temps, si l'élément est défaillant ou non. Dans un second temps, si l'élément est défaillant, il faut trouver la cause de l'anomalie [10].

- ✓ Avec l'avancée en technologie numérique ces dernières années, la capacité informatique est maintenant disponible pour surveiller et diagnostiquer les défauts de la machine pour une variété d'anomalies sur une base en temps réel.

## **I.8 Méthodes de diagnostic des machines asynchrone double étoil :**

### **I.8.1- Méthodes sans modèle :**

Ces méthodes sont basées soit sur le traitement de signaux issus de capteurs de grandeurs physiques affectées par les défauts ou soit par des systèmes experts mettant en œuvre des techniques d'intelligence artificielle. Puisque les allures temporelles ne donnent pas beaucoup d'information, on est obligé d'aller vers les techniques de traitement de signal [ 11].

Les méthodes se basant sur l'analyse des signaux d'acquisition ont l'avantage d'être indépendante des fluctuations internes du système. Ainsi, l'information contenue dans les signaux n'est pas affectée par une éventuelle erreur de modélisation. Plusieurs techniques de traitement de signal ont été utilisées depuis longtemps pour analyser le contenu spectral des différents signaux issus des machines électriques tels que : les courants, les puissances, le couple, la vitesse, le flux, les vibrations, ...etc.

### **I.8.2- Diagnostic par l'analyse des tensions statorique induites :**

Cette technique est basée sur l'exploitation du contenu fréquentiel de la tension induite par le flux rotorique dans les enroulements statorique pendant la déconnexion de la machine du réseau.

En utilisant cette approche, les effets de non idéalité de la source (déséquilibres et présence des harmoniques) ainsi que le non linéarité des caractéristiques magnétiques de la machine peuvent être évitées.

### **I.8.3- Diagnostic par mesure du couple électromagnétique :**

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

L'analyse spectrale du signal du couple (mesuré ou estimé), donne des informations sur l'état de santé de la machine .

### **I.8.4- Diagnostic par analyse du courant statorique :**

Parce qu'il est facilement accessible, et vu sa capacité de détecter aussi bien les défauts électromagnétiques que mécaniques, l'analyse du courant statorique occupe une place privilégiée dans le diagnostic par analyse des signaux. Cette technique est connue sous l'abréviation MCSA (Motor Current Signature Analysis).

La MCSA était l'objet de plusieurs travaux de recherche, elle consiste à affecter à chaque défaut une signature spectrale le caractérisant. Dans le même contexte, il a été démontré que la sévérité du défaut est fonction de l'amplitude des composantes fréquentielles qu'il génère, et notamment, des raies déjà présentes dans le moteur sain (harmoniques d'espace).

#### **I.8.4- Diagnostic par mesure des vibrations :**

Toutes les machines électriques produisent du bruit et des vibrations. Même une amplitude très petite des vibrations de l'armature de la machine peut produire un bruit élevé. Le bruit et les vibrations sont provoqués principalement par des forces qui sont d'origine magnétique, mécanique ou aérodynamique. Proportionnelles au carré de l'induction magnétique.

#### **I.8.6- Diagnostic par utilisation des techniques d'intelligence artificielle :**

En dépit des diverses techniques mentionnées précédemment, ces dernières années, la surveillance et la détection de défaut des machines électriques se sont éloignées des techniques traditionnelles pour s'orienter vers des techniques dites d'intelligence artificielle. Ces méthodes sont basées sur la connaissance a priori du système et utilisent un ensemble de règles et de faits (données manipulées par les règles) qui constituent ce qu'on appelle la base de connaissance. Parmi ces méthodes, on peut citer :

- Logique floue,
- Réseaux neuronaux,
- Reconnaissance des formes.

#### **I. 8.7 Diagnostic par utilisation Transformée de Fourier rapide (FFT) :**

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

L'algorithme de base de cette transformée utilise un nombre de points  $N$  égal à une puissance de 2, ce qui permet d'obtenir un gain en temps de calcul, par rapport à un calcul avec la transformée de Fourier discrète, de  $N \log 2$ . Cette transformation fait clairement ressortir le contenu fréquentiel du signal  $x(t)$ . En effet, la FFT décompose le signal  $x(t)$  sur une base de vecteurs propres sinusoïdaux  $e^{2\pi f k T}$ . Malheureusement, ceci convient pour des signaux stationnaires dont les propriétés statistiques sont invariantes dans le temps. Cependant, en pratique la grande majorité des signaux rencontrés sont non stationnaires et la notion de décomposition sur une somme infinie d'exponentielles complexes propres à la FFT s'avère inadéquate. Pour mieux décrire ce type de signaux, on fait appel à des représentations faisant intervenir conjointement le temps et la fréquence.

Le changement ainsi opéré nous permettra d'analyser les lois du comportement fréquentielle du signal au cours du temps.

### **I.8.8 Diagnostic par utilisation Transformée en Ondelettes (TO) :**

La transformée en Ondelette est un outil récent de traitement de signal. Son principe repose sur la décomposition d'un signal dans une base de fonctions particulières.

De ce point de vue, elle est tout à fait comparable à l'analyse de Fourier [12].

Cependant, les ondelettes sont des fonctions oscillantes au sens large, rapidement amorties, contrairement aux fonctions sinusoïdales de l'analyse de Fourier. Par ailleurs, les ondelettes possèdent la propriété de pouvoir être bien localisées en temps ou en fréquence, ce qui les différencie principalement de l'analyse Temps-fréquence classique

**I.9. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons fait état des différents défauts interférant sur la machine asynchrone double étoile et leurs techniques de diagnostic. Ces défauts peuvent être d'origine mécanique ou électrique. de diagnostic des machines électriques et plus particulièrement la machine asynchrone double étoile un panorama sur les méthodes internes et externes utilisées dans le diagnostic des défauts de la machine a été présenté.

L'étude détaillée des divers défauts affectant le fonctionnement de la machine nécessite l'élaboration de modèle de la machine en défaut,

## II.1. Introduction :

L'objectif visé par le présent chapitre est de établir un modèle du MASDE en deux cas, le cas MASDE sain, et MASDE avec défaut.

on terminera ce chapitre par la présentation des résultats de simulation de différentes caractéristiques par diagnostic et statique du MASDE sans et avec défaut

L'étude de la modélisation des machines électriques présente un grand intérêt en raison des impératifs techniques et économiques, conduisant à concevoir et exploiter le matériel au voisinage de leurs limites technologiques.

La machine asynchrone à double étoile (MASDE) n'est pas un système simple, car de nombreux phénomènes compliqués interviennent dans son fonctionnement, comme la saturation, l'effet de peau ...etc. Cependant, nous n'allons pas tenir compte de ces phénomènes, car d'une part, leur formulation mathématique est difficile, d'autre part, leur incidence sur le comportement de la machine considérée comme négligeable dans certaines conditions. Ceci nous permet d'obtenir des équations simples, qui

## II.2 Description de la MASDE :

La MASDE se compose d'un stator portant deux enroulements triphasés identiques et décalés d'un angle électrique  $\alpha=30^\circ$  et d'un rotor à cage d'écureuil, lorsque le rotor tourne à une vitesse  $\Omega$  différente de  $\Omega_s$  la cage rotorique devient le siège d'un système de forces électromotrices triphasées engendrant elles-mêmes des courants induits rotoriques qui se manifestent par l'élaboration d'un couple de forces électromagnétiques sur le rotor tel que l'écart des vitesses soit réduit.

Les grandeurs relatives aux deux étoiles seront notées respectivement par l'indice 1 et l'indice 2 [13].

## II.3 Hypothèses simplificatrices :

Pour l'établissement du modèle de la machine asynchrone double étoile, on a adopté les hypothèses simplificatrices suivantes :

- ✓ Le circuit magnétique est non saturé ;
- ✓ Les pertes par hystérésis et courant de Foucault sont négligées ;
- ✓ Répartition sinusoïdale des forces électromotrices ;
- ✓ Effet de peau négligé ;
- ✓ La machine est de constitution symétrique ;

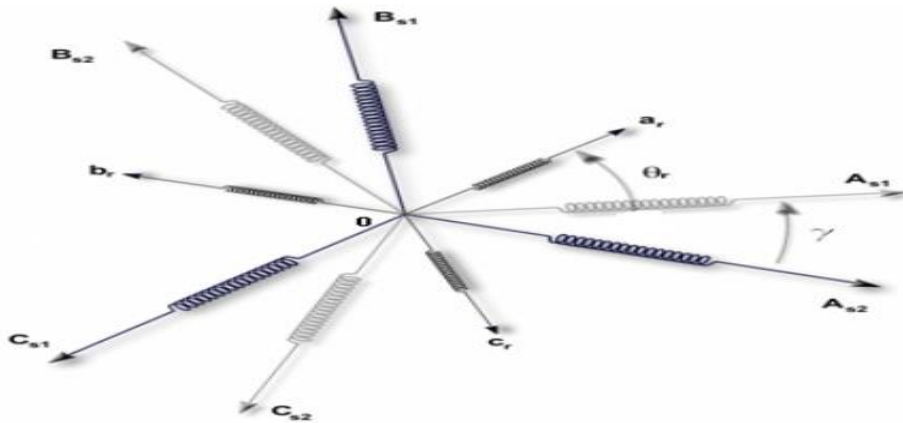
## II.4 Modélisation de la machine asynchrone double étoile :

La machine asynchrone fonctionne en génératrice lorsque son glissement change de signe (glissement négatif en convention génératrice). La pulsation électrique du rotor est alors supérieure à celle des grandeurs statoriques ; le rotor tourne à une vitesse plus élevée que celle du champ tournant statorique [14].

L'étude du fonctionnement de la machine asynchrone double étoile, en moteur comme en génératrice, nécessite de disposer d'un modèle mathématique. Dans le paragraphe suivant nous allons présenter une modélisation analytique.

### II.4.1 Représentation de la machine :

La représentation de la machine asynchrone double étoile est donnée par la figure II.1.



**Figure II.1 Représentation schématique des enroulements de la machine asynchrone double étoile.**

Avec :

$\alpha$  : Angle de décalage entre les deux étoile.

$\theta_r$  : Exprime la position du rotor à l'étoile 1 du stator.

$\theta_r - \alpha$  : Exprime la position du rotor par rapport à l'étoile 2 du stator.

## II.5 Modèle naturel de la MASDE :

- **Equations électriques:**

Les équations électriques de l'étoile 1, de l'étoile 2 et du rotor sont respectivement exprimées par [15]:

$$\begin{aligned}
[v_{s1}] &= [R_{s1}][I_{s1}] + \frac{d}{dt} [\Psi_{s1}] \\
[v_{s2}] &= [R_{s2}][I_{s2}] + \frac{d}{dt} [\Psi_{s2}] \\
[v_r] &= [R_r][I_r] + \frac{d}{dt} [\Psi_r]
\end{aligned} \tag{II.1}$$

Avec :

$[v_{s1}] = [v_{as1} \ v_{bs1} \ v_{cs1}]^T$  : Matrice de tension de l'étoile 1 ;

$[I_{s1}] = [i_{as1} \ i_{bs1} \ i_{cs1}]^T$  : Matrice de courant de l'étoile 1 ;

$[\Psi_{s1}] = [\Psi_{as1} \ \Psi_{bs1} \ \Psi_{cs1}]^T$  : Matrice de flux de l'étoile 1 ;

$[v_{s2}] = [v_{as2} \ v_{bs2} \ v_{cs2}]^T$  : Matrice de tension de l'étoile 2 ;

$[I_{s2}] = [i_{as2} \ i_{bs2} \ i_{cs2}]^T$  : Matrice de courant de l'étoile 2 ;

$[\Psi_{s2}] = [\Psi_{as2} \ \Psi_{bs2} \ \Psi_{cs2}]^T$  : Matrice de flux de l'étoile 2 ;

$[v_r] = [v_{ar} \ v_{br} \ v_{cr}]^T$  : Matrice de tension du rotor ;

$[I_r] = [i_{ar} \ i_{br} \ i_{cr}]^T$  : Matrice de courant du rotor ;

$[\Psi_r] = [\Psi_{ar} \ \Psi_{br} \ \Psi_{cr}]^T$  : Matrice de flux du rotor.

Sous forme matricielle on a :

Pour étoile 1 :  $[V_{abc;s1}] = [R_{s1}][I_{abc;s1}] + \frac{d\Psi_{abc,s1}}{dt}$

Pour étoile 2 :  $[V_{abc;s2}] = [R_{s2}][I_{abc;s2}] + \frac{d\Psi_{abc,s2}}{dt}$

Pour rotor :  $[V_{abc;r}] = [R_r][I_{abc;r}] + \frac{d\Psi_{abc,r}}{dt}$

$$[R_{s1}] = \begin{bmatrix} R_{s1} & 0 & 0 \\ 0 & R_{s1} & 0 \\ 0 & 0 & R_{s1} \end{bmatrix} ; \quad [R_{s2}] = \begin{bmatrix} R_{s2} & 0 & 0 \\ 0 & R_{s2} & 0 \\ 0 & 0 & R_{s2} \end{bmatrix} ; \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

avec :

- $R_{s1}$  : Résistance d'une phase d'une l'étoil 1
- $R_{s2}$  : Résistance d'un phase d'une l'étoil 2
- $R_r$  : Résistance d'un phase Rotor

- **Equations magnétique:**

Les flux sont exprimés en fonction des courant par :

$$\begin{bmatrix} [\Psi_{abc,s1}] \\ [\Psi_{abc,s2}] \\ [\Psi_{abc,r}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{s1,s1}] & [L_{s1,s2}] & [L_{s1,r}] \\ [L_{s2,s1}] & [L_{s2,s2}] & [L_{s2,r}] \\ [L_{r,s1}] & [L_{r,s2}] & [L_{r,r}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i_{abc,s1}] \\ [i_{abc,s2}] \\ [i_{abc,r}] \end{bmatrix} \quad (II.2)$$

Les équations des flux statoriques (étoiles 1 et 2) et rotorique en fonction des courants sous forme matricielle sont données par [16], [17]:

$$\begin{bmatrix} \Psi_{s1} \\ \Psi_{s2} \\ \Psi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{s1,s1} & M_{s1,s2} & M_{s1,r} \\ M_{s2,s1} & L_{s2,s2} & M_{s2,r} \\ M_{r,s1} & M_{r,s2} & L_{r,r} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{s1} \\ I_{s2} \\ I_r \end{bmatrix} \quad (II.3)$$

Les sous matrices de la matrice des inductances sont [15] ,[16]:

$$[L_{s1,s1}] = \begin{bmatrix} (L_{s1} + L_{ms}) & L_{ms} \cos(\frac{2\pi}{3}) & L_{ms} \cos(\frac{4\pi}{3}) \\ L_{ms} \cos(\frac{4\pi}{3}) & (L_{s1} + L_{ms}) & L_{ms} \cos(\frac{2\pi}{3}) \\ L_{ms} \cos(\frac{2\pi}{3}) & L_{ms} \cos(\frac{4\pi}{3}) & (L_{s1} + L_{ms}) \end{bmatrix}$$

$$[L_{s2,s2}] = \begin{bmatrix} (L_{s2} + L_{ms}) & L_{ms} \cos(\frac{2\pi}{3}) & L_{ms} \cos(\frac{4\pi}{3}) \\ L_{ms} \cos(\frac{4\pi}{3}) & (L_{s2} + L_{ms}) & L_{ms} \cos(\frac{2\pi}{3}) \\ L_{ms} \cos(\frac{2\pi}{3}) & L_{ms} \cos(\frac{4\pi}{3}) & (L_{s2} + L_{ms}) \end{bmatrix}$$

$$[L_{r,r}] = \begin{bmatrix} (L_r + L_{mr}) & L_{mr} \cos(\frac{2\pi}{3}) & L_{mr} \cos(\frac{4\pi}{3}) \\ L_{mr} \cos(\frac{4\pi}{3}) & (L_r + L_{mr}) & L_{mr} \cos(\frac{2\pi}{3}) \\ L_{mr} \cos(\frac{2\pi}{3}) & L_{mr} \cos(\frac{4\pi}{3}) & (L_r + L_{mr}) \end{bmatrix}$$

$$[M_{s1,s2}] = L_{ms} \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha + \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha) & \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\alpha - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha) \end{bmatrix}$$

$$[M_{s1,r}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r + \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix}$$

$$[M_{s2,r}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r - \alpha) & \cos(\theta_r - \alpha + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \alpha + \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \alpha) & \cos(\theta_r - \alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \alpha - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \alpha) \end{bmatrix}$$

On peut remarquer que les sous matrices :

$$[M_{s2,s1}] = [M_{s1,s2}]^T, [M_{r,s1}] = [M_{s1,r}]^T, [M_{r,s2}] = [M_{s2,r}]^T.$$

$$[L_{s2,s1}] = [L_{s1,s2}]^t, [L_{r,s2}] = [L_{s2,r}]^t, [L_{r,s1}] = [L_{s1,r}]^t,$$

$L_{s1a} = L_{s1b} = L_{s1c} = L_{s1}$  : Inductance propre de l'étoile 1

$L_{s2a} = L_{s2b} = L_{s2c} = L_{s2}$  : Inductance propre de l'étoile 2

$L_{ra} = L_{rb} = L_{rc} = L_r$  : Inductance propre de rotor

$L_{ms}$  : valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle statorique

$L_{mr}$  : valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle rotorique

$L_{sr}$  : valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle entre une étoile et rotor

$M_{sr}$  : Représente la valeur maximale des coefficients d'inductances mutuelles entre une étoile et le rotor ;

L'expression du couple électromagnétique est donnée par :

$$C_{em} = \frac{P}{2} \left\{ [i_{s,abc1}] \frac{d}{d\theta_r} [L_{s1,r}] \cdot [i_{r,abc}]^t + [i_{s,abc2}] \frac{d}{d\theta_r} [L_{s2,r}] \cdot [i_{r,abc}]^t \right\} \quad (II.4)$$

L'équation mécanique est décrite par la relation suivante :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} + C_r + F_r \Omega \quad (II.5)$$

$J$  : le moment d'inertie de la machine

$C_{em}$  : le couple électromagnétique

$C_r$  : le couple résistant couple de la charge

$F_r$  : le coefficient de frottement

$\Omega$  : vitesse angulaire de rotation

## II.6 Transformation de Park :

La transformation de Park est constituée d'une transformation triphasée-biphasée. Elle permet de passer du repère (a b c) vers le repère mobile (d, q), on définit une matrice unique de transformation pour les courants, les tensions et les flux qui conserve les forces magnétomotrices et on suppose que la composante homopolaire est nulle alors on a [16] :

La figure (II.2) représente le modèle de la MASDE selon le système d'axes (d, q) tournant à la vitesse  $w_{\text{coor}}$  [17].

L'application de la transformation de Park aux systèmes d'équations de tension donne [18],

$$[P(\theta_{s1})] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 6})$$

La matrice de Park pour l'étoile 2 est donnée par :

$$[P(\theta_{s2})] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \alpha) & \cos(\theta - \alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta - \alpha) & -\sin(\theta - \alpha - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 7})$$

La matrice de Park pour le rotor est exprimée par :

$$[P(\theta_r)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \theta_r) & \cos(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta - \theta_r) & -\sin(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 8})$$

Avec :

$[P(\theta_{s1})]$  : Matrice de transformation du premier enroulement statorique (étoile1).

$[P(\theta_{s2})]$  : Matrice de transformation du deuxième enroulement statorique (étoile2).

$[P(\theta_r)]$  : Matrice de transformation d'enroulement rotorique.

## II.7 Choix de référentiel :

Les équations de la machine asynchrone double étoile peuvent être exprimées dans différents référentiels selon la vitesse attribuée au repère (d,q).

### ➤ Référentiel lié au stator :

Pour ce type de choix,  $\theta_s = 0$  et  $\omega_s = 0$ , ce référentiel est le mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées.

### ➤ Référentiel lié au rotor :

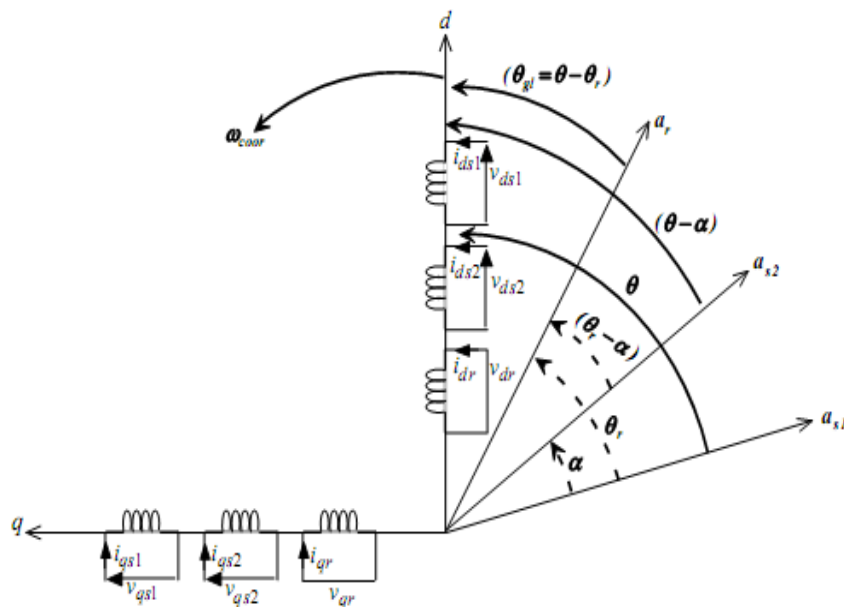
Dans ce référentiel, la vitesse électrique du repère (d,q) est égale à la pulsation mécanique du rotor ( $\omega_s = \omega_r$ ). Ce référentiel est immobile par rapport au rotor, utilisé pour l'étude des régimes transitoires dans les machines asynchrones et synchrones.

### ➤ Référentiel lié au champ tournant :

Dans ce référentiel, la vitesse du repère (d,q) est égale la vitesse du champ tournant  $\omega_s$ . Ce référentiel est utilisé pour réaliser le contrôle vectoriel du fait que les grandeurs de réglage deviennent continues.

## II.8. Application de la transformation de Park à la MASDE :

appliquant la transformation de Park aux équations des tensions (II.1), (II.2), (II.3) et aux équations des flux (II.5), nous obtenons le système d'équations suivant :



FigurII.2 Représentation du modèle du MASDE selon les axes (d, q).

- **Equations des tensions :**

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{s1d} = R_{s1} I_{s1d} + \frac{d\psi_{s1d}}{dt} - \omega_s \Psi_{s1q} \\ V_{s1q} = R_{s1} I_{s1q} + \frac{d\psi_{s1q}}{dt} - \omega_s \Psi_{s1d} \\ V_{s2d} = R_{s2} I_{s2d} + \frac{d\psi_{s2d}}{dt} - \omega_s \Psi_{s2q} \\ V_{s2q} = R_{s2} I_{s2d} + \frac{d\psi_{s2q}}{dt} - \omega_s \Psi_{s2d} \\ 0 = R_r I_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \Psi_{rq} \\ 0 = R_r I_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \Psi_{rd} \end{array} \right. \quad (II.9)$$

- **Equations des flux :**

Les relations entre flux et courants sont données par :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Psi_{s1d} = L_{s1} I_{s1d} + L_m (I_{s1d} + I_{s2d} + I_{rd}) \\ \Psi_{s1q} = L_{s1} I_{s1q} + L_m (I_{s1q} + I_{s2q} + I_{rq}) \\ \Psi_{s2d} = L_{s2} I_{s2d} + L_m (I_{s1d} + I_{s2d} + I_{rd}) \\ \Psi_{s2q} = L_{s2} I_{s2q} + L_m (I_{s1q} + I_{s2q} + I_{rq}) \\ \Psi_{rd} = L_r I_{rd} + L_m (I_{s1d} + I_{s2d} + I_{rd}) \\ \Psi_{rq} = L_r I_{rq} + L_m (I_{s1q} + I_{s2q} + I_{rq}) \end{array} \right. \quad (II.10)$$

Avec :  $L_m = \frac{3}{2} L_{ms} = \frac{3}{2} L_{mr} = \frac{3}{2} L_{sr}$  : Inductance mutuelle cyclique stator-rotor.

## II.9 Puissance absorbée et couple électromagnétique :

La puissance absorbée par la MASDE est donnée par l'expression suivante :

$$P_a = V_{as1} I_{as1} + V_{bs1} I_{bs1} + V_{cs1} I_{cs1} + V_{as2} I_{as2} + V_{bs2} I_{bs2} + V_{cs2} I_{cs2}$$

Comme la transformation de Park permet de conserver la puissance, on peut écrire :

$$P_a = V_{ds1} I_{ds1} + V_{ds2} I_{ds2} + V_{qs1} I_{qs1} + V_{qs2} I_{qs2} \quad (II.12)$$

En remplaçant les tensions ( $V_{ds1}, V_{qs1}, V_{ds2}, V_{qs2}$ ) par leurs expressions dans (II.12),

On obtient:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_e = [R_{s1} I_{ds1}^2 + R_{s2} I_{ds2}^2 + R_{s1} I_{qs1}^2 + R_{qs2} I_{qs2}^2] + \\ + \left[ \frac{d\psi_{ds1}}{dt} I_{ds1} + \frac{d\psi_{ds2}}{dt} I_{ds2} + \frac{d\psi_{qs1}}{dt} I_{qs1} + \frac{d\psi_{qs2}}{dt} I_{qs2} \right] + \\ + [\omega_s (\Psi_{ds1} I_{ds1} + \Psi_{ds2} I_{ds2} + \Psi_{qs1} I_{qs1} + \Psi_{qs2} I_{qs2})] \end{array} \right.$$

L'expression ci-dessus se compose de trois termes:

Le premier terme correspond aux pertes par effet Joule ;

Le deuxième terme correspond à la variation de l'énergie électromagnétique ;

Le dernier terme représente la puissance électromagnétique

$$\text{On a : } C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{P_{em}}{\omega_s} \quad (II.13)$$

En introduisant l'équation de la puissance électromagnétique dans (II.14) on trouve :

$$\begin{cases} C_{em} = P(\Psi_{ds1}i_{qs1} + \Psi_{ds2}i_{qs2} - \Psi_{qs1}i_{ds1} - \Psi_{qs2}i_{ds2}) \\ P_{em} = \omega(\Psi_{ds1}i_{qs1} + \Psi_{ds2}i_{qs2} - \Psi_{qs1}i_{ds1} - \Psi_{qs2}i_{ds2}) \\ C_{em} = PL_m\{(i_{sq1} + i_{sq2})i_{rd} - (i_{sd1} + i_{sd2})i_{rq}\} \end{cases} \quad (II.14)$$

Le couple électromagnétique peut être déduit à partir du flux rotorique :

$$\begin{cases} \Psi_{rd} = L_r i_{rd} + L_m(i_{sd1} + i_{sd2} + i_{rd}) \\ \Psi_{rq} = L_r i_{rq} + L_m(i_{sq1} + i_{sq2} + i_{rq}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} i_{rd} = \frac{\Psi_{rd}}{L_m + L_r} - \frac{L_m}{L_m + L_r}(i_{sd1} + i_{sd2}) \\ i_{rq} = \frac{\Psi_{rq}}{L_m + L_r} - \frac{L_m}{L_m + L_r}(i_{sq1} + i_{sq2}) \end{cases} \quad (II.15)$$

En introduisant  $i_{rd}$  et  $i_{rq}$  dans l'expression (II.16), on obtient :

$$C_{em} = p \frac{L_m}{L_m + L_r} \{ \Psi_{rd}(i_{sq1} + i_{sq2}) - \Psi_{rq}(i_{sd1} + i_{sd2}) \}$$

En l'équation mécanique de la machine peut s'écrire comme suit:

$$\begin{cases} C_{em} = p \frac{L_m}{L_m + L_r} \{ \Psi_{rd}(i_{sq1} + i_{sq2}) - \Psi_{rq}(i_{sd1} + i_{sd2}) \} \\ J \frac{d\Omega_r}{dt} = C_{em} - C_r - F_r \Omega_r \end{cases} \quad (II.16)$$

## II.10 Modèle d'état de la MASDE dans le repère (d,q) lié au champ tournant :

En remplaçant le système d'équation (II.7) dans (II.6) et après arrangement on obtient le modèle de la machine dans le repère (d,q) lié au champ tournant, pour un vecteur d'état

$$[x] = [i_{sd1} \ i_{sq1} \ i_{sd2} \ i_{sq2} \ \Psi_{rd} \ \Psi_{rq}] \text{ et de tension de commande } [v] = [v_{sd1} \ v_{sq1} \ v_{sd2} \ v_{sq2}]$$

et tenant compte que le rotor de la MASDE est en court-circuit. Ce modèle est exprimé par le système suivant :

$$\left. \begin{aligned}
 v_{sd1} &= r_{s1}i_{sd1} + (L_{s1} + L_m)\sigma \frac{di_{sd1}}{dt} + \frac{L_m L_r}{L_m + L_r} + \frac{di_{sd2}}{dt} \frac{L_m}{L_m + L_r} \frac{d\psi_{rd}}{dt} - \omega_s \left[ (L_{s1} + L_m)\sigma i_{sq1} + \frac{L_m L_r}{L_m + L_r} i_{sq1} + \frac{L_m}{L_m + L_r} \psi_{rq} \right] \\
 v_{sq1} &= r_{s1}i_{sq1} + (L_{s1} + L_m)\sigma \frac{di_{sq1}}{dt} + \frac{L_m L_r}{L_m + L_r} + \frac{di_{sq2}}{dt} \frac{L_m}{L_m + L_r} \frac{d\psi_{rq}}{dt} - \omega_s \left[ (L_{s1} + L_m)\sigma i_{sd1} + \frac{L_m L_r}{L_m + L_r} i_{sd1} + \frac{L_m}{L_m + L_r} \psi_{rd} \right] \\
 v_{sd2} &= r_{s2}i_{sd2} + (L_{s2} + L_m)\sigma \frac{di_{sd2}}{dt} + \frac{L_m L_r}{L_m + L_r} + \frac{di_{sd1}}{dt} \frac{L_m}{L_m + L_r} \frac{d\psi_{rd}}{dt} - \omega_s \left[ (L_{s2} + L_m)\sigma i_{sq2} + \frac{L_m L_r}{L_m + L_r} i_{sq2} + \frac{L_m}{L_m + L_r} \psi_{rq} \right] \\
 v_{sq2} &= r_{s2}i_{sq2} + (L_{s2} + L_m)\sigma \frac{di_{sq2}}{dt} + \frac{L_m L_r}{L_m + L_r} + \frac{di_{sq1}}{dt} \frac{L_m}{L_m + L_r} \frac{d\psi_{rq}}{dt} - \omega_s \left[ (L_{s2} + L_m)\sigma i_{sd2} + \frac{L_m L_r}{L_m + L_r} i_{sd2} + \frac{L_m}{L_m + L_r} \psi_{rd} \right] \\
 v_{rq} &= 0 = \frac{L_m}{T_r} (i_{sd1} + i_{sd2}) + \frac{1}{T} \psi_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{T} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{rq} \\
 v_{rq} &= 0 = \frac{L_m}{T_r} (i_{sd1} + i_{sd2}) + \frac{1}{T} \psi_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{T} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{rq} \\
 C_{em} &= p \frac{L_m}{L_m + L_r} \{ \psi_{rd} (i_{sq1} + i_{sq2}) - \psi_{rq} (i_{sd1} + i_{sd2}) \} \\
 \left. \right\} \frac{d\Omega_r}{dt} &= C_{em} - C_r - K_f \Omega_r
 \end{aligned} \right\} \quad (II.17)$$

Avec :  $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{(L_m + L_r)(L_m + L_s)}$ ,  $L_{s1} = L_{s2} = L_s$ ,  $T_r = \frac{L_m + L_r}{r}$

➤ **Modélisation du rotorque :**

La figure montre le circuit électrique équivalent des ailles rotor que m la ou les barres rotorque et les portions d'anneaux de court –circuit sont représentées par leurs Résistances et leur inductances de fuite correspondantes En faisant référence à la figure les équations [19] des tension des  $(n_b + 1)$  mailles rotoriques seront :

$$\begin{bmatrix} [v_r] \\ [v_e] \end{bmatrix} = [0] = \begin{bmatrix} [R_r] & \cdots & -R_e \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -R_e & \cdots & n_b R_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i_r] \\ [i_e] \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_r \\ \psi_e \end{bmatrix} \quad (II.18)$$

Avec :  $[v_r] = [v_{r1} \ v_{r2} \ \cdots \ v_{r(n+1)} \ v_{nb}]^t$  vecteur des tension des mailles rotorique

$[i_r] = [i_{r1} \ \cdots \ i_{rnb}]^t$ ;  $[\varphi_r] = [\varphi_{r1} \ \cdots \ \varphi_{rnb}]^t$  les courant et le flux des différentes

**Modèle du MASDE avec défauts(rotor) :**

➤

$$\begin{bmatrix} [v_r] \\ [v_e] \end{bmatrix} = [0] = \begin{bmatrix} [R_r] & & -R_e \\ & \vdots & \\ -R_e & \cdots & n_b R_e \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [i_r] \\ [i_e] \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} [\psi_r] \\ \psi_e \end{bmatrix} \quad (II.19)$$

Avec :  $[v_r] = [v_{r1} \ v_{r2} \ \cdots \ v_{r(n_b-1)} \ v_{mb}]^t$  Vecteur des tensions des mailles rotoriques.

$[i_r] = [i_{r1} \ \cdots \ i_{mb}]^t$  Et  $[\psi_r] = [\psi_{r1} \ \cdots \ \psi_{mb}]^t$  Les courants et flux des différentes mailles rotoriques.

$v_e$  Et  $i_e$  : Sont respectivement la tension et courant de l'anneau de court-circuit.  $[R_r]$  Est une matrice symétrique de dimensions  $(n_b * n_b)$  représentant les différentes mailles rotoriques, ou  $R_b$  est la résistance d'une barre et  $R_e$  d'une portion d'anneau de court-circuit

$$[R_r] = \begin{bmatrix} 2(R_b + R_e) & -R_b & 0 & 0 & \cdots & -R_b \\ -R_b & 2(R_b + R_e) & -R_b & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -R_b & 2(R_b + R_e) & -R_b & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & -R_b & 2(R_b + R_e) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ -R_b & 0 & 0 & \cdots & -R_b & 2(R_b + R_e) \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

$[L_r]$  est la matrice des inductances rotoriques de dimensions  $(n_b * n_b)$  composée par l'inductance de fuite d'une barres  $L_b$  et l'inductance d'une portion de l'anneau de court-circuit  $L_e$ , en plus insérant les inductances propres aux mailles  $L_{mr}$  et les inductances mutuelles  $M_{rij}$  entre la maille  $i$  et la maille  $j$ .

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{mr} + 2(L_b + L_e) & M_{r1r2} - L_b & M_{r1r3} & \cdots & M_{r1rnb} - L_b \\ M_{r2r1} - L_b & L_{mr} + 2(L_b + L_e) & M_{r2r3} - L_b & \cdots & m_{r2rnb} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ M_{rnb r1} - L_b & M_{rnb r2} & M_{rnb r3} & \cdots & L_{mr} + 2(L_b + L_e) \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

Le flux rotorique est donné par

$$\begin{bmatrix} [\psi_r] \\ \psi_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [M_{sr}] \cdot [i_s] \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [L_r] & L_e \\ & \vdots \\ L_e & \cdots & n_b L_e \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [i_r] \\ i_e \end{bmatrix} \quad (\text{II. 22})$$

Les matrices  $[M_{sr}]$  et  $[M_{rs}] = [M_{sr}]^t$  sont de dimensions  $(6 * n_b)$  et  $(n_b * 6)$  respectivement, comprenant les inductances mutuelles  $M_{sqirk}$  entre la phase  $q$  d'étoile  $i$  et les mailles rotoriques.

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} M_{sa1r1} & M_{sa1r2} & M_{sa1r3} & \cdots & \cdots & M_{sa1r(nb-1)} & M_{sa1rnb} \\ M_{sa2r1} & M_{sa2r2} & M_{sa2r3} & \cdots & \cdots & M_{sa2r(nb-1)} & M_{sa2rnb} \\ M_{sb1r1} & M_{sb1r2} & M_{sb1r3} & \cdots & \cdots & M_{sb1r(nb-1)} & M_{sb1rnb} \\ M_{sb2r1} & M_{sb2r2} & M_{sb2r3} & \cdots & \cdots & M_{sb2r(nb-1)} & M_{sb2rnb} \\ M_{sc1r1} & M_{sc1r2} & M_{sc1r3} & \cdots & \cdots & M_{sc1r(nb-1)} & M_{sc1rnb} \\ M_{sc2r1} & M_{sc2r2} & M_{sc2r3} & \cdots & \cdots & M_{sc2r(nb-1)} & M_{sc2rnb} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 23})$$

## II.11 Résultats de simulation :

La simulation numérique nous permet de modéliser, d'analyser et de simuler les systèmes avec beaucoup de précision.

De nos jours il existe toute une panoplie de logiciels pour les machines électriques. Afin de simuler la MASDE, nous avons opté pour le logiciel MATLAB/SIMULINK.

La machine asynchrone double étoile étudiée, dont les paramètres sont donnés dans l'annexe A, est alimentée par un réseau parfaitement sinusoïdal

La MASDE est alimentée par deux sources sinusoïdales et équilibrées.

Pour le rotor : Les tensions rotor qui sont nulles (rotors à cage d'écureuil).

### ➤ Fonctionnement en charge :

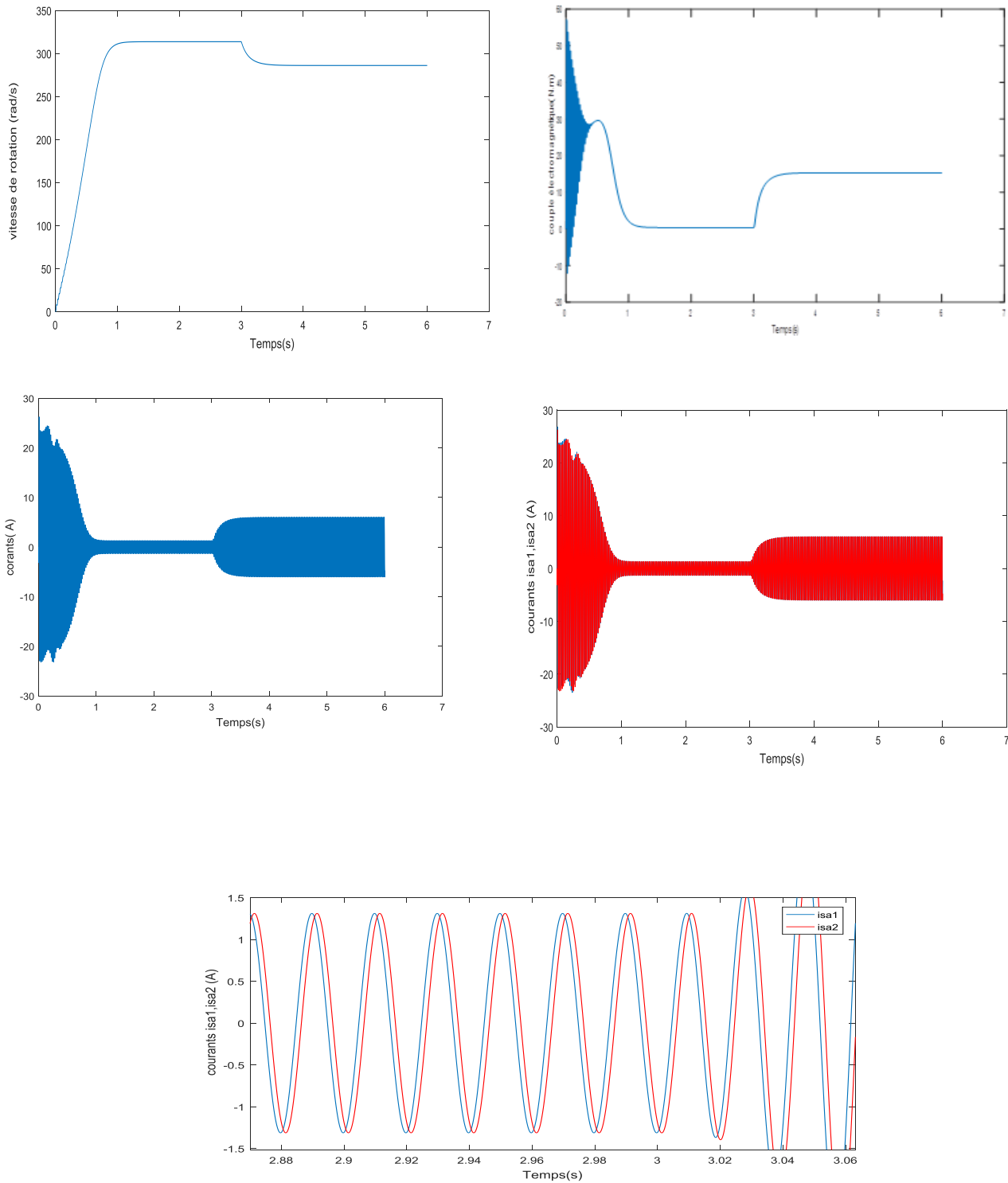
Performances de la conduite de la machine asynchrone à double stator lors d'un démarrage à en charge. ( $c_r=15\text{N.m}$ ,  $t=3\text{s}$ ) Pour illustrer les caractéristiques usuelles du MASDE, on a simulé le comportement du moteur alimenté directement pour deux cas de démarrage à vide, et insertion d'un couple de charge. Avec : Les tensions d'alimentation s'écrivent comme suit pour les stators 1 et 2 :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{as1} = \sqrt{2} v_s \sin(\omega_s t) \\ v_{as1} = \sqrt{2} v_s \sin(\omega_s t) \\ v_{as1} = \sqrt{2} v_s \sin(\omega_s t) \end{array} \right. \quad \text{et} \quad \left\{ \begin{array}{l} v_{sa2} = \sqrt{2} v_s \sin\left(\omega_s t - \frac{\pi}{6}\right) \\ v_{sb2} = \sqrt{2} v_s \sin\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{6}\right) \\ v_{sc2} = \sqrt{2} v_s \sin\left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{6}\right) \end{array} \right.$$

Avec :  $v_s$  : valeur efficace de tension

$\omega_s$  : pulsation d'alimentation

➤ **Fonctionnement à vide et en charge :**



**Figure II.5 Performances de la machine asynchrone double étoile avec application d'un couple de charge  $C_r=15$  N.m entre  $t=3$ s**

## ➤ Interprétation des résultats de simulation

La simulation est effectuée pour un décalage angulaire  $\alpha = 30^\circ$ .

- **A vide**

On remarque que la vitesse augmente et évolue d'une manière presque linéaire au début du démarrage, puis elle se stabilise et prend la valeur de 313.5 rd/s (valeur de synchronisme) à  $t=1.2s$ .

Au démarrage, le couple électromagnétique présente un pic important 58.04N.m puis se stabilise à une valeur presque nulle.

Les courants statoriques  $i_{as1}$  et  $i_{as2}$  ont une forme sinusoïdale et de même amplitude. En régime transitoire, la machine consomme des courants très importants, leur amplitude atteint la valeur  $i_{as1} = i_{as2} = 24.52A$ . Après le régime transitoire, les courants statoriques diminuent pour atteindre de la valeur 1.31A d'amplitude.

- **En charge**

Lors de l'application d'une charge dans l'intervalle de temps 3s, la vitesse de rotation diminuée à sa vitesse de synchronisme, et prend la valeur 288.90rd/s.

Le couple électromagnétique augmente à une valeur de 15 N.m dans l'intervalle 3s

Les courants statoriques augmentent selon la charge appliquée, l'amplitude atteint une valeur de  $i_{as1} = i_{as2} = 5.39A$ .

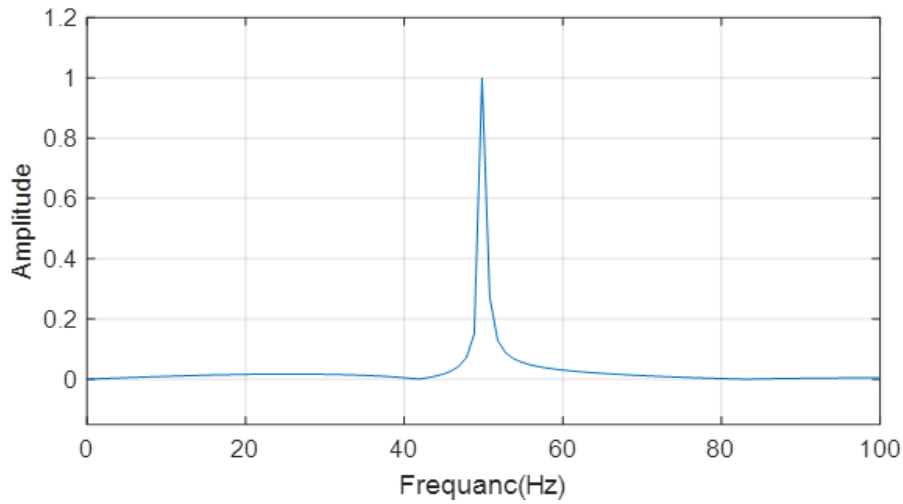
## **II.12 La Transformée de Fourier Rapide (FFT) :**

La transformée de Fourier rapide, est une technique mathématique de calcul rapide élaborée en 1965 par J. W. Cooley et J. W. Tuckey.

La FFT permet de ramener le calcul de la transformée de Fourier discrète de  $N^2$  à  $N \cdot \log(N)$  opérations. Cette réduction de la complexité de calcul a suffi à faire passer facilement résolubles de nombreux problèmes liés à l'analyse spectrale. Pour une meilleure visualisation d'une analyse fréquentielle, la FFT est utilisée au travers d'une fenêtre glissante d'observation. Malgré sa célébrité et son succès, la FFT reste inadaptable pour les signaux non stationnaires et elle montre assez vite ses limitations, perte de localisation temporelle

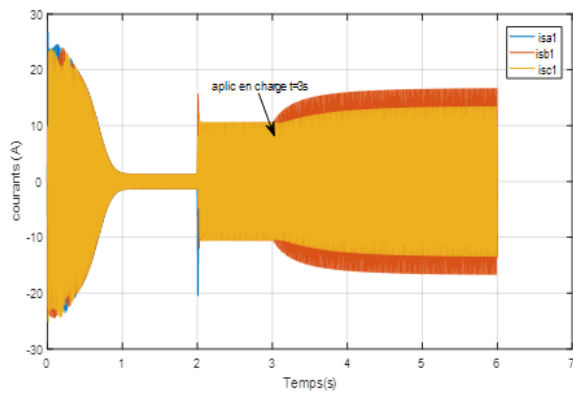
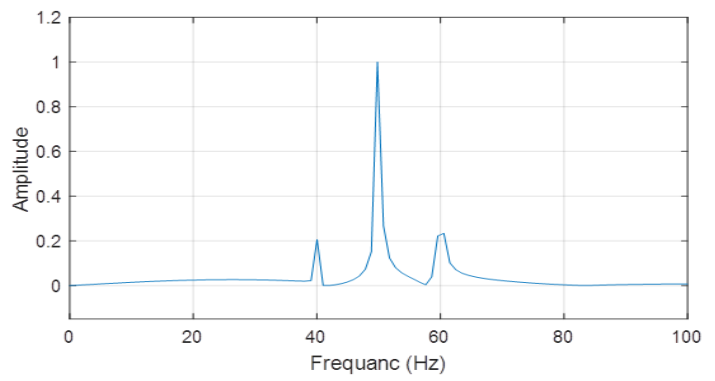
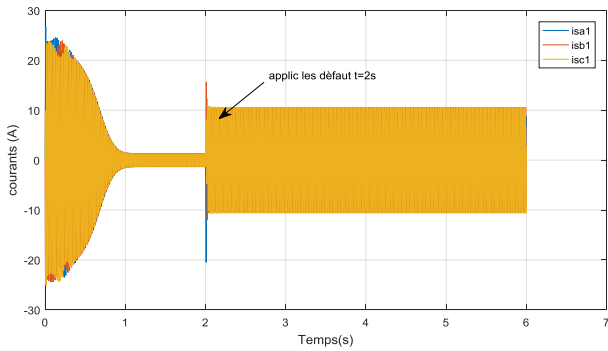
### **12.1 Analyse du courant statorique par la FFT :**

On considère que la machine est alimentée directement à travers un réseau triphasé avec une charge moyenne de 15.N.m. L'analyse spectral par la FFT est effectuée sur le courant d'une phase statorique pour un rotor sain et avec défaut des barres cassées, avec un fenêtrage de type "Hanning", l'acquisition s'est effectuée à une période d'échantillonnage représentés sur la figure (II.6).

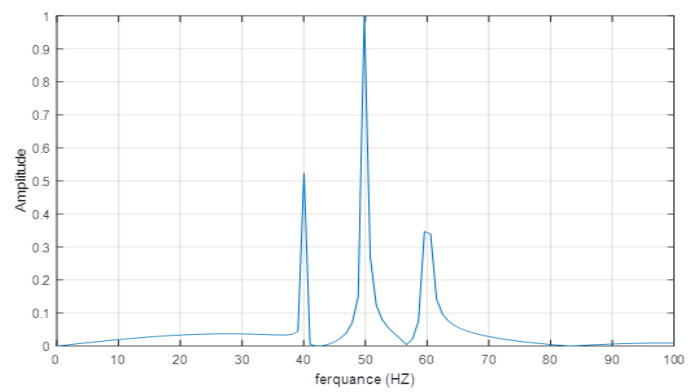


**Machine saine**

- cassure de 1barre : FFT



a.avi  
de

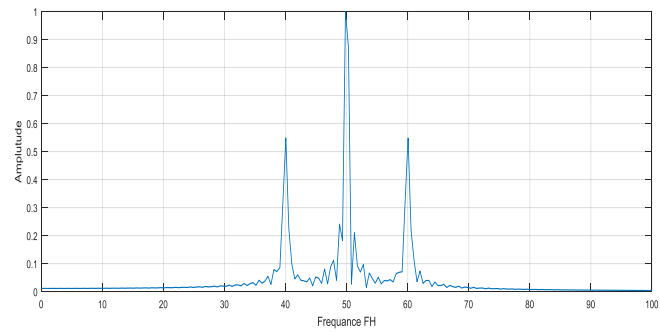
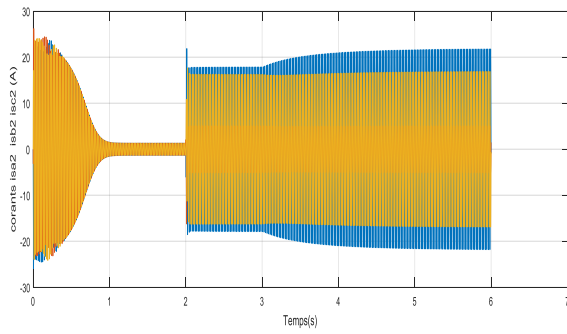
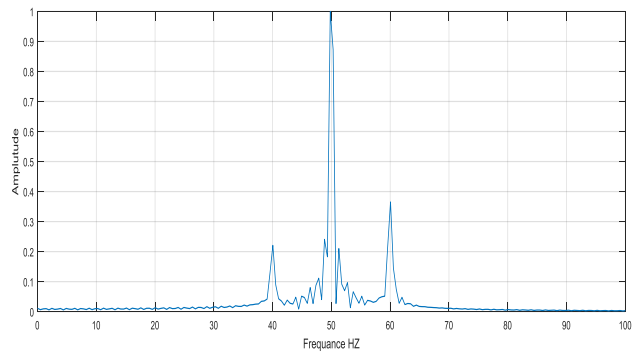
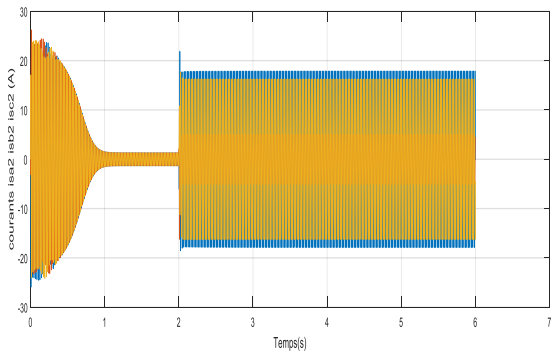


b.en charge

**Figure II.6 : Spectre du courant statorique pour une machine sain et avec défaut rotoriquà (vid et en charge)**

cassure de 2 barre : FFT

a.à vide



b.en charge

Figure II.7: Spectre du courant statorique pour une machine et avec défaut rotorique

- Cassure de 5 barre : FFT

à vide

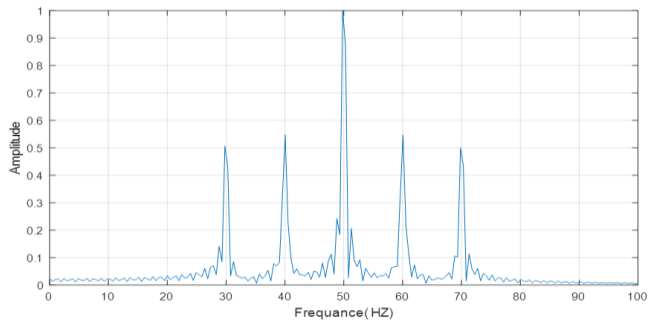
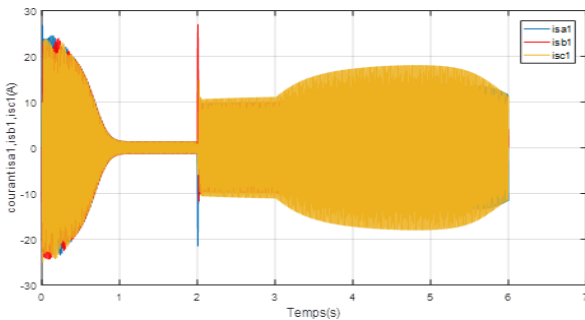
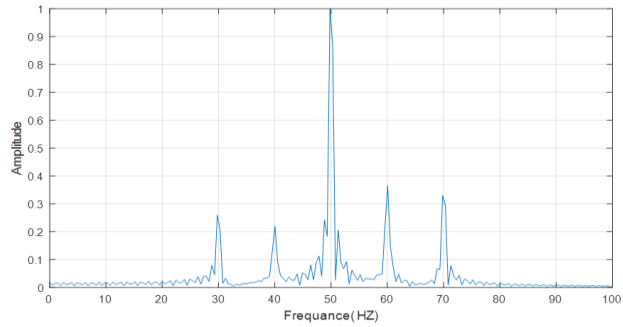
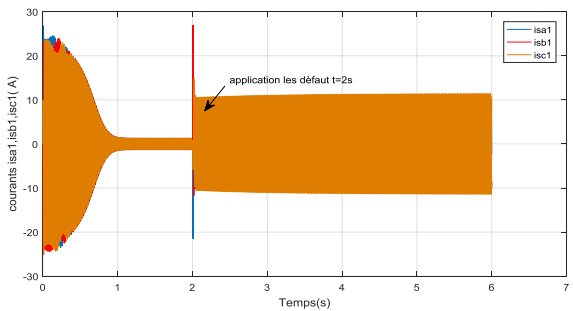
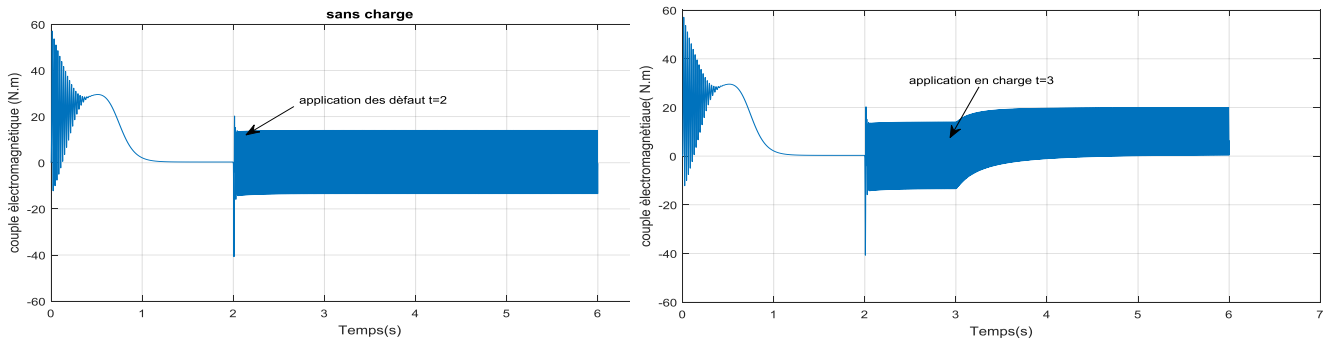


Figure II.7: Spectre du courant statorique pour une machine et avec défaut rotorique

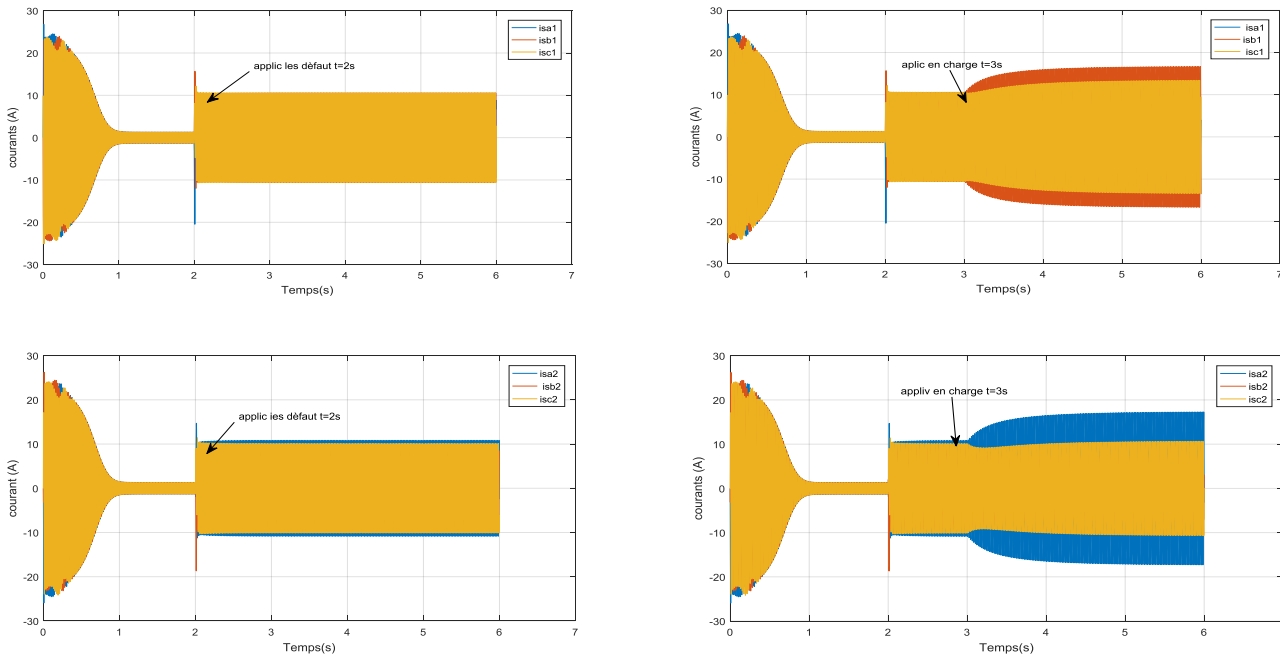
**✓ Interprétation des résultats de simulation :**

En fonctionnement sain de la machine, on n'observe aucune raie latérale autour du fondamentale à 50 Hz (figure II.7a), qui représente le contenu spectral du courant statorique en régime permanent. En fonctionnement avec défaut d'une et deux barres cassées (figures II.6 et II.7), il y a une apparition des raies latérales au voisinage du fondamentale correspondant aux raies de défaut. On constate l'apparition de raies en symétrie autour de la fréquence fondamentale. La différenciation entre une et deux barres cassées ne semble pas évidente même si l'amplitude des raies augmente avec celle du défaut.

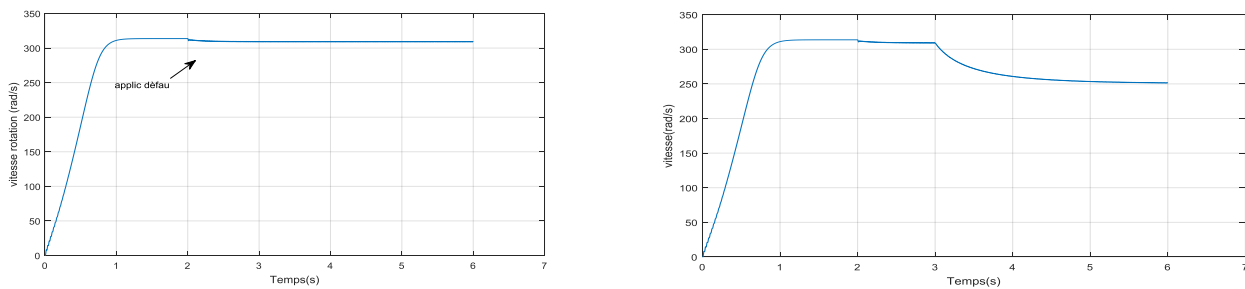
**Défaut rotorique : Cassure 1 barre**



**Figure II. 8 : Couple électromagnétique de la machine avec un défaut cassure 1 barre à vide et en charge**



**Figure II 9 : Courants statorique ias1,ias2 de la machine avec défaut cassure 1barres à vide et en charge**

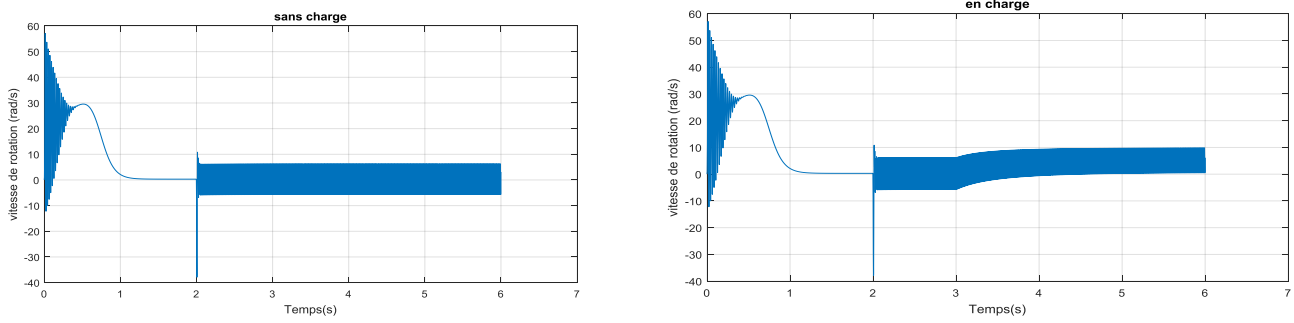


**Figure II 10 : Vitesse de la machine pour un défaut cassur1barre a vide en charge**

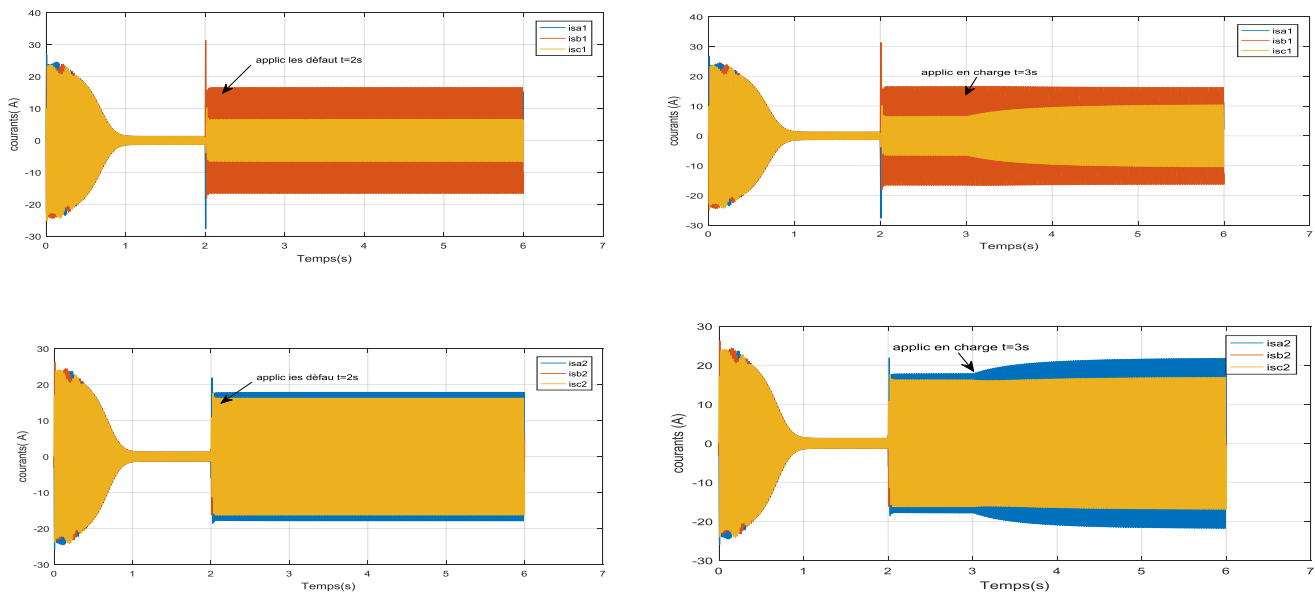
**-Cas d'une cassure 1 barre :**

Pour observer le comportement du modèle simulé, un couple de 15N.m est appliqué à la simulation du modèle du moteur asynchrone avec un défaut de rupture d'une barre 1 à t=2s. et application en charge t=3s

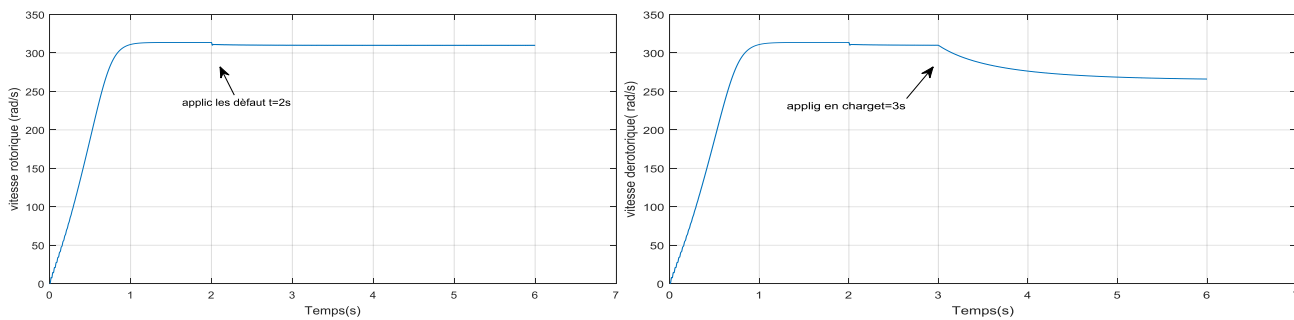
**cassure 2 barre :**



**FigureII 11 : Couple électromagnétique de la machine avec un défaut cassur 2 barre**



**Figure II 12 : Courants statorique ias1,ias2 de la machine avec défaut cassure 2 barres**

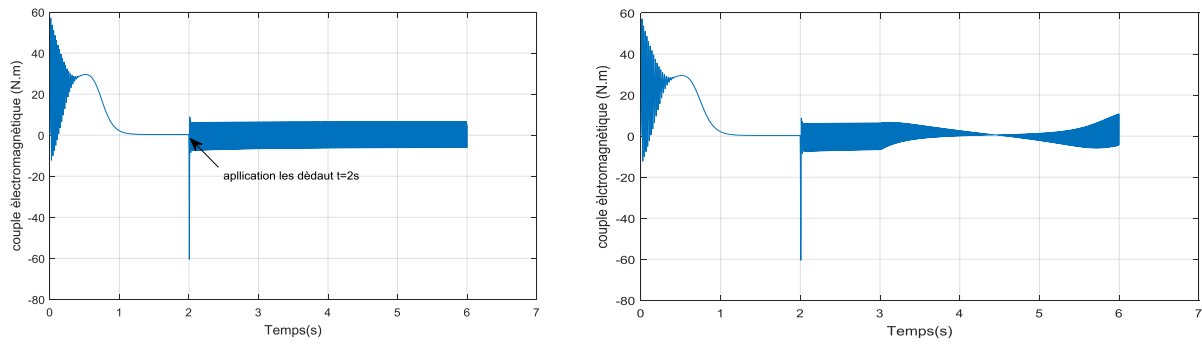


**Figure II 13 : Vitesse de la machine pour un défaut cassur2 barre à vide et en charge**

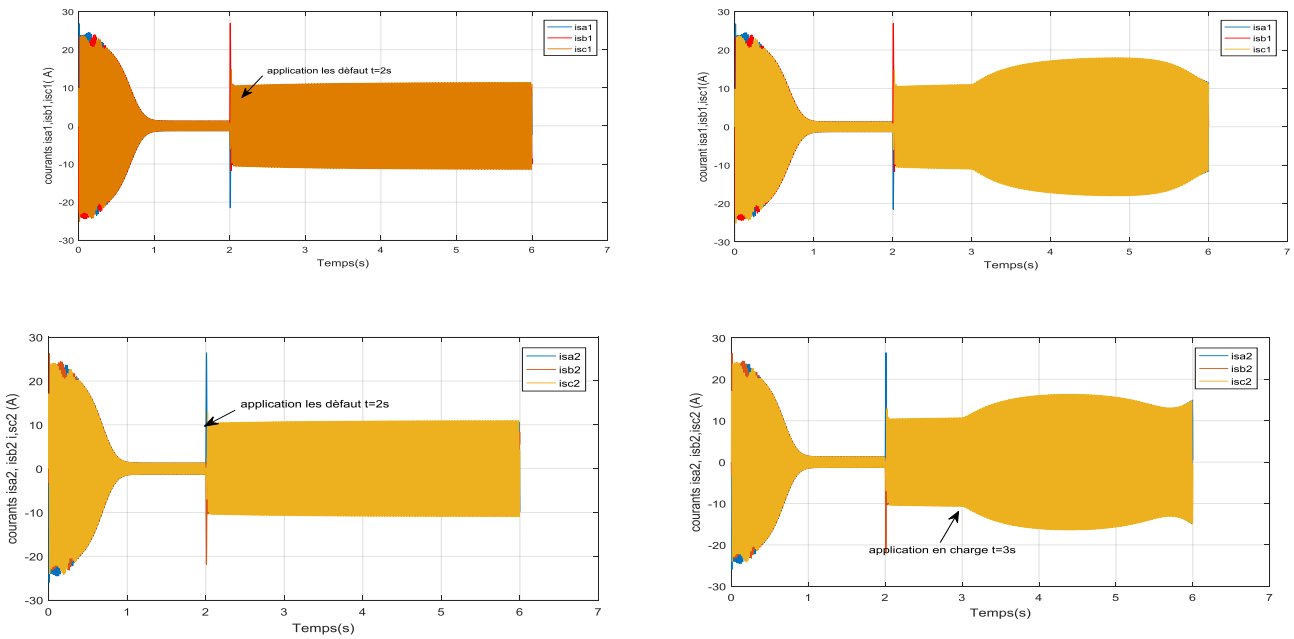
**-Cas d'une cassure 2 barre :**

Pour observer le comportement du modèle simulé, un couple de 15N.m est appliqué à la simulation du modèle du moteur asynchrone avec un défaut de rupture d'une barre 1 à t=2s. en chaarg t=3s

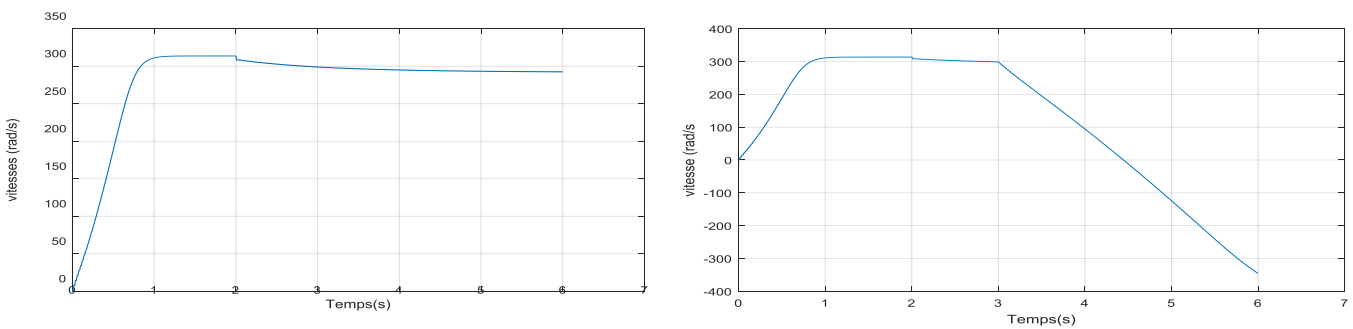
**Cassure 5 barre :**



**Figure II 14 : Couple électromagnétique de la machine avec un défaut cassure 5 bar**



**Figure II 15 : Courants statorique de la machine avec défaut cassure 5 barres**



**Figure II 16 : Vitesse de la machine pour un défaut cassur5 barre à vide et en charge**

**-Cas d'une cassure5 barre :**

Pour observer le comportement du modèle simulé, un couple de 15N.m est appliqué à la simulation du modèle du moteur asynchrone avec un défaut de rupture d'une barre 1 à t=2s. et application en charg t=3s

**Interprétation des résultats :**

- On remarque d'après la figure (II.8.11.14 ) qui représente le couple électromagnétique, une augmentation d'amplitude des ondulations après la rupture de la barre
- La figure (II.10.13.16 ) représente l'allure de la vitesse de rotation après la rupture de la barre. On constate des oscillations au niveau de la vitesse après la rupture de la barre, par conséquent la valeur moyenne de la vitesse est diminué.
- La figure (II9.12.15 ) permette de vérifier la modulation de l'enveloppe du courant statorique  $i_{as1}$   $i_{as2}$  après la rupture d'un barre . On note une présence de l'amplitude de modulation après la rupture de la barre.

Cas d'une cassure de 1barre ,2 barres, 5 barres

Dans la simulation suivante, on va supposer deux défauts successifs : rupture de deux barres adjacentes : application des défauts à l'instant  $t=2s$  , et application de la charge  $C_r=15 \text{ N.m}$  à  $t=3s$

**II.13 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons étudié la modélisation de la machine asynchrone double étoile en mode moteur.

Cette modélisation nous a permis d'établir un modèle mathématique de cette machine dont la complexité a été réduite moyennant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices. Ainsi, nous avons utilisé la transformation de Park et le système d'équation d'état de la machine que nous avons validée à travers une simulation numérique. Puis nous avons interprété les résultats obtenues.

### III.1 Introduction :

Il est évident que le MASDE conduit à attirer une attention de plus en plus sérieuse, quant à son fonctionnement et à sa disponibilité.

En effet, l'apparition d'un défaut conduit le plus souvent à un arrêt irrémédiable du MASDE entraînant, en conséquence, un coût de réparation non négligeable pour l'entreprise, sans oublier la perte de production due au défaut du MASDE occasionné.

Dans le présent chapitre, un diagnostic par les techniques d'ondelettes discrètes sera effectué et illustré par des résultats de simulation. [20].

### III.2 Techniques de traitement du signal utilisées dans le diagnostic

#### III.2.1 Transformée de Fourier :

L'analyse de Fourier est une base majeure de la physique et des mathématiques. Elle est indissociable du traitement du signal, et ce pour deux raisons principales.

La première est l'universalité du concept de fréquence sur lequel elle repose. La seconde tient à la structure même de l'analyse de Fourier qui se prête aisément à des transformations communes comme le filtrage linéaire en les traduisant de manière particulièrement simple.

En 1807, la transformation de Fourier a vu le jour, elle consiste à décomposer un signal périodique quelconque en une somme de signaux sinusoïdaux de différentes amplitudes et déphasages [21].

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-2\pi f t} dt \quad (III.1)$$

La transformée de Fourier Discrète, généralement notée TFD, est une suite finie de  $N$  termes  $x(0), x(1), x(2), \dots, x(N-1)$  et elle est calculée par la relation :

$$\left(\frac{f}{NT}\right) = \left(\frac{1}{N}\right) \sum_{k=0}^{N-1} x(kT)e^{-\frac{2\pi f k t}{NT}} \quad \text{pour } k=0, \dots, N-1 \quad (III.2)$$

Où le terme  $N$  représente le nombre de points de calcul de la TFD. Ce terme joue sur la précision du tracé, alors que le terme  $X$  est lié à la résolution en fréquence [22].

### III.2.2 La Transformée de Fourier Rapide (FFT) :

La transformée de Fourier rapide, est une technique mathématique de calcul rapide élaborée en 1965 par J. W. Cooley et J. W. Tuckey.

La FFT permet de ramener le calcul de la transformée de Fourier discrète de  $N^2$  à  $N \cdot \log(N)$  opérations. Cette réduction de la complexité de calcul a suffi à faire passer facilement résolubles de nombreux problèmes liés à l'analyse spectrale. Pour une meilleure visualisation d'une analyse fréquentielle, la FFT est utilisée au travers d'une fenêtre glissante d'observation. Malgré sa célébrité et son succès, la FFT reste inadaptable pour les signaux non stationnaires et elle montre assez vite ses limitations, perte de localisation temporelle [24].

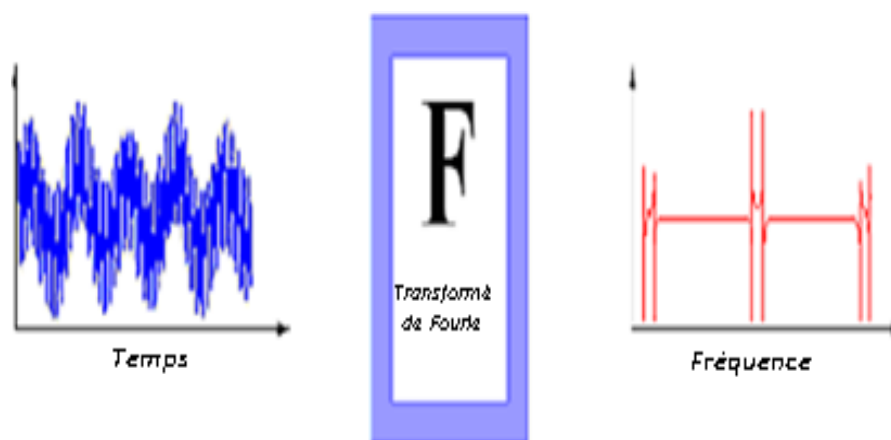


Figure III.1: Représentation temporelle vers fréquentielle

### III.3 Les ondelettes(wavelets):

En raison des limites de la transformée de Fourier et de Gabor (STFT), au début des années 1980 la collaboration des physico-mathématiciens a introduit la transformée en ondelettes qui décompose le signal à la fois en temps et en fréquence et qui introduit une fenêtre dont la taille varie avec la fréquence [23].

Le terme ondelette désigne une fonction  $\psi \in L2(\mathcal{R})$  qui oscille sur un intervalle de longueur finie, donc d'intégrale nulle. Au-delà, la fonction décroît très vite vers zéro.

A partir de l'unique fonction  $\psi$ , on construit par translation et dilatation une famille d'ondelettes : Où  $a$  est l'échelle, sert à dilater, et  $b$  est la position, sert à translater. Le couple  $(a, b)$  définit les atomes (noyaux) de base.

Ci-dessous sont données les familles des ondelettes sur le tableau (III.1), obtenues à partir de Matlab et qui restera une source très intéressante en ce qui concerne le type de forme d'ondelettes.

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

Tableau III .1: Familles d'ondelettes

### III.4. Transformée en ondelettes :

#### III.4.1 Définition :

La transformée en ondelettes est similaire à la transformée de Fourier, avec une fonction de mérite complètement différente.

La différence principale est la suivante : la transformée de Fourier décompose le signal en sinus et en cosinus, c'est-à-dire en fonctions localisées dans l'espace de Fourier; contrairement à la transformée en ondelettes qui utilise des fonctions localisées à la fois dans l'espace réel et dans l'espace de Fourier .

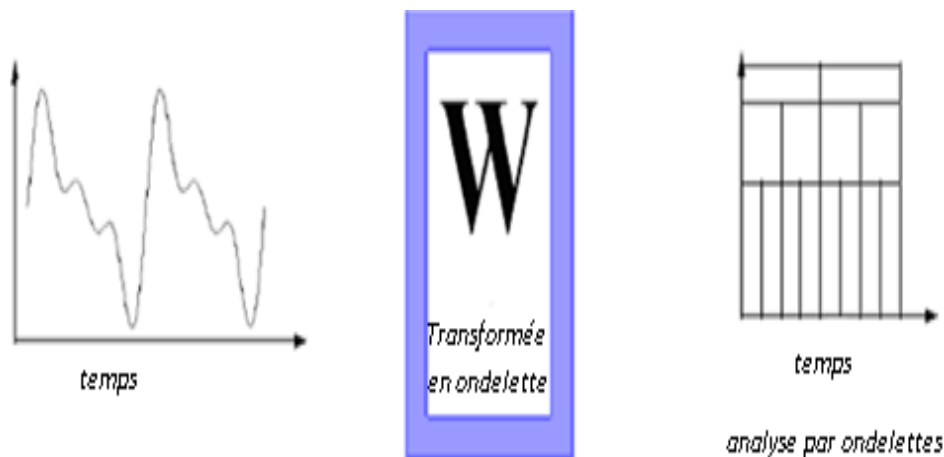
La transformée en ondelettes est en fait un ensemble infini de diverses transformées, dépendant de la fonction de mérite utilisée pour la calculer.

Il existe aussi de nombreuses manières de classer les types de transformées en ondelettes. On peut utiliser les *ondelettes orthogonales* pour le développement en ondelettes discret et les *ondelettes non-orthogonales* pour le développement en ondelettes continu [24],

L'ondelette est une forme d'onde qui a une durée limitée et avec une valeur moyenne égale à zéro. La transformation en ondelettes permet d'appliquer une analyse multi-résolution sur le signal étudié. L'analyse multi-résolution de la transformation en ondelettes équivaut à une décomposition atomique temps-échelle. Chacun des atomes peut s'interpréter comme étant une projection locale du signal analysé et est obtenu à partir d'une ondelette ( $t$ ) unique par une translation en temps et une dilatation. Partant d'une fonction bien localisée, dans le plan temps-échelle.

La transformée en ondelettes d'un signal  $f$  est la famille  $S(u)$  coefficients d'ondelettes qui dépend des deux paramètres  $a$  et  $b$  où  $a$  est l'échelle et  $b$  est le facteur de position à analyser. Suivant les besoins de l'analyse du signal  $f$  les paramètres  $(a,b)$  peuvent être utilisés de façon continue (TOC) ou discrète (TOD).

La transformée continue d'ondelettes exigeant une continuité des valeurs des paramètres  $(a,b)$  est plutôt utilisée dans l'analyse de l'allure du signal (approximation) tandis que la transformée discrète d'ondelettes basée beaucoup plus sur l'utilisation de la complémentarité des deux filtres, passe-haut et passe bas, va servir à l'extraction d'informations caractérisant les transitions rapides du signal (détails).



**Figure III.2: Représentation temporelle vers ondelettes**

La transformée en ondelettes est une décomposition atomique dont les atomes sont issus d'une même fonction, l'ondelette mère, par opérations de translation et dilatation. Cette ondelette, appelée ainsi car représentant des oscillations, comme une onde, mais limitée en temps d'où le nom de la petite onde.

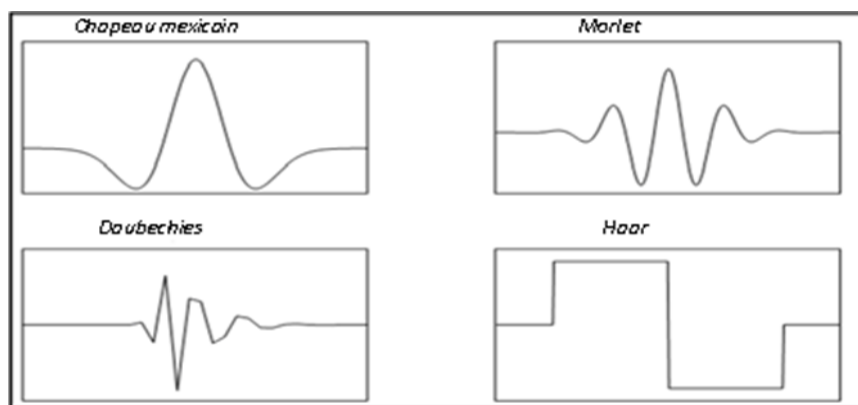


Figure III.3: Quelques formes des ondelettes usuelles

### III.4.2 Transformée en ondelettes continue :

La transformée en ondelettes continue (Continuous Wavelet Transform CWT) est une implémentation de la transformée en ondelettes utilisant des échelles arbitraires ainsi que des ondelettes pratiquement arbitraires. Les ondelettes utilisées ne sont pas orthogonales et les données obtenues par cette transformée sont hautement corrélées [25],

En principe la transformée en ondelettes continue fonctionne en utilisant directement la définition de la transformée en ondelettes, c'est-à-dire en calculant la convolution du signal par l'ondelette mise à l'échelle. Nous obtenons de cette manière pour chaque échelle un ensemble de longueur  $N$  identique à celle du signal. En utilisant  $M$  échelles choisies arbitrairement nous obtenons une matrice  $N \times M$  représentant directement le plan temps-fréquence. L'algorithme utilisé pour ce calcul peut être basé sur une convolution directe ou par une convolution réalisée par une multiplication dans l'espace de Fourier (aussi appelée transformée en ondelettes rapide).

Le choix de l'ondelette utilisée pour la décomposition temps-fréquence est le point le plus important. Celui-ci a une influence sur la résolution en temps et en fréquence du résultat. Nous ne pouvons modifier de cette manière les caractéristiques de la transformée en ondelettes (les basses fréquences ont une bonne résolution fréquentielle mais une mauvaise résolution temporelle; les hautes fréquences ont une bonne résolution temporelle et une mauvaise résolution fréquentielle), mais on peut toutefois augmenter la résolution fréquentielle totale ou la résolution temporelle totale. Ceci est directement proportionnel à la largeur de l'ondelette utilisée dans l'espace réel et dans l'espace de Fourier [26].

La transformée en ondelettes utilise des translations et des dilatations d'une fonction fixe, l'ondelette mère  $\psi \in L_2(\mathbb{R})$ .

Dans le cas de la transformée continue, les paramètres de translation et de dilatation varient de manière continue. En d'autres mots, la transformée utilise les fonctions [27].

$$(a,b)(x) = \sqrt{a} \psi(x-b/a) \quad \text{Avec } a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0,$$

Quand on analyse un signal  $f(x)$  avec ces ondelettes, on le transforme en une fonction de deux variables (le temps d'échelle d'analyse de signal) qu'on peut appeler  $W(a, b)$  :

$$W(a, b) = \langle f, \psi(a, b) \rangle$$

$$\text{Que l'on peut également noter : } W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int f(x) \psi(a, b)(x) dx$$

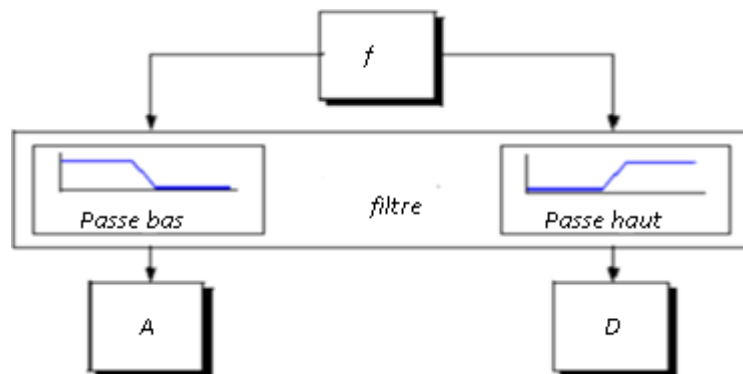
Cette transformation est en théorie infiniment redondante puisque l'ondelette est translatée de manière continue. Cependant il existe des méthodes pour diminuer cette redondance : l'une de ces méthodes consiste en l'emploi de la transformée en ondelettes discrète [27].

### III.4.3 Transformée en ondelettes discrète (TOD):

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

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.



**Figure III.4: Décomposition du signal  $f$  en approximations et détails**

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

### ✓ Décomposition simple

Comme on a dit précédemment le signal  $f$  est divisé en deux signaux mais, actuellement pour faire cette opération dans un signal réelle, on trouve deux signaux de même taille que le signal original. Supposé pour l'instant, que le signal original  $f$  contient 1000 échantillons donc le résultat des deux signaux à 1000 échantillons pour chaque signal, le total est 2000 échantillons.

Pour donner deux vecteurs respectivement CA (Coefficients ondelette d'approximation) et CD (Coefficients ondelette de détails). Tous deux sont de taille approximativement égale à la moitié du vecteur d'origine. Ceci est du au fait de l'opération de décimation par 2 (down sampling) [32].

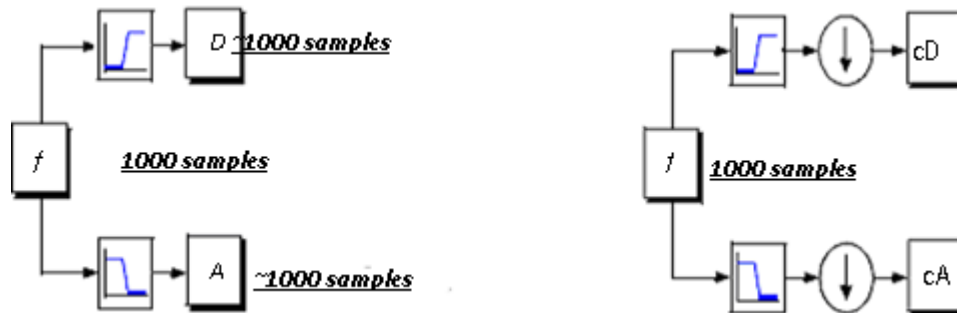


Figure III.5: Décomposition simple du signal  $f$  en approximations et détails

## III.5 Application de la Technique des Ondelettes au diagnostic de la MASDE :

La signature du courant statorique ou le courant moteur représente une source très riche en information concernant les défauts qui se manifestent souvent dans la machine asynchrone double étoile.

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 permanent. Dans le cas de notre 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.

### III.5.1 Résultats de simulation par la transformée en ondelettes discrète :

Dans cette section on se propose d'analyser le courant statorique de la machine asynchrone à double étoile l'aide de la transformée en ondelettes continues (TOD). Les figures ci-dessous montrent l'évolution des coefficients de la (TOD) du courant d'une phase statorique pour des : Moteur sain, cassure 1 barre, cassure 2 barre, cassure 5 barre et application des défaut à  $t=2s$  et avec l'application d'un couple de charge de 15 N.m à partir de  $t=3s$ .

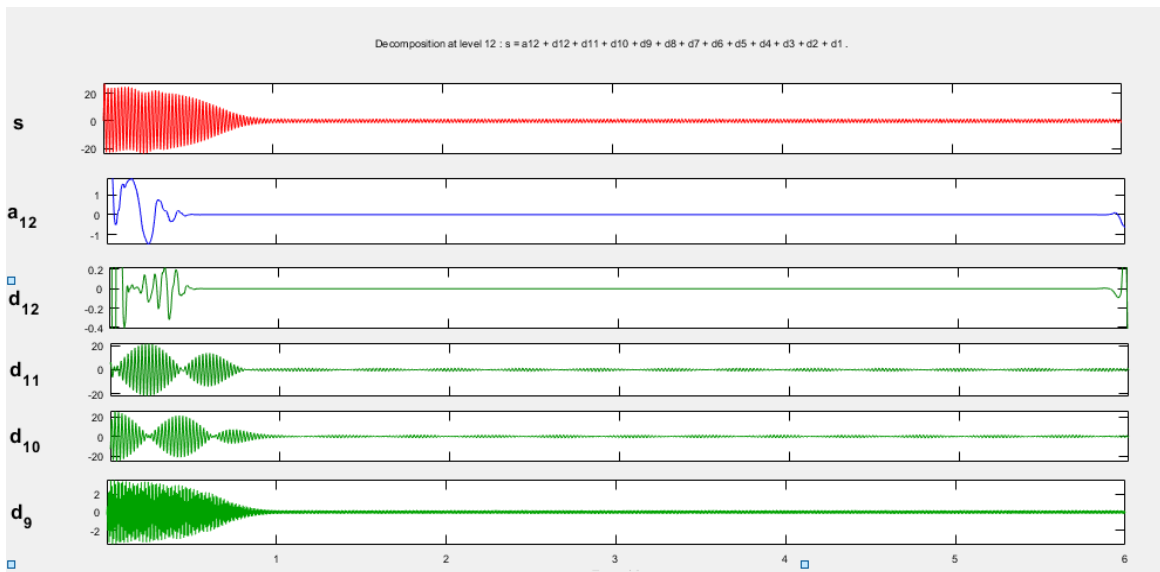
Le choix de l'ondelette de type Daubechies 44 (db44) comme ondelette

- **Ondelette de Daubechies : 44 (db44)**

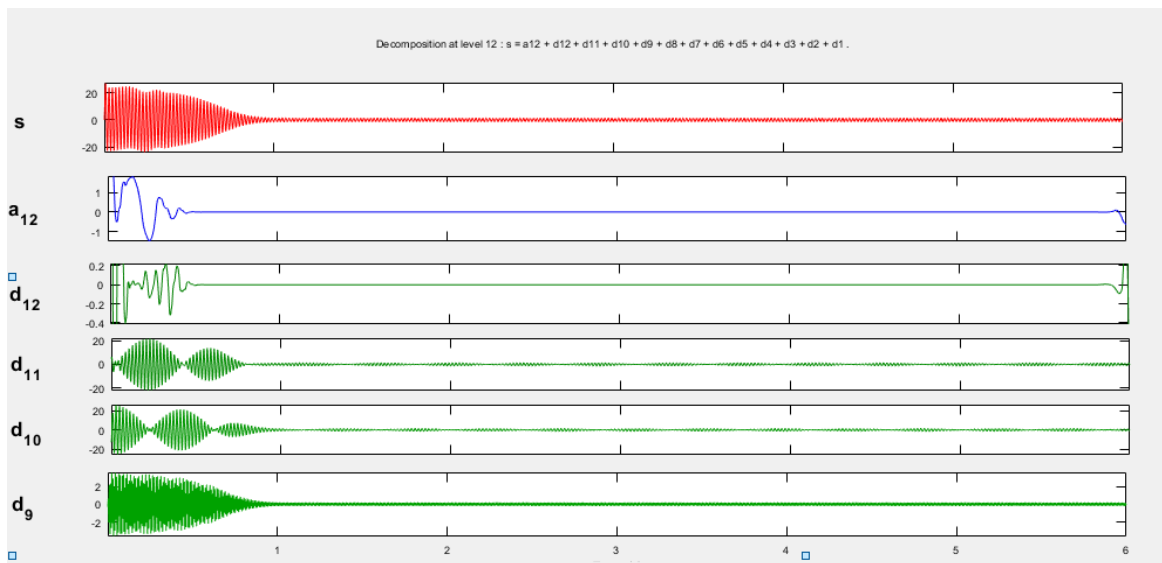
Ondelette 2D de Daubechies 20 (Ondelette Fn X Scaling Fn).

Nommées d'après leur créatrice Ingrid Daubechies, les ondelettes de Daubechies sont une famille d'ondelettes orthogonales définissant une transformée en ondelettes discrète, caractérisées par un nombre maximal de moments dissipants pour un support donné. Pour chaque type d'ondelette de cette classe, il existe une fonction d'échelle (appelée aussi ondelette mère) qui génère une analyse multirésolution orthogonale.

➤ **machine sain**



**Figure III.6 :TOD multi niveau du courant ias1 en fonctionnement sain**



**Figure III. 7:TOD multi niveau du courant ias2 en fonctionnement sain**

➤ Cassure 1 barre : sans charge

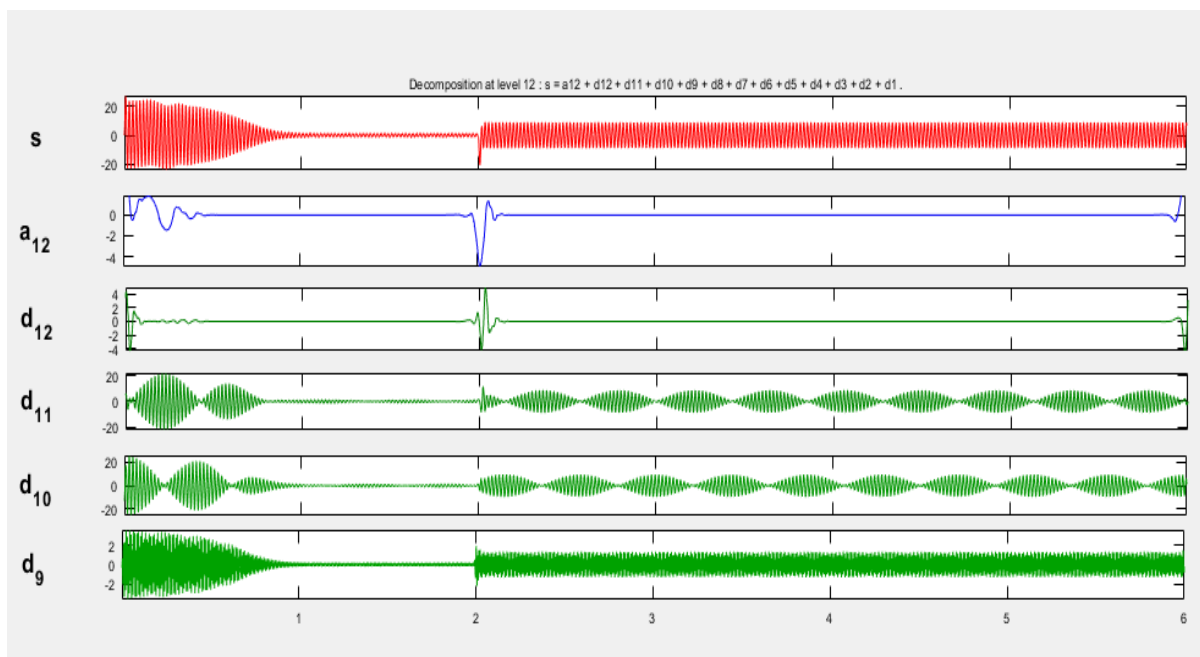


Figure III.8 :TOD multi niveau du courant ias1 en fonctionnement

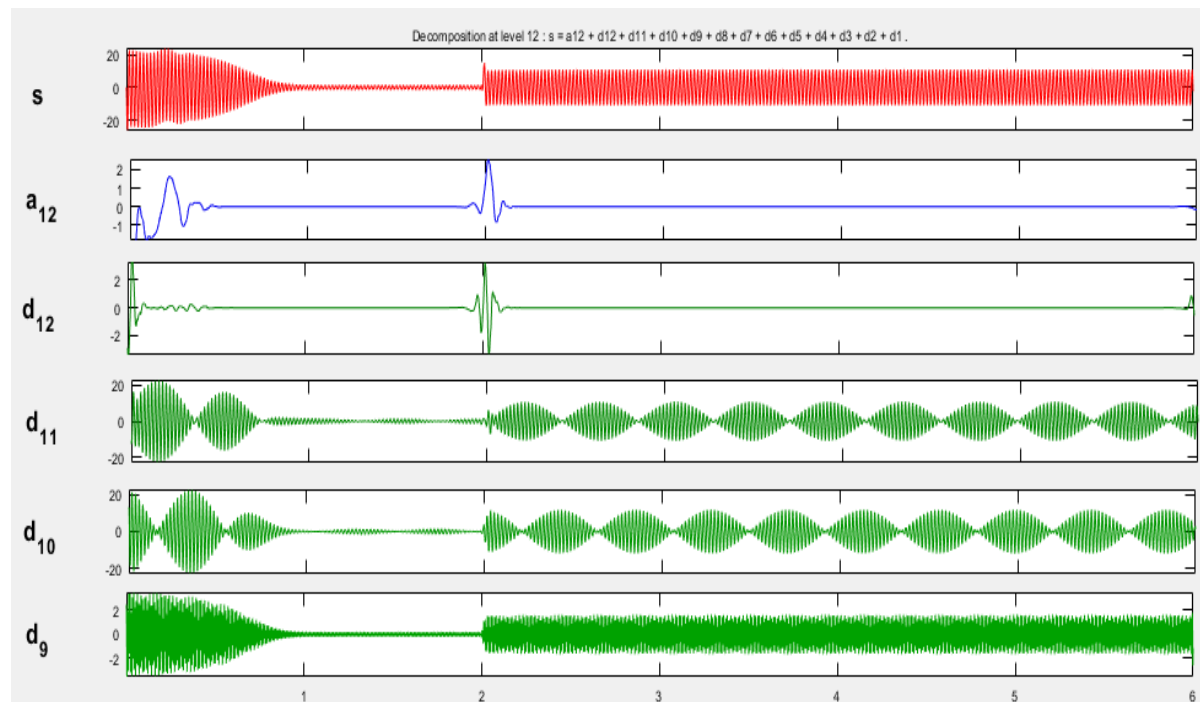


Figure III.9 :TOD multi niveau du courant ias2 en fonctionnement

➤ Cassure 1 barre : en charge

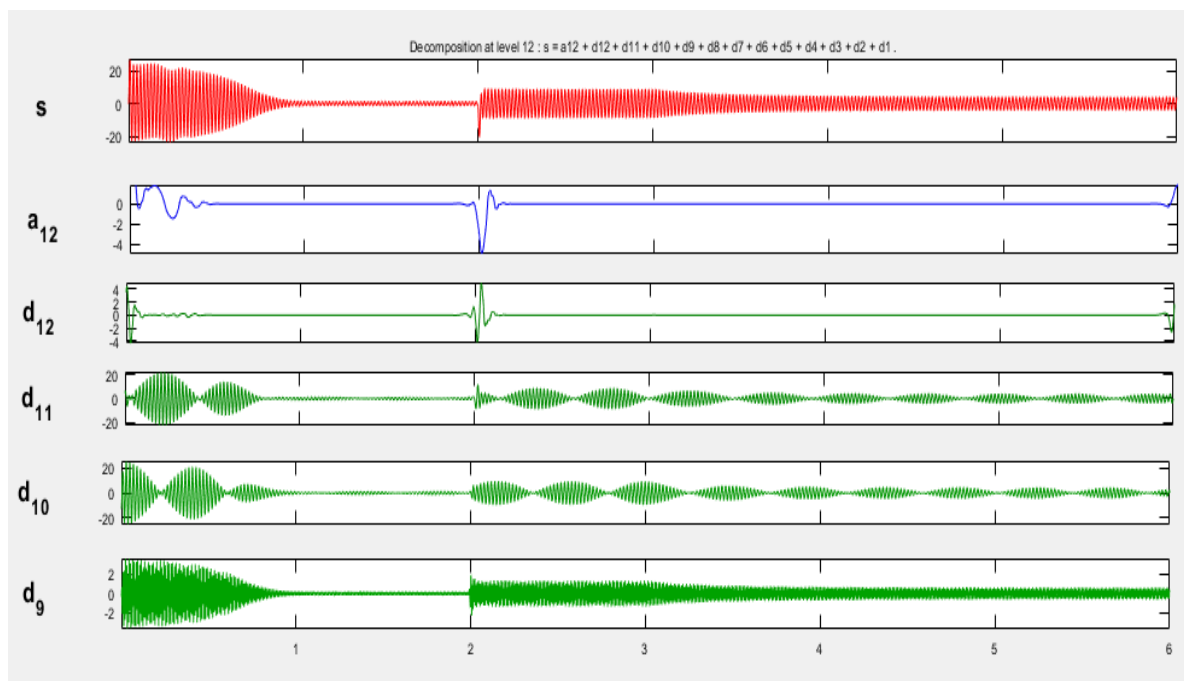


Figure III.10 :TOD multi niveau du courant ias1 en fonctionnement

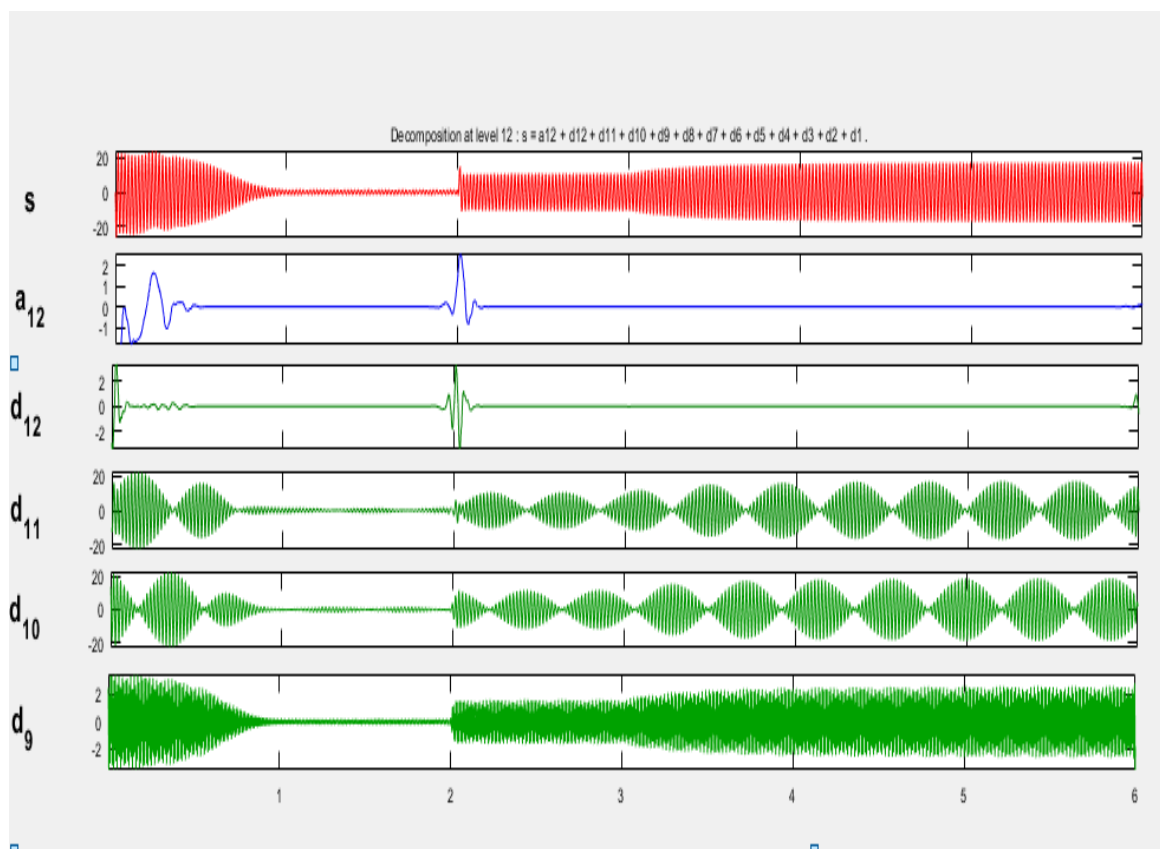


Figure III.11 :TOD multi niveau du courant ias2 en fonctionnement

➤ Cassure 2 barre : sans charge

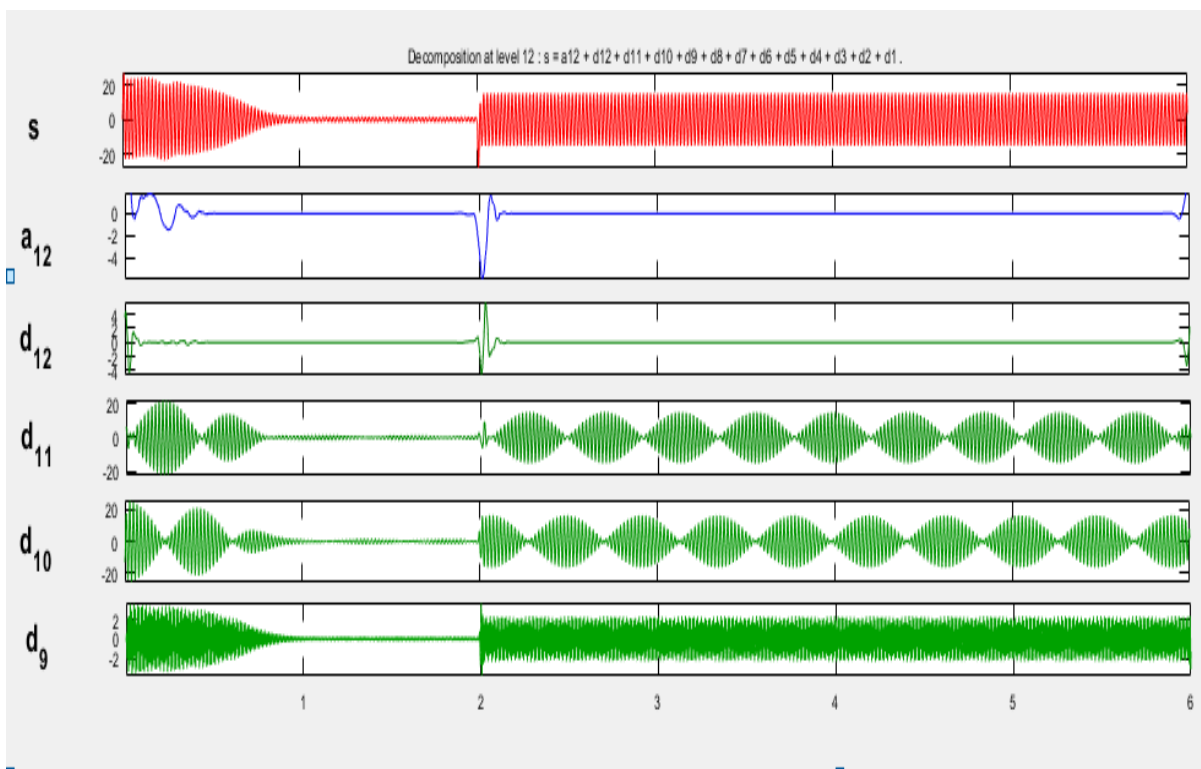


Figure III.12 :TOD multi niveau du courant ias1 en fonctionnement

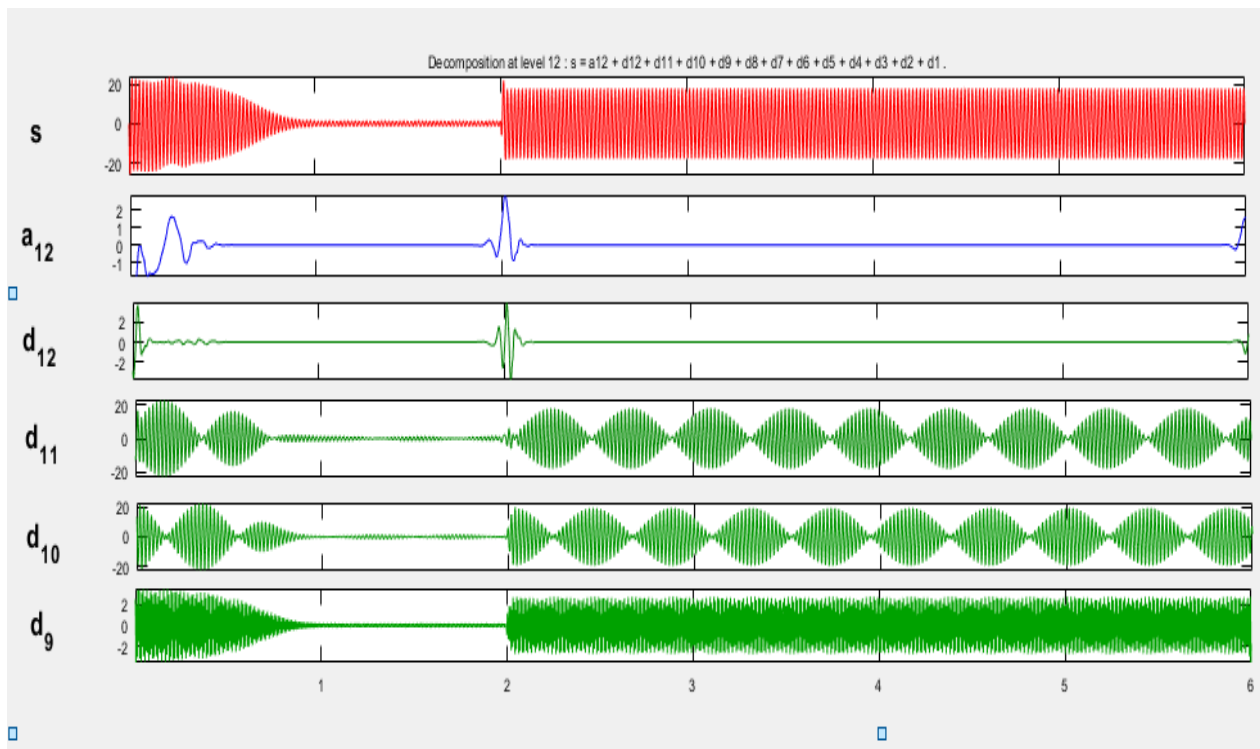


Figure III.13 :TOD multi niveau du courant ias2 en fonctionnement

➤ Cassure2 barre : en charge

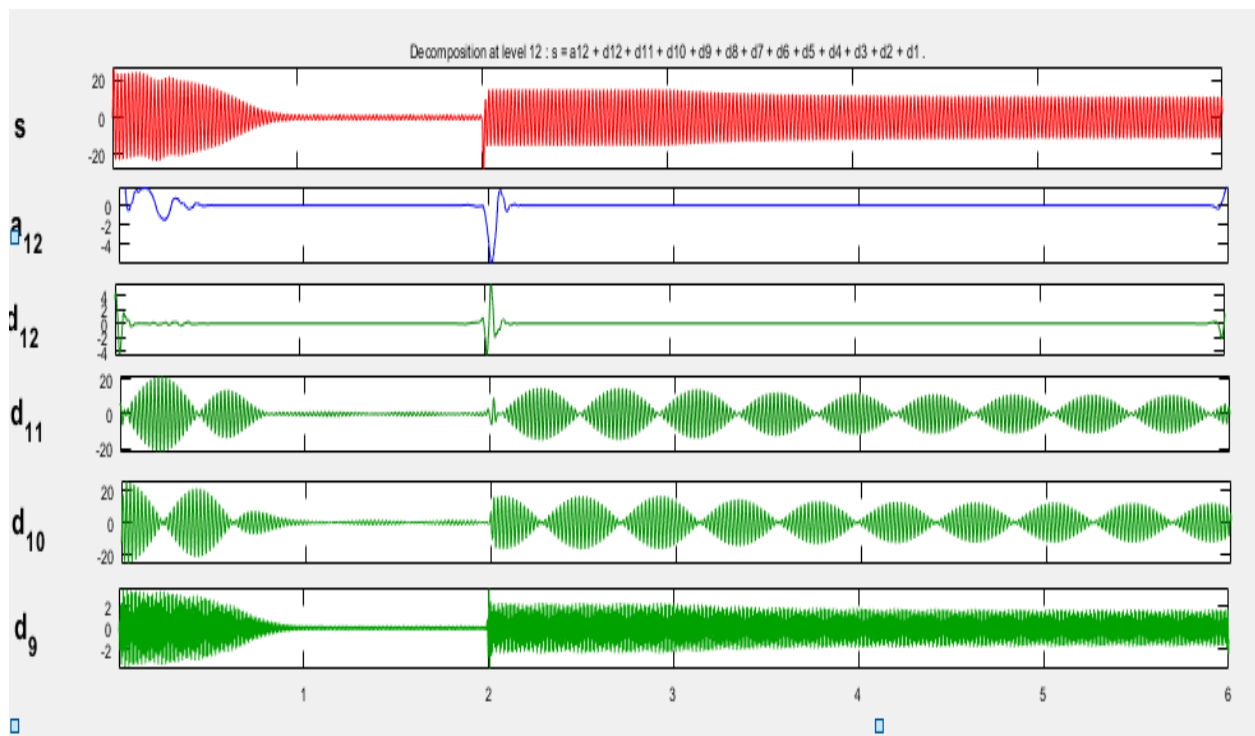


Figure III.14 :TOD multi niveau du courant ias1 en fonctionnement

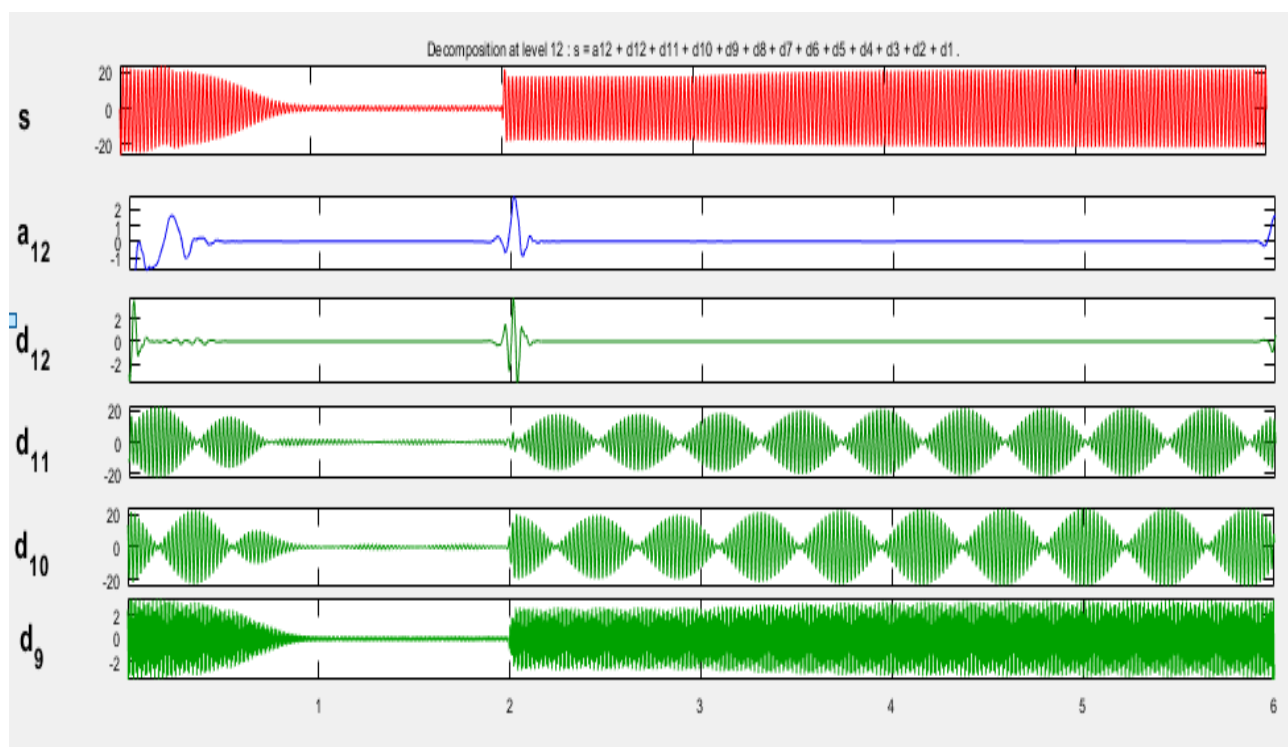


Figure III.15 :TOD multi niveau du courant ias2 en fonctionnement

➤ Cassure du 5 barres : sans charge

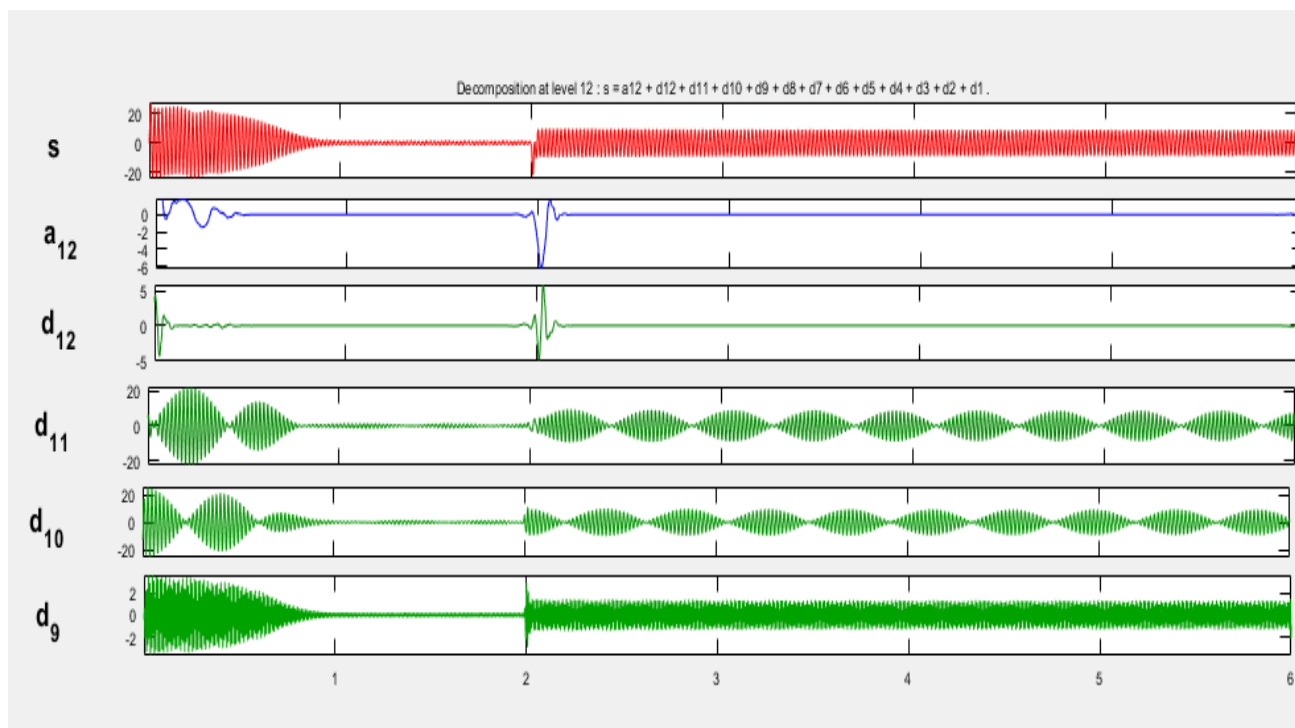


Figure III. 16:TOD multi niveau du courant ias1 en fonctionnement

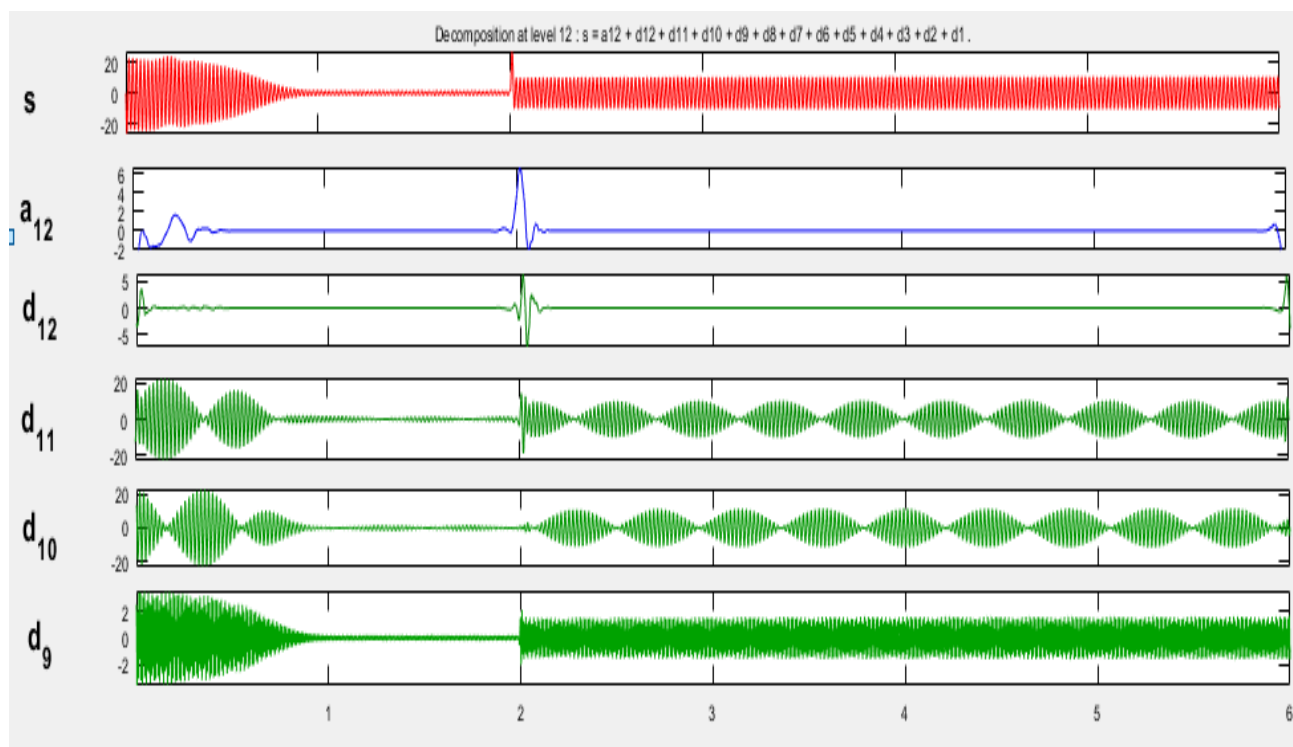


Figure III.17 :TOD multi niveau du courant Ias2 en fonctionnement

➤ Cassure du 5 barre : en charge

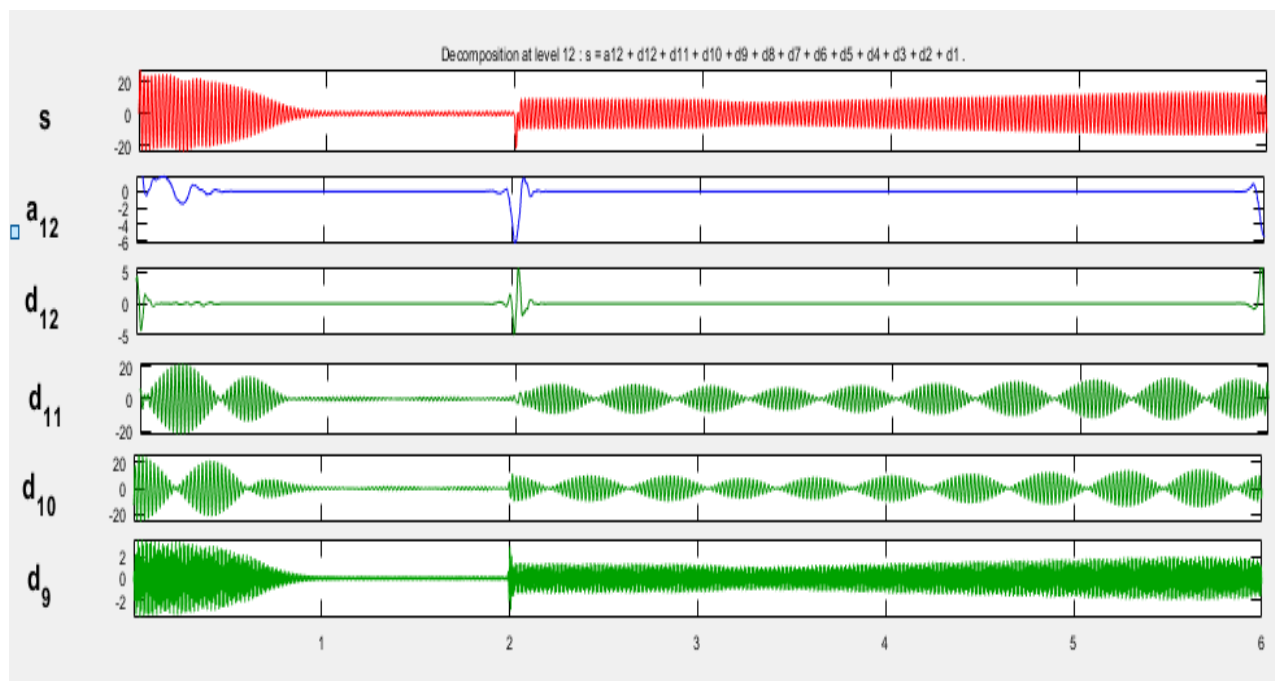


Figure III.18 :TOD multi niveau du courant ias1 en fonctionnement

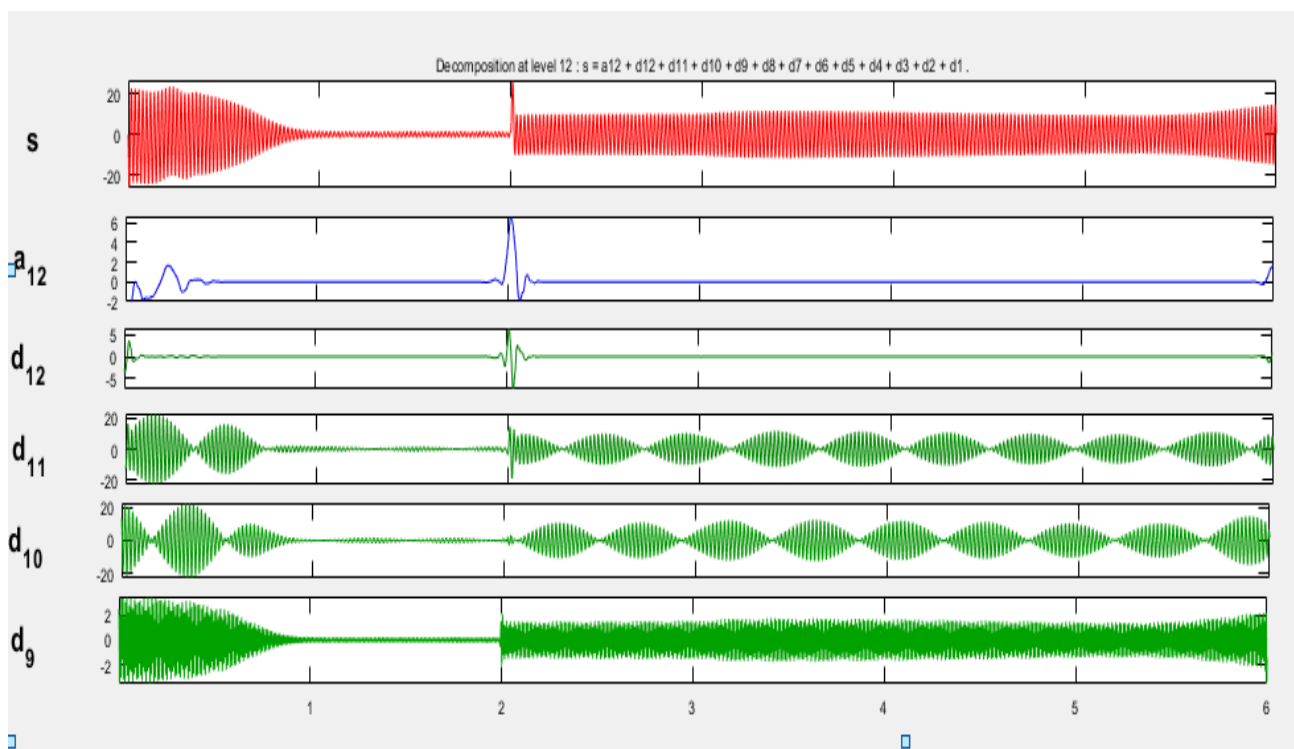


Figure III.19:TOD multi niveau du courant ias2 en fonctionnement

- **Interprétation des résultats :**

Les figures (III.8), (III.9) et (III.10) représentent les signaux de détail et d'approximation

(D9, D10, D11, D12 et A12) obtenus par la décomposition en multi niveau courant statorique  $i_{as1}$ ,  $i_{as2}$

pour un fonctionnement sain (à vide et en charge) et avec défaut d'une seule et 2 barres et 5 barres cassées au rotor. Dans tous les cas, l'application de l'ondelette s'effectue en régime variable dont on considère que la machine présente un défaut à l'état initial et démarre en charge

On compare les signaux de détail et d'approximation obtenus pour les machines avec défauts, les figures (III.6 et III.7) avec l'état sain de la machine (à vide et en charge)

On remarque des perturbations qui se manifestent sous forme d'oscillation aux coefficients (D9, D10, D11, D12 et A12), augmentée à l'état de défaut par rapport au cas sain de la machine.

Cette augmentation dans les signaux (D9, D10, D11, D12 et A12) est due à l'effet que les bandes de fréquence correspondantes sont affectées par les différents types de défauts.

### **III.6 Conclusion :**

Dans ce chapitre, on a abordé principalement la théorie de la transformée en ondelettes discrète ainsi que son application au diagnostic des défauts du MASDE

D'après les résultats obtenus, on constate l'efficacité de la transformée en ondelettes discrète pour la détection du défaut mixte en régime variable du MASDE.

### **Conclusion Générale :**

Dans ce mémoire, on s'est intéressé à l'analyse et diagnostic des défauts d'une machine asynchrone double étoile utilisant la technique des ondelettes. La question a été examinée particulièrement pour les fonctionnements lors l'apparition d'un défaut au niveau du rotor à savoir cassure d'une barre ou plusieurs barres.

Pour cette raison, on a exposé dans le premier chapitre, un survol biographique sur les machines multi-phases, et on a mis en exergue les différents défauts qui peuvent apparaître dans les machines asynchrones multi-phasées ainsi que les différentes méthodes de diagnostic de ces défauts.

Le deuxième chapitre a été dédié à la modélisation de la machine asynchrone double étoile en deux cas à savoir MASDE sain ou avec défaut. La modélisation présentée a été justifiée par les résultats de simulation.

Le troisième chapitre a été consacré à la présentation d'une méthode de diagnostic de défaut de cassure de barres basée la technique des ondelettes. Les résultats de simulation ont montré que cette méthode de diagnostic de défaut est efficace et donne des résultats satisfaisants.

Le travail réalisé au cours de ce mémoire ouvre un certain nombre de perspectives à savoir :

- Développement des algorithmes de commande du MASDE sans capteur mécanique aux modes normal et dégradé ;
- Etudier d'autres types de défauts à savoir un court-circuit au niveau du stator ;
- L'étude, l'analyse et la modélisation de cette machine en fonctionnement génératrice en présence des défauts;
- Réalisation pratique de la stratégie de diagnostic proposée.

## Références bibliographiques

---

### Références bibliographiques

- [1] **D. Hadiouche**, contribution à l'étude de la machine asynchrone double étoile : modélisation, alimentation et structure, Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy-1., soutenue 20 décembre 2001
- [2] **L. Benalia**, « Commande en tension des moteurs à inductions double alimentés », thèse de doctorat, Université de Batna 2010.
- [3] **LAKHDARI Meftah** « Simulation et commande de la machine asynchrone double étoile pour aérogénération », Thèse de Magister de l'Université Ferhat Abbas-Setif-1, 2041
- [4] **ANA .M.LLOR** : « Commande directe de couple à fréquence de modulation constante des moteurs synchrones à aimants permanents », Thèse doctorat université de CARLOS III de MADRID , 2003
- [6] **K. Marouani, L. Baghli, D. Hadiouche, A. Kheloui, A. Rezzoug** : « Discontinuous SVPWM techniques for double star induction motor drive control », 2006, IEEE
- [7] **A. Menacer**, "Contribution à l'identification des paramètres et des états d'une machine à induction pour diagnostic et développement de commande robuste: robustesse vis-à-vis de défauts", Thèse de doctorat, Université de Batna, Décembre 2007.
- [8] **J.P Caron, J.P Hautier**, „Modélisation Et Commande De La Machine Asynchrone“, Edition Technique, Paris 1995.
- [9] **K. Marouani, F. Khoucha, A. Kheloui, L. Baghli and D.Hadiouche** : « Study and simulation of direct torque control of double-star induction motor drive », UERElectrotechnique, EMP, BP17-16111-Bordj El-Bahri, Algiers, Algeria, GREEN, Vandoeuvreles-Nancy, Cedex, France
- [10] **S.G. Mallat**, "A wavelet tour of signal processing," second ed., Academic Press, 1998.
- [11] **T. Boumegoura** « Recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue du diagnostic » thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon 2001
- [12] **M.BENBORDI Bachir** ,« DIAGNOSTIC DE DEFAUTS AU ROTOR PAR L'ANALYSE DE LA SIGNATURE DU COURANT MOTEUR » thèse de 2005 .
- [13] **E. Merabet**, « Commande Floue Adaptative d'une Machine Asynchrone Double Etoile », Thèse de magistère, Université de Batna 2008.
- [14] **E.Merabet**, commande floue optimisée d'un Moteur Asynchrone Double étoile, Mémoire de Magister de l'université de Batna ,2008

## Rèfèrences bibliographiques

---

- [15] **H.Amimeur**, Contribution au contrôle de la Machine Asynchrone Double Etoile These de doctorat, Université de Batna,2012
- [16] **A.Mekahei**, "commande floue optimise d'un Moteur Asynchrone Double etoil à flux Rotorique Oriente ",Meoire de Master de l'universite de laghouat 2012
- [17] : **Kercha Safia et Goubi Wissam** " Etude et modélisation des machines électriques double étoile" Thème Master académique. Université kasdi merbah ouargla 27/06/2013.
- [18] **Mokhtar**, "commande vootrielle d'un Moteur Asynchrone Double Etoile a vitesse variable ",Memoire d'ingènieur de l'universitè de Laghouat 2010
- [19] **S.Chekkal**, "Evaluation des Performances de l"Aèrogènèrateur a base de la Machine Asynchrone Double Etoile connectè au Rèseau Electrique " Mèmoire de Magister de l'universitè Bejaia,2011
- [20] **Hocine Amimeur** ,Mémoire Magister en Electrotechnique " Contribution `a la Commande d'une Machine Asynchrone Double Etoile par Mode de Glissement " 28 /05 / 2008.
- [20] **G. M. Joksimovic´** et J. Penman, «La détection de courts-circuits inter-tours dans les enroulements de stators de moteurs en fonctionnement», «IEEE Trans. Ind. Elec., Vol. 47, non. 5, pages 1078-1084, OCT. 2000. [33] M. E. H. Benbouzid, M. Vieira et C. Theysal., «Détection et localisation de défauts de moteurs à induction à l'aide de techniques avancées de traitement du signal par courant de stator», IEEE Trans. Power Electron., Vol. 14, non. 1, pages 14-22, janvier 1999.
- [21] **Zhiwen Liu, Hongrui Cao, Xuefeng Chen, ZhengjiaHe, Zhongjie Shen**, "Classification à plusieurs failles sur la base de SVM à ondelettes avec algorithme PSO pour analyser les signaux de vibration des roulements d'éléments roulants", Elsevier, Science Direct, Neurocomputing 99 (2013) 399. –410.
- [22] **Matic D., Kulic F., Sanchez M.P, Kamenko I.**, Classificateur de machine à vecteurs de support pour le diagnostic dans les machines électriques: application aux barres cassées, Expert Systems with Applications, 39 (2012) 8681–8689.
- [23] **M. Ayad, D. Chikouche** Application de la transformation en onglets de signaux vibratoires d'un système d'engrenage en vue d'un diagnostic précoce, 4e Conférence internationale sur la fabrication intégrée par ordinateur, CIP'2007.
- [24] **Belhamdi. Saad** "Diagnostic des défauts de la machine asynchrone contrôlée par différentes techniques de commande", Thèse de doctorat, université de Biskra, mai 2014.

## Rèfèrences bibliographiques

---

[25] **Steven T. Karris**, «Signaux et systèmes avec Matlab Computing et la modélisation Simulink», quatrième édition, 2008 Orchard Publications. [www.orchardpublications.com](http://www.orchardpublications.com)

[26] **M. Bazi Smail** "Contribution à la détection et au diagnostic dans un système de conversion à induction", Thèse de Doctorat, Université Batna 2, Décembre 2016.

[27] **Frédéric Truchetet**, "Ondelettes pour le signal numérique", Editions Hermes, Paris, 1998.

## **Annexe A :**

Caractéristique de la machine à induction rebobinée

Marque :FIMET

Puissance :1.1KW

Courant :2.7A

Nombre de poles : 4

Nombre de barres rotorique : 24

Vitesse nominale :1380 tr/min

Les parametres de la machine à induction utilisée en simulation :

### **A-pour diagnostic :**

Nombre de paires de poles : $p=2$

Nombre effectif de spires /phase rotorique  $n_b=22$

Longueur axiale du rotor de la machine  $l=75\text{mm}$

Diametre du rotor  $D=79\text{mm}$

Epaisseur de l'entrefer : $e=0.5\text{mm}$

Induction de fuites /phase statorique : $L_f=7.4\text{mH}$

Moment d'inertie : $j=0.0023\text{kg.m}^2$

Resistance d'une phase statorique : $R_s=3.91 \Omega$

Resistance d'une portion d'anneau de court-circuit : $R_b=3.1 \cdot 10^{-6}\Omega$

Momant d'inertie : $J=0.0023\text{kg.m}^2$

Coefficient de frottement : $f=0.00263\text{N.m .s/rd}$

Nombre de paire de pole : $p=2$

Pertes joule nominale statorique :  $p_{sj}=171\text{w}$

Le couple nominale statorique : $\Gamma_e=7.6118\text{N.m}$

Resistance d'une barre rotorique  $R_e=1.96 \cdot 10^{-4}\Omega$

Inductance de fuite d'une barre rotorique  $L_e=2.16 \cdot 10^{-7}\text{H}$

Inductance de fuite d'une barre rotorique  $L_e=2.16 \cdot 10^{-7}\text{H}$

---



***Introduction Générale***



***Chapitre I :***

**Analyse et Diagnostic des Défauts  
MASDE**



***Chapitre II :***

**Modélisation du MASDE sain et avec défaut**



*Chapitre III :*

**Diagnostic du MASDE Utilisation des  
Techniques Ondelette**



***Conclusion Générale***